

---

# **Vers une ville énergétiquement résiliente**

L'exemple  
de la dorsale Est  
de Paris

---

**Rapport final**  
novembre 2018

## **II Annexes**

---

**Programme  
interdisciplinaire de recherche  
Ignis mutat res**

École nationale supérieure d'architecture,  
de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée  
laboratoire OCS, UMR AUSser  
Ecole des Ponts ParisTech,  
laboratoire Navier, UMR 8205

Penser l'architecture,  
la ville et les paysages  
au prisme de l'énergie

Ministère de la Culture et de la communication  
Direction générale des patrimoines  
Bureau de la recherche architecturale urbaine et paysagère

Session 2012 - 2014

---









---

**SOMMAIRE - TOME II**  
**Annexes**

---

**7 Annexe 1**  
Valorisation

---

**9 Annexe 2**  
Compte-rendu du workshop intensif  
européen de 2013

---

**87 Annexe 3**  
Rapport « Bilan énergétique et  
réhabilitation d'un groupe de  
bâtiments », par Sébastien Malaussène,  
École des Ponts ParisTech

---

**131 Annexe 4**  
Catalogue des scénarios de projet,  
Master « Matière à penser »

---

**153 Annexe 5**  
Mémoires de Master « Matière à  
penser » liés au programme Ignis mutat  
res

---

**155 Annexe 6**  
Rapport « Relation entre morphologie et  
performance énergétique. La recherche  
d'indicateurs morpho-énergétiques »,  
par Réda Oussennan



---

## Annexe 1

## Valorisation

Nous avons eu l'occasion de rendre compte de l'avancée et du résultat de la recherche, dans le cadre du programme *Ignis mutat res* (désormais, IMR) et ailleurs. Nous les listons ci-dessous par ordre chronologique.

- 20 novembre 2012, *Séminaire inaugural de la 2e session du programme IMR*.
- 3 décembre 2013, *Séminaire transversal Efficacités énergétiques*, Labex Futurs urbains, Ensa Paris-Belleville.
- 24 mai 2013, *Séminaire de travail IMR*, MCC.
- 25 mai 2013, *Journée d'études Vers une ville énergétiquement résiliente. Définir une typomorphologie énergétique*, Ensa Marne-la-Vallée.
- 16 octobre 2013, *Joint French-Japanese Seminar on sustainable metropolitan systems and activation of building stock*, Labex Futurs urbains, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée.
- 29 novembre 2013, *Séminaire scientifique IMR*, Véolia Environnement, Paris.
- 8 janvier 2014, *Conférence scientifique*, Egis/Elioth, Montreuil.
- 10 juillet 2014, *SolarDecathlon*, Versailles.
- 27 novembre 2014, *Séminaire de coordination scientifique*, Tour Sequoia, La Défense.
- 19 janvier 2015, *Labex Week Futurs urbains*, Marne-la-Vallée.



---

## **Annexe 2**

## **Compte-rendu du workshop intensif européen de 2013**





# WIE13

WORKSHOP INTENSIF ENVELOPPES 2013 > IMR  
<< Vers une ville énergétiquement résiliente, l'exemple de la dorsale Est parisienne >>



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

École d'**architecture** <sup>1</sup>  
de la **ville & des territoires** à Marne-la-Vallée



Waterford Institute of Technology  
INSTITIÚID TEICNEOLAÍOCHTA PHORT LÁIRGE



---

# WIE13

WORKSHOP INTENSIF ENVELOPPES 2013 > IMR  
<< Vers une ville énergétiquement résiliente, l'exemple de la dorsale Est parisienne >>

---

Jean Francois Blassel / Florence Lipsky / Marc  
Mimram / Maire Henry / Fintan Duffy / Florian  
Musso / Stefan Giers / Matthias Paetzold /  
Vivien Gimenez

**CREDITS LIVRET**

Vivien Gimenez

---



---

## **SOMMAIRE**

07 - LES INTENTIONS DU WORKSHOP INTENSIF  
11 - DEROULEMENT PEDAGOGIQUE D'UN WORKSHOP  
15 - SUJET / PLANNING / EQUIPES WIE 13  
21 - SITE  
27 - TYPOLOGIES  
43 - REHABILITATIONS  
47 - PHASE 01 / TRAVAIL EN EQUIPE  
53 - PHASE 02 / PRESENTATION INTERMEDIAIRE  
59 - PHASE 03 / TRAVAIL EN EQUIPE  
65 - PHASE 04 / PRESENTATION FINALE

---

## **SUMMARY**

07 - THE AIM OF THE INTENSIVE WORKSHOP  
11 - HOW THE TEACHING ASPECTS OF THE WORKSHOP ARE RUN  
15 - TOPIC / PLANNING / TEAMS WIE 13  
21 - SITE  
27 - TYPOLOGYS  
43 - REHABILITATIONS  
47 - PHASE 01 / TEAMWORK  
53 - PHASE 02 / INTERMEDIARY PRESENTATION  
59 - PHASE 03 / TEAMWORK  
65 - PHASE 04 / FINAL PRESENTATION



---

# **LES INTENTIONS DU WORKSHOP INTENSIF**

---

## **THE AIM OF THE INTENSIVE WORKSHOP**

---

## INTENTIONS

C'est de l'impossibilité de détacher la question architecturale de la question technique et de la possibilité de faire de la technique un moteur d'invention architecturale, même modeste, qu'est né l'exercice intensif d'enveloppes. La plupart du temps, la durée d'un projet d'école d'architecture, limitée par le cadencement du calendrier universitaire, interdit de s'intéresser aux questions techniques d'un projet, sauf à en simplifier la dimension architecturale. Pour contourner cette contradiction apparente, nous avons choisi de créer un exercice sous une triple contrainte :

- de temps, en limitant la durée de l'exercice radicalement,
- de lieu, en forçant un contexte à la fois précis et flou,
- et surtout, de thème, en focalisant la conception architecturale et technique, sur une toute petite partie du projet, en l'occurrence, un fragment d'enveloppe.

Dans ces limites, l'exercice propose une interprétation environnementale de l'architecture, et de la technique qui lui est indissolublement liée, de deux façons complémentaires :

- la contribution substantielle, directe et indirecte, de l'architecture et de sa production dans l'empreinte environnementale de nos activités et de celle des bâtiments qui les abritent,
- la compréhension, au sein d'une architecture particulière, du rôle critique de l'enveloppe dans les échanges énergétiques entre endoclimat du projet et macroclimat qui l'environne.

---

## INTENTIONS

This exercise in 'intensive envelope' was born out of an understanding that it is impossible to separate architectural considerations from technical ones, and that technique can serve as a motor for architectural invention, however modest that may be. Usually, the time allocated to projects in a school of architecture, which is determined by the rhythm of the university calendar, prevents their technical aspects from being considered in too great detail, unless the architectural intentions are reduced in importance. In order to circumvent this apparent contradiction, we have chosen to create a project that encompasses three constraints:

- The constraint of time; by radically limiting the project's duration,
- The constraint of place; by imposing a context which can be both well-defined and open to interpretation,
- And most importantly, the constraint of the theme, which focuses the architectural and technical design towards a small element of the project, in this case a fragment of the 'envelope', or building skin.

Within these limits, the exercise proposes an environmental interpretation of architecture and of those technical aspects with which it is indissociably linked. It proposes to do this in two complimentary ways:

- The substantial contributions, both direct and indirect, that architecture, and its production make within the environmental footprint of our daily activities and that of the buildings that house them, and
- An understanding, within the specifics of a particular architecture, of the critical role played by the building's envelope in energy transfers between the project's microclimate and the macroclimate surrounding it.



---

## INTÉRÊTS ET LIMITES

Ces deux aspects de l'enveloppe contribuent à situer le projet bien entendu géographiquement mais aussi culturellement. La réflexion sur le climat interne du projet ne relève pas de statistiques météorologiques et l'enveloppe n'est pas réduite à un dispositif technique dont il suffirait de manipuler quelques paramètres physiques pour atteindre un standard universel.

L'enveloppe est l'outil d'un confort que l'architecture définit. Ainsi liée intrinsèquement à des pratiques, l'enveloppe est envisagée moins comme une limite sans épaisseur que comme une marge, dotée de dimensions et investie par des usages spécifiques.

En tant que pédagogie, l'exercice propose un parcours cohérent et concis du très général, le climat, au très spécifique, une baie ou quelques panneaux de façade. Il s'appuie et alimente l'intérêt naturel de tout concepteur pour l'identité du projet, telle qu'elle se manifeste dans sa façade. L'échelle et la variété des préoccupations qui nourrissent la réflexion sur l'enveloppe élargissent le champ des possibles et repoussent une cristallisation précoce de son image ou de son graphisme. Le « régionalisme climatique » de l'exercice, dans un premier temps le programme est en effet exploré sous deux latitudes différentes, lui confère une dimension comparative. La démarche va du climat vers l'architecture, clarifiant le rôle d'outil technique de cette dernière. Le corps, origine de la technique, est doublement mis en jeu, par l'intermédiaire du confort d'abord mais aussi par la proximité au corps et la tactilité de l'enveloppe et de ses ouvertures. Enfin, la taille modeste des éléments considérés permet de les mettre au point de façon complète, en résolvant notamment des questions précises de matérialité et de mise en œuvre.

---

## EDUCATIONAL INTEREST OF THE WORKSHOP AND ITS LIMITS

These two aspects of envelope help to position the building not just geographically but also culturally. This reflection on the project's internal climate is not just about meteorological data, and the envelope is not reduced to a mere technical device requiring the manipulation of a few physical parameters in order to attain some kind of universal standard.

The envelope is a tool for creating conditions of comfort which the architecture itself defines. By linking it intrinsically to practice, the envelope is conceived not as a width-less boundary but more as a margin or threshold, having dimensions and able to house specific functions.

From the pedagogical point-of-view, the exercise is structured in a coherent and precise way, from the general scale of climate to the very specific scale of the bay or façade-panel. It supports and reinforces the natural desire of every designer to give the project an identity, particularly in relation to its façade. The extent and variety of the issues which support this reflection around the notion of envelope tend towards a widening of possibilities which in turn discourages any premature 'jumping to conclusions' in graphic or imaging terms. The 'climatic regionalism' of the exercise (initially the project is explored under two or three different latitudes) gives it a comparative dimension. The exercise progresses from climate to architecture, clarifying the latter's role in the technical design. The human body, which is the basis of all of our relationships to technology, is twice called into play: first via the requirements for conditions of comfort, and then by the positioning of this body in proximity to the tactile envelope and its openings. Finally, the reduced scale of these elements allows them to be finalised in a complete way, particularly resolving those specific questions relating to materiality and construction.



---

# **DEROULEMENT PEDAGOGIQUE D'UN WORKSHOP**

---

**HOW THE TEACHING  
ASPECTS OF THE  
WORKSHOP ARE RUN**

---

## **CORRESPONDANCE AVEC LES OBJECTIFS ERASMUS**

Ce projet est né d'une réflexion commune à nos trois écoles, sur le thème de l'enveloppe du bâtiment. Bien que chaque établissement traite des problématiques de développement durable dans le cadre de son programme de formation, l'objectif est de mettre en place, un exercice dont la nature consiste en un programme intensif concentré sur une dizaine de jours, le but étant de faire cohabiter et de rapprocher dans la pratique, des compétences et des points de vues différents comme dans un bureau d'études. Hormis l'architecture, les objectifs et les résultats escomptés nécessitaient une ouverture sur les disciplines de l'ingénierie des enveloppes, l'ingénierie climatique, la science physique, la science de l'environnement, le développement durable et les techniques du design.

C'est pourquoi il est essentiel de regrouper des étudiants en architecture et en ingénierie tant d'un point de vue pédagogique que linguistique et intellectuel. Le choix d'organiser l'IP chaque année dans un des établissements partenaires renforce la découverte d'un autre mode d'enseignement et d'une culture différente enrichissante tant sur le plan professionnel que personnel. Au sein des équipes de travail on retrouve également des étudiants représentant une variété de nationalités et de cultures différentes.

L'ip est un moment de rencontre et de réflexion sur des enjeux auxquels devront faire face les étudiants dans le monde du travail. En effet, le domaine de la construction et du bâtiment va aujourd'hui de pair avec les changements climatiques et le développement durable.

---

## **MATCHING THE OBJECTIVES OF THE ERASMUS PROGRAMME**

The project is the result of a shared reflection between our three schools around the theme of 'building envelope'. While each school deals individually with issues relating to sustainability within its own teaching programme, the objective of this workshop is to set up an intensive 10-day programme the aim of which is to bring together in a practice-based way different competencies and different points-of-view, similar to those within a design team or bureau d'études. Apart from the discipline of Architecture, the objectives and their anticipated outcomes necessitate an openness towards other disciplines such as engineering, façade design, climate control, physics, environmental science, sustainability and industrial design. This is why the requirement to form mixed groups of students is so important and not just from the teaching point-of-view, but linguistically and intellectually also.

The decision to hold the Workshop in a different member-school each year reinforces the importance of exposing the students to other ways of teaching and other cultural outlooks which is very enriching for them both on the personal and professional levels. The working groups themselves contain a variety of students of different languages and cultural backgrounds. The Workshop is a time to meet others and to reflect upon some of the real issues the students will face in their working lives. The reality we face is that we can no longer dissociate the whole area of building and construction from the issues relating to climate change and sustainability.

---

## PROJET

Le projet consiste en un exercice intensif, de conception architecturale et technique d'une enveloppe délibérément localisée dans des zones climatiques différentes. L'enveloppe est considérée comme un élément de médiation climatique entre l'intérieur du bâtiment et son environnement, depuis les flux d'énergie et de matière qui déterminent ses propriétés thermiques et hygrométriques, jusqu'à ses aspects moins quantifiables, spatiaux et perceptifs, qui contribuent également à la constitution de l'endoclimat du projet.

---

## CONTEXTE ET OBJECTIF

Le contexte général de l'exercice est celui de l'enseignement de l'architecture et de la technologie des enveloppes dans nos établissements respectifs. Enseignement fortement marqué par la question générale du développement durable, de ses effets sur la conception des projets de bâtiments et tout particulièrement sur celle de leurs enveloppes, couverture et façades, lieux d'importants échanges énergétiques entre l'environnement et le bâtiment. Cet exercice commun s'intègre naturellement dans la progression pédagogique de chacun des programmes des établissements partenaires. Le projet vise à donner aux étudiants les outils intellectuels et pratiques, indispensables à la prise en compte des données climatiques dans la conception architecturale et technique des enveloppes. Les conférences et l'exercice de conception d'un objet architectural et construit proposés aux étudiants font apparaître le rôle clef que doivent tenir les processus d'échanges énergétiques et physiques dans la définition architecturale et constructive de l'enveloppe des bâtiments. Associant étudiants en architecture et élèves-ingénieurs, le projet contribue à décroïsonner ces formations.

Outre les visites de sites dans chacun des trois pays, les journées

consacrées au projet comportent des conférences et des présentations organisées par l'institution hôte du workshop.

---

## PROJECT

The project itself involves an intensive architectural and technical exercise through designing a building envelope which is deliberately located in different climate zones, none are generally outside of the members-schools' regions. The envelope is considered as a climatic mediation element between the interior of the building and its environment, taking into account energy and material transfers which determine its thermal and hygrometric properties, and including its less quantifiable aspects such as spatial and sensory, which also have a bearing on the project's endoclimate.

---

## CONTEXT AND OBJECTIVE

The general context of the exercise is the teaching of Architecture and the Technology of the Envelope in our respective schools. This teaching is strongly influenced by the preoccupation of sustainability, its effects on the area of construction and particularly of the building skin and façades, which are the primary areas of energy transfer between the building and its environment. This project has been integrated into the teaching programme as part of a natural progression within the cursus of each school.

The project aims to provide the students with the practical and intellectual tools indispensable to their ability to take climatic requirements into account in the architectural and technical design of building skins. The workshop programme combines daily lectures with studio tutorials to produce a designed proposal which is capable of being built and which demonstrates to the students the importance of taking these environmental transfers into account when undertaking any design of a

building's envelope. By associating students of architecture, engineering and architectural technology, the project serves to open up these disciplines to each other. Apart from site visits in each of three countries, the workshop provides talks and presentations organised by the host-institute every year.



---

**SUJET / PLANNING /  
EQUIPES WIE 13**

---

**TOPIC / PLANNING /  
TEAMS WIE 13**

---

## INTENTIONS

Au cours de l'intensif, nous abordons l'enveloppe du bâtiment comme un élément architectural à part entière. Pour réussir à l'explorer en profondeur dans les courts délais dont nous disposons, nous mettons dans la limite du possible entre parenthèses l'organisation interne du bâtiment et nous limitons à la conception architecturale et technique de l'enveloppe du bâtiment.

Nous proposons d'envisager celle-ci de multiples façons et notamment celles-ci :

- le rôle fondateur de l'enveloppe en tant que séparation entre le climat externe au bâtiment et le climat interne au bâtiment dont découle en grande partie le confort des habitants. Corrélativement, sa fonction de filtre et capteur énergétique dont l'efficacité conditionne significativement la performance énergétique globale du bâtiment,
- l'importance de l'architecture de l'enveloppe, des relations entre forme, orientation, ouvertures et porosités, pour ces performances techniques,
- la sensibilité de ces performances et donc celle des organisations physiques qui les rendent possibles aux caractéristiques changeantes des climats internes et externes, entre jour et nuit et de saison en saison.
- l'indispensable saut qualitatif de la membrane technique performante au volume de l'enveloppe, entre-deux au caractère unique, riche d'usages potentiels,
- le point de vue extérieur et l'identité des bâtiments à travers l'emploi de formes, de matériaux et de techniques, tout particulièrement dans le cadre présent, celui de réhabilitations.

---

## OBJECTIVES

During the intensive workshop, we will reflect on the envelope of a building as a single architectural element. In order to explore this element in depth in such a short space of time we will attempt to put the question of the internal organisation of the building to one side, concentrating on the architectural and technical conception of the shell. We will consider;

- the fundamental role of the envelope as the separating element between the external climate and that inside the building; a main factor in the comfort of its users. By extension, the shell's function as energy filter and receptor, the efficacy of which directly influences the overall energy efficiency of the building.
- the importance of the envelope's architecture; the relationship between shape, orientation, openings and permeability in connection with technical performance.
- technical sensitivity to changing internal and external climates from season to season, day to night and the physical organisation that makes it possible.
- the necessary qualitative leap of the high-performance technical membrane to the volume of the envelope, a unique coexistence of elements with a wealth of potential uses.
- the exterior viewpoint and the identity of a building through the use of shape, materials and techniques, considered especially through rehabilitation.



---

## PROJET

L'intensif se place dans le cadre de la réponse de l'école d'architecture au programme de recherche IMR : « Vers une ville énergétiquement résiliente, l'exemple de la dorsale Est parisienne » par lequel nous comptons identifier les potentiels et les faiblesses énergétiques de bâtiments existants, du point de vue de leur forme, ou plus précisément de leur typo-morphologie énergétique.

Dans l'intensif enveloppe nous nous sommes limité à produire des scénarios de réhabilitation énergétique d'enveloppes de bâtiments de logement sur des sites choisis dans la dorsale Est. Nous avons cherché donc à produire un grand nombre de scénarios architecturaux, tant sur le tissu de base que sur les améliorations qui leurs seraient apportées, dont les performances ont fait l'objet de comparaisons chiffrées.

Nous nous sommes intéressé spécifiquement à un quartier d'Aulnay-sous-Bois et à trois typologies particulières de bâtiment qui ont été affectées à chacune des équipes d'étudiants. Dans un premier temps, nous avons demandé d'envisager trois approches de la réhabilitation énergétique de l'enveloppe, sous les formes de :

a- renouvellement des baies uniquement,

b- création de modules particuliers à monter sur l'immeuble existant,

c- reprise ou emballage total de la façade et de la couverture existante.

Dans un second temps, chaque équipe a développé l'une de ces trois solutions, retenue à l'issue d'un jury intermédiaire.

Le site, l'orientation et les données climatiques ont été connus et ont été pris en compte par les équipes dans la conception du projet. Ils ont analysé les données climatiques de Paris et ont utilisé cette analyse dans leur travail, en gardant à l'esprit que les données météorologiques couvrent le passé,

n'anticipent pas les évolutions dues au réchauffement climatique et ne suffisent pas pour mettre en place une stratégie de résilience vis-à-vis de ces changements. Il était convenu notamment de réfléchir à la nécessité de gain ou, au contraire, à celle de protection solaire, du potentiel de ventilation et de recueil d'énergie, de l'isolation thermique, et d'imaginer comment ces paramètres varient au cours de l'année, en fonction de l'utilisation des espaces directement en contact avec l'enveloppe. Les équipes ont explicitées la stratégie énergétique adoptée pour le projet et l'ont utilisé pour informer tous les niveaux de leur conception.

---

## PROJECT

The intensive workshop forms part of the ENSAVT's response to the interdisciplinary research programme Ignis Mutat Res (IMR):

"Towards an energy resilient town: the example of the East Paris sector" through which we intend to identify existing buildings' energy potential and weaknesses from the point of view of shape, or more precisely their morphological energy type.

During the "Envelope" intensive workshop we limit ourselves to simulating the energy renewal of shells for housing located in the East Paris sector. We have created a wide range of architectural scenarios, considering the basic materials that would be used, the improvements that would be brought about, and carrying out quantitative energy efficiency comparisons between projects.

Each of our student teams focuses on one of 3 specific building types in a neighbourhood in Aulnay-sous-Bois. Initially, the groups are asked to imagine three different approaches to energy rehabilitation of the buildings' envelopes, in the form of:

- a- Renewing the windows only
- b- Creating elements to be installed onto the building as it stands
- c- Repairing or covering the existing facade and roof.

Next, our teams are asked to follow through with one of their given solu-

tions, which will have been decided by intermediary jury.

Site, orientation and climate considerations will have been taken into account by the teams throughout conception of their project. They will have analysed the climatic data for Paris and integrated it into their projects while bearing in mind that climate analysis is based on past data and does not anticipate changes that occur due to global warming and thus cannot suffice to establish a strategy of sustainability in answer to any potential change in climate. Other points for reflexion are the need for heat gain or solar protection, the potential of ventilation, energy storage and thermal insulation and how these factors vary throughout the year depending on the utilisation of the spaces in direct contact with the envelope.

Each group describes the energy strategy adopted on their project and uses it to inform all aspects of the design concept.

---

## **GROUPE #1**

Estelle Aïtcin  
Antoine Virolleau  
Hugo Amiard  
Aisling Greene  
Joan Sidany

---

## **GROUPE #2**

Justine Furet  
Pierre André  
Eléonore Wimart  
Alice Barrois  
Aoife Grogan

---

## **GROUPE #3**

Tristan Gautard  
Audrey Aquarronne  
Emeline Bonnet  
Cathy Kavanaugh

---

## **GROUPE #4**

David Dillmann  
Alexian Joly  
Lisa Cepisul  
Rachel Kelly

---

## **GROUPE #5**

Laura Fontaine  
Gaëlle Louyot  
Céline Dupré  
Shane Morrissey

---

## **GROUPE #6**

Pierre Marquis  
Amine Sabri  
Cerise Honoré  
Alexandra Pickerell

---

## **GROUPE #7**

Lénaïck Nee  
Clément Schoen  
Emmanuelle Lagouge  
Joséphine Mallart

---

## **GROUPE #8**

Reda Oussnnane  
Enzo Ricciotti  
Audrey Rocher  
Peter O'Brien

---

## **GROUPE #9**

Quentin Perchais  
Adriana Sandulescu  
Sandrine Vignarath  
Nadir Barnat

## CALENDRIER ET EFFECTIF

La durée de l'atelier cette année était d'une semaine uniquement, pour cette raison, L'effectif total d'environ 40 étudiants provenant de l'EAVT, WIT et TUM a été réparti en équipes de 4 ou 5 personnes. L'encadrement de l'exercice intensif a été assuré par Jean-François Blassel, Florence Lipsky et Marc Mimram pour l'EAVT, Maire Henry et Fintan Duffy pour WIT et Florian Musso pour la TUM, aidés de trois assistants, Stefan Giers, Matthias Paetzold et Vivien Gimenez.

## TIMETABLE AND PARTICIPANT NUMBERS

The workshop lasts one week and the 40 some participating students from ENSAVT, WIT (Waterford Institute of Technology), the TUM (Technical University of Munich) are divided into 4 or 5 groups led by Jean-François Blassel, Florence Lipsky and Marc Mimram for the ENSAVT, Maire Henry and Fintan Duffy for WIT and Florian Musso for the TUM, assisted by Stefan Giers, Matthias Paetzold and Vivien Gimenez.

|    | Ve<br>08                 | Sa/Di<br>09/10     | Lu<br>11                 | Ma<br>12                  | Me<br>13               | Je<br>14                 | Ve<br>15                 | Sa/Di<br>16/17   | Lu<br>18           |
|----|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| 9  |                          | journées<br>libres |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 10 | café                     |                    | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe      | travail<br>en équipe   | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe     |  | affichage          |
| 11 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 12 | Lancement                |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 13 |                          |                    | conférence<br>B.Cimerman | présentation<br>étudiants | affichage              |                          | conférence<br>M.Bénard   |  |                    |
| 14 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          | école<br>ouverte<br>travail en<br>équipe<br>synthèse<br>impression<br>rendu<br>pré-<br>affichage |                    |
| 15 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 16 | correction<br>à la table |                    | correction à<br>la table | correction à<br>la table  | rendu<br>intermédiaire | correction<br>à la table | correction<br>à la table |  | rendu<br>définitif |
| 17 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 18 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 19 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  | pot final          |
| 20 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 21 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |



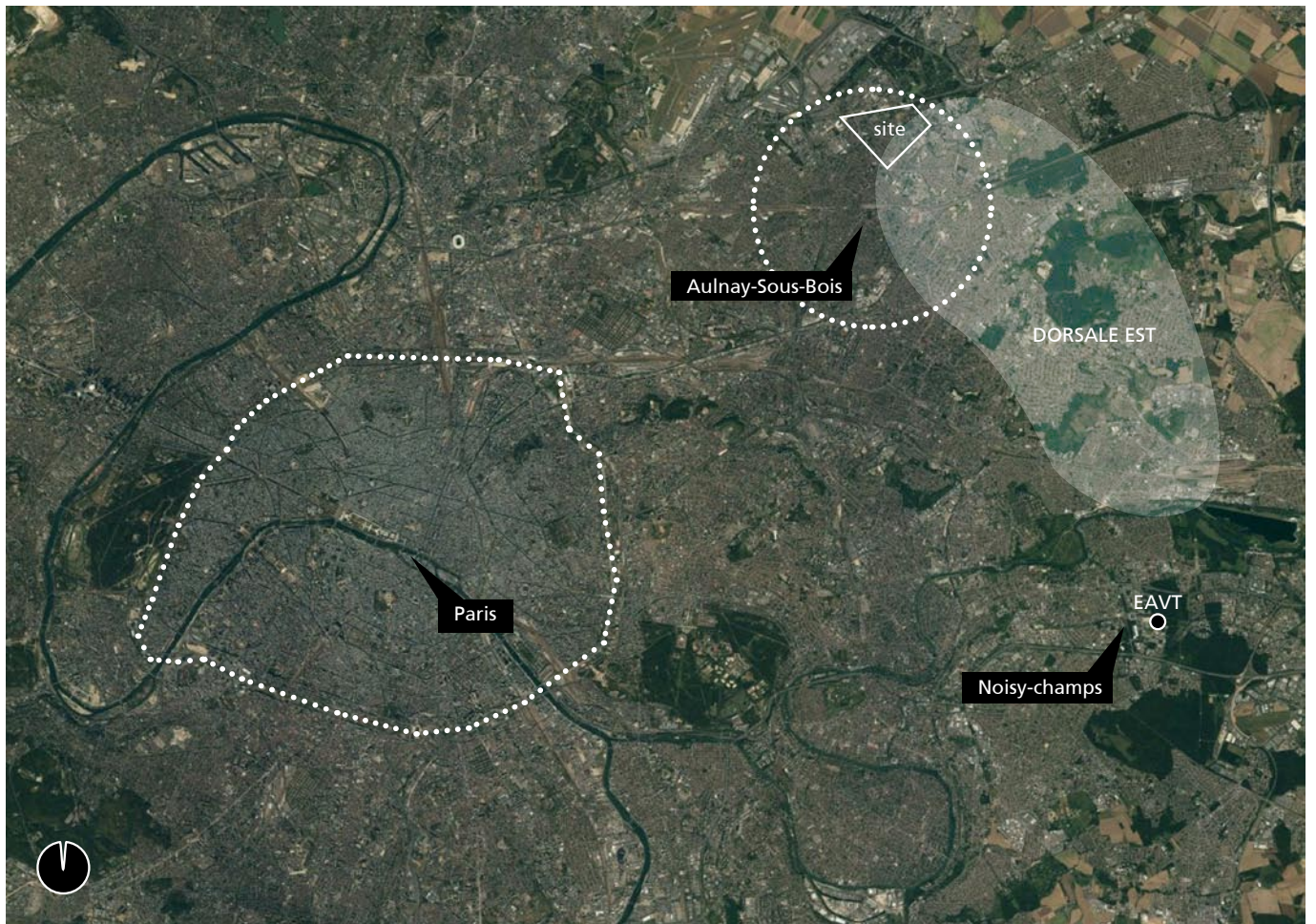
---

**SITE**

---

**SITE**







---

## AULNAY-SOUS-BOIS, UN TERRAIN D'ÉTUDE STRATÉGIQUE

La «dorsale-Est» Parisienne qui s'étend de Aulnay-sous-bois au nord à Noisy-le-grand au sud constitue un terrain d'étude riche, car symptomatique et symbolique de la constitution des villes périurbaine depuis les années 60. De plus se fragment de territoire confère en lui une place majeur de renouvellement urbain dans le cadre du «grand paris» dans un futur proche.

C'est dans se contexte réelle que nous avons demandé au étudiants de se positionner; Nous avons demandé aux étudiant de réfléchir et d'arpenter ce territoire, non pas par un point de vue macro, qui tend à analyser et concevoir le renouvellement par la grande échelle, par de grands tracés, à l'image de l'urbanisme, mais au contraire de prendre le parti que la grande échelle peut se penser et prendre sens par un regard et des opérations successive de conceptions à une micro-échelle, à l'échelle du bâtiment, Il s'agissait alors de comprendre et de concevoir la ville comme un organisme dont chaque bâtiment constitue sont ADN, et d'intervenir sur ces cellules souches, sur leur enveloppe, leur usage interne pour donner du sens et une cohérence écologique, économique a ce métabolisme qu'est la grande ville.

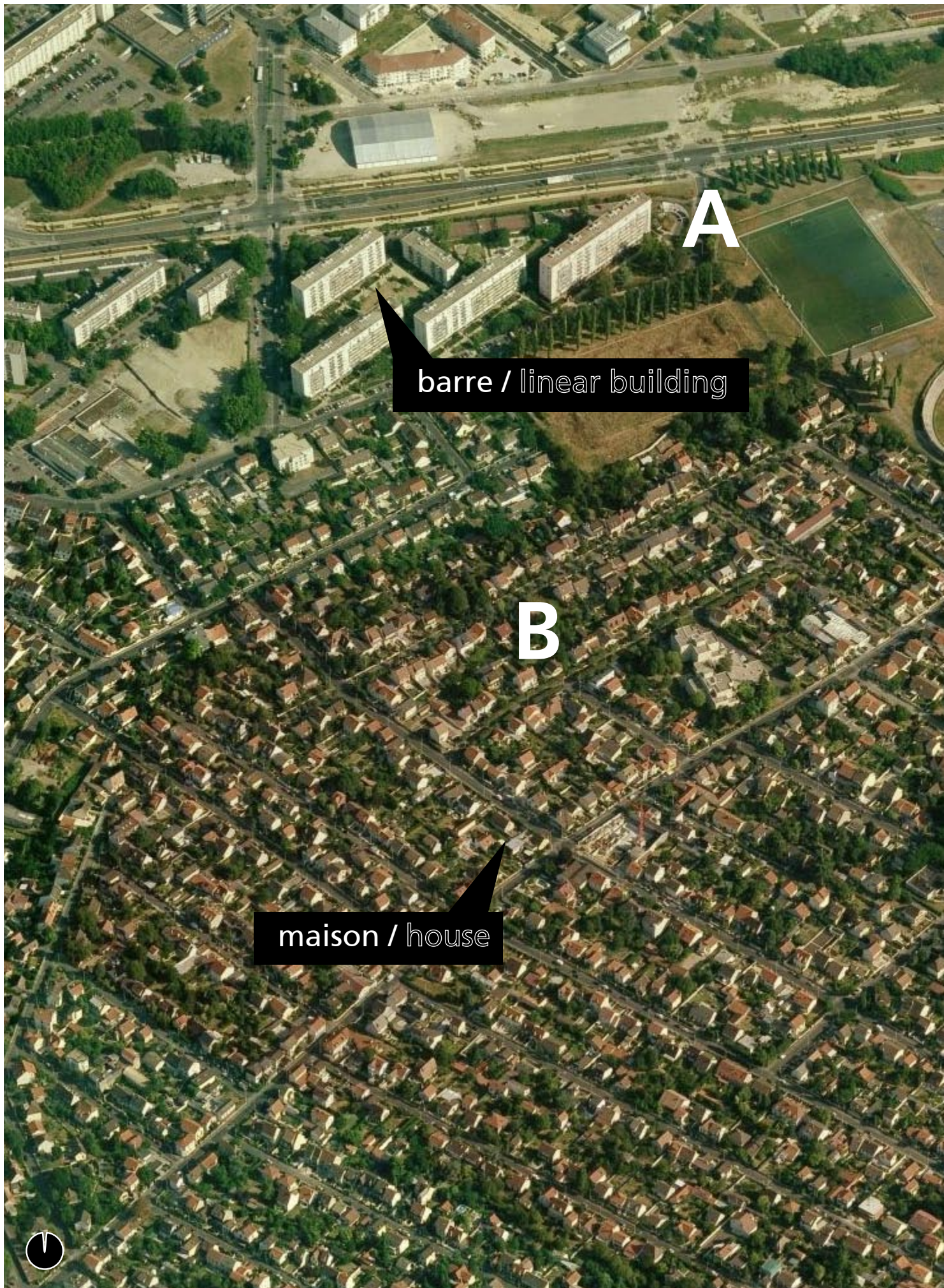
---

## AULNAY-SOUS- BOIS, AN AREA FOR STRATEGIC STUDY

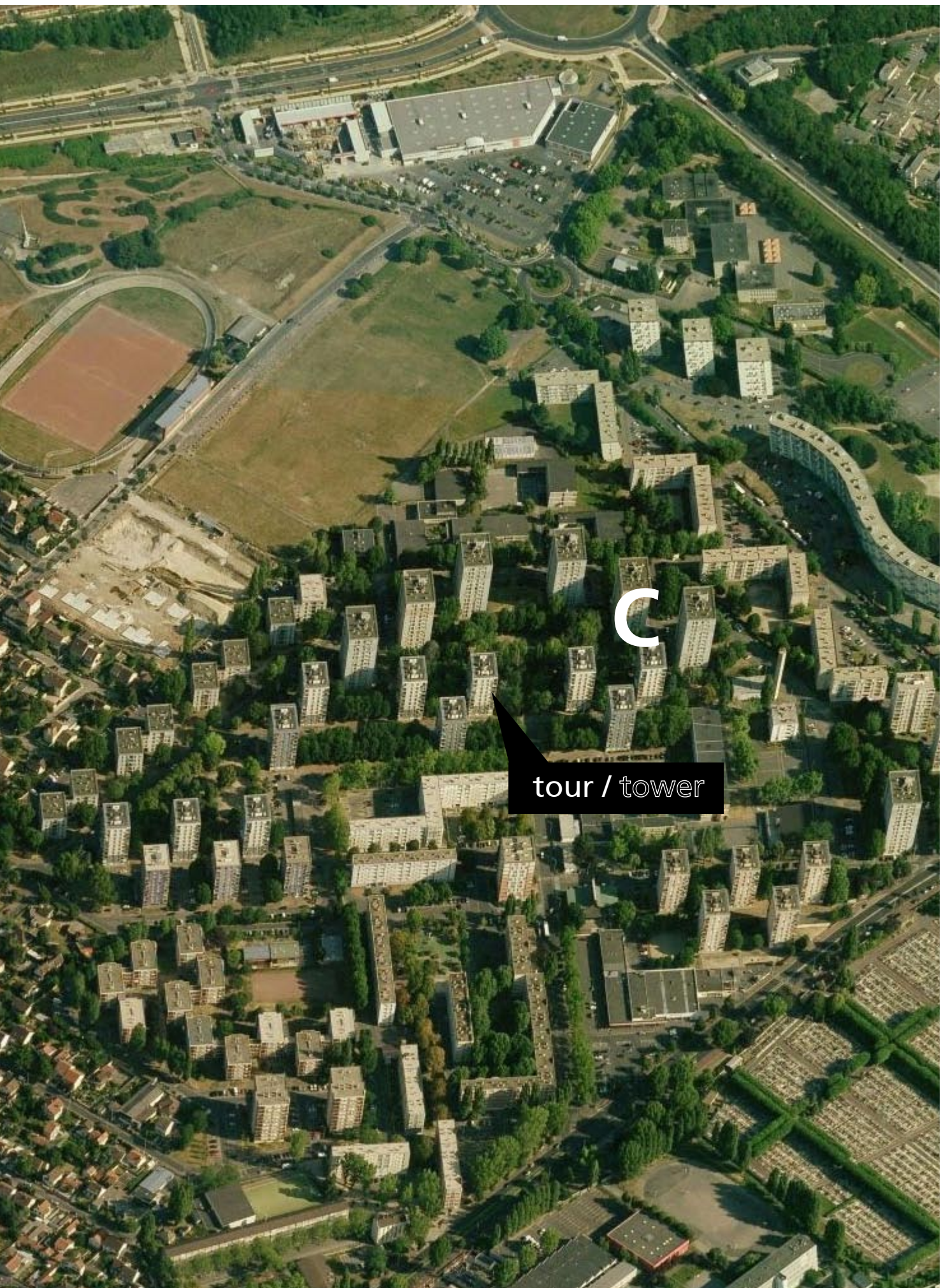
A fertile area for study, the "East-Paris sector" stretching from Aulnay-sous-Bois in the North to Noisy-le-Grand in the South, is symbolic and symptomatic of suburban building since the sixties. Moreover, in the near future, it will play a major role in the "Grand Paris" project for urban renewal.

It is within this very real context that the students are asked to survey and reflect on the territory, not from a macro standpoint, which tends to analyse and conceive of renewal projects from the wider urbanistic, large scale view, but rather to consider that the large scale can be seen and understood through an approach and a series of interventions at the micro, or construction level, imagining each building is part of a town's genetic make-up and thus intervening on the "stem-cells", on their shell and their internal function to give meaning as well as ecological and economic coherence to that great organism: the city.













---

**TYPOLOGIES**

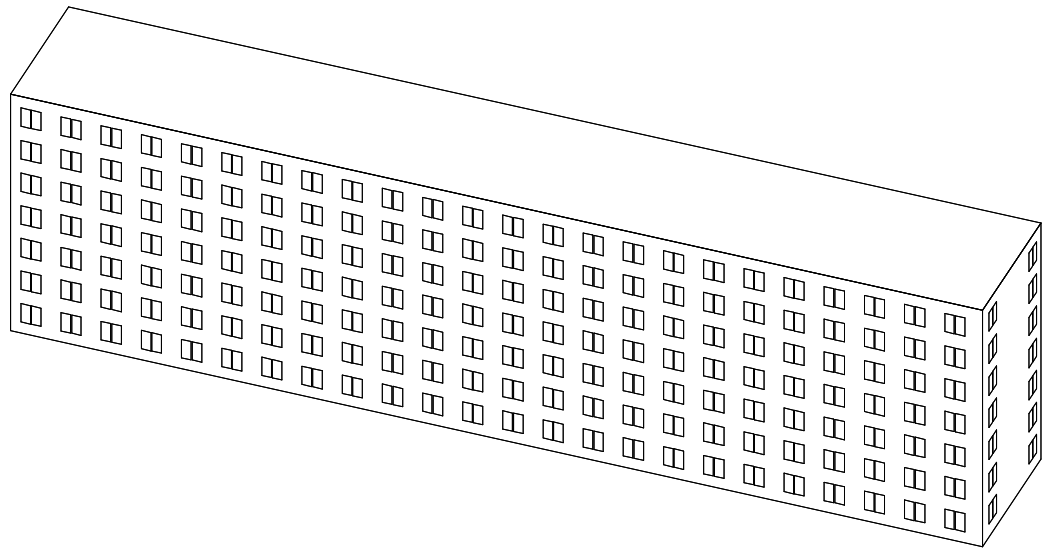
---

**TYPOLOGYS**

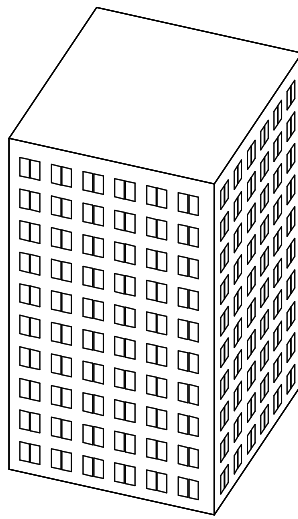
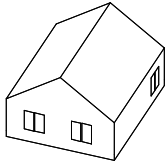
---

TYPOLOGIE **A**

barre / linear building

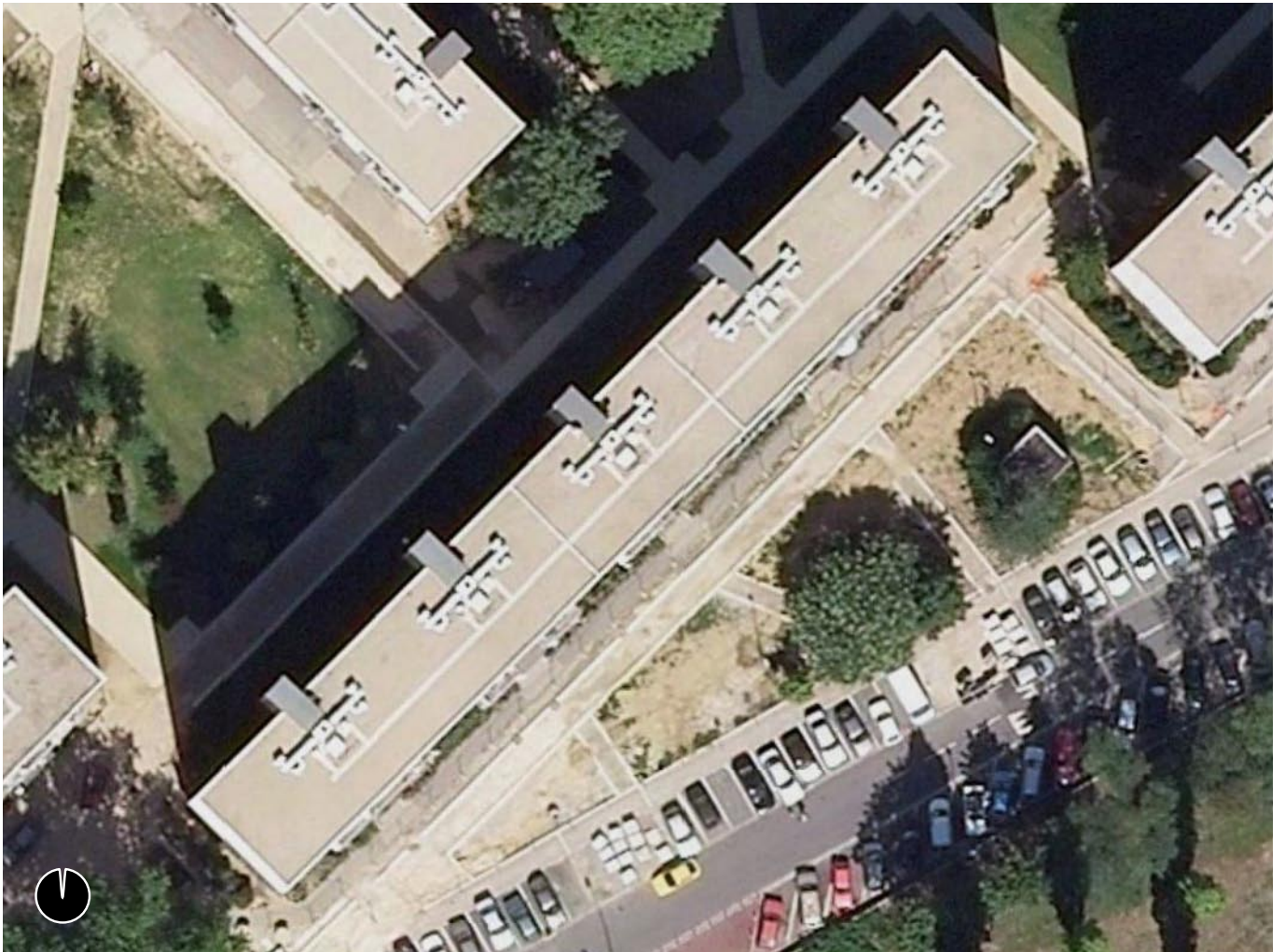


TYPOLOGIE **C**  
tour / tower



maison / house

TYPOLOGIE **B**



---

# TYPOLOGIE **A**

## UNE BARRE

---

### GROUPE #1

Estelle Aïtcin  
Antoine Virolleau  
Hugo Amiard  
Aisling Greene  
Joan Sidany

---

# TYPOLOGIE **A**

## LINEAR BUILDING

---

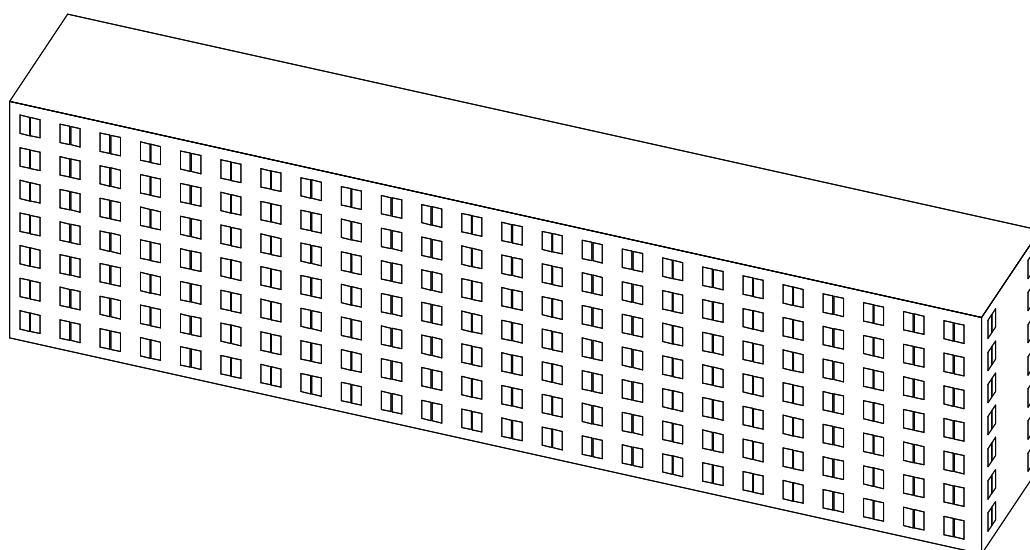
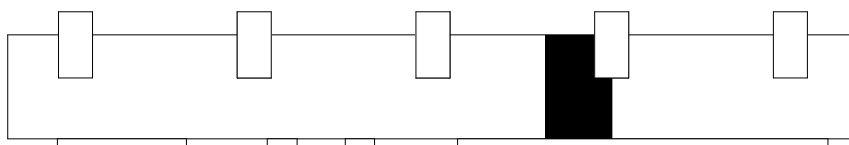
### GROUPE #4

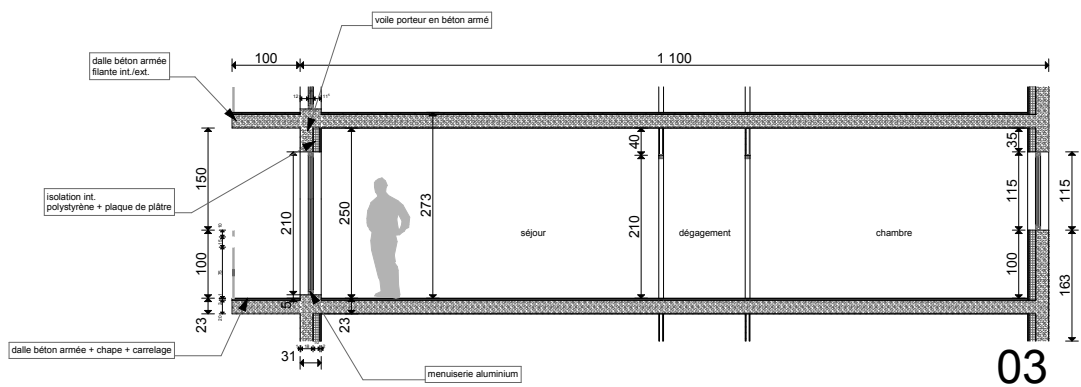
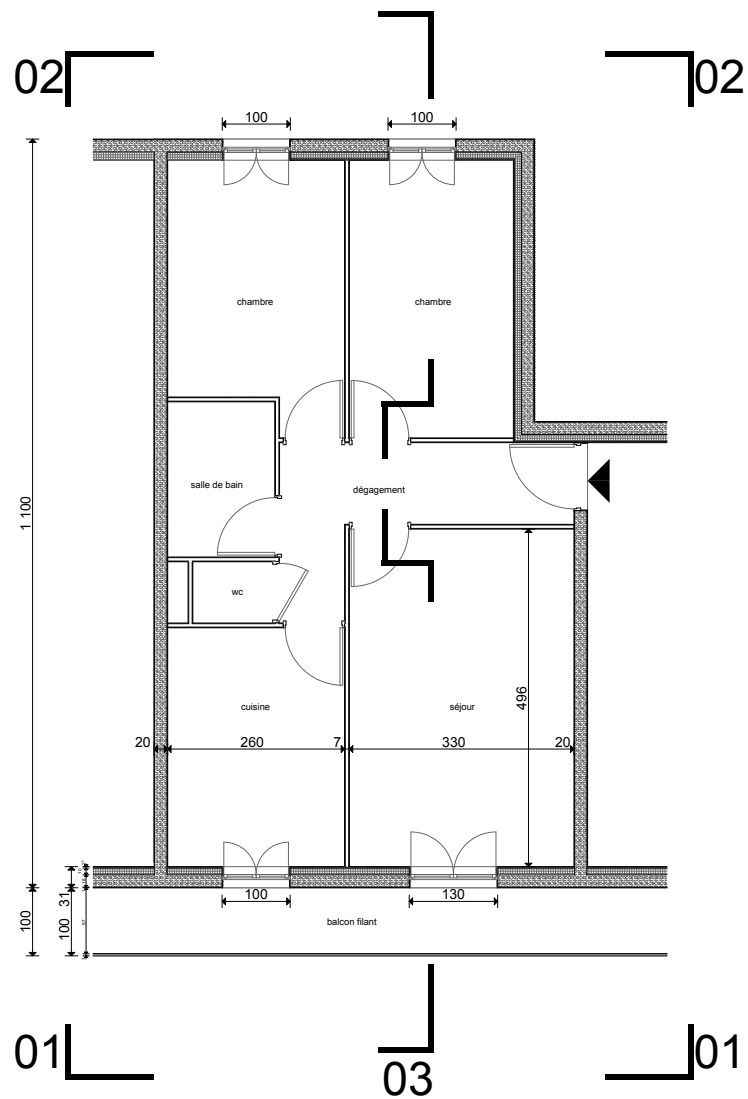
David Dillmann  
Alexian Joly  
Lisa Cepisul  
Rachel Kelly

---

### GROUPE #7

Lénaïck Nee  
Clément Schoen  
Emmanuelle Lagouge  
Joséphine Mallart





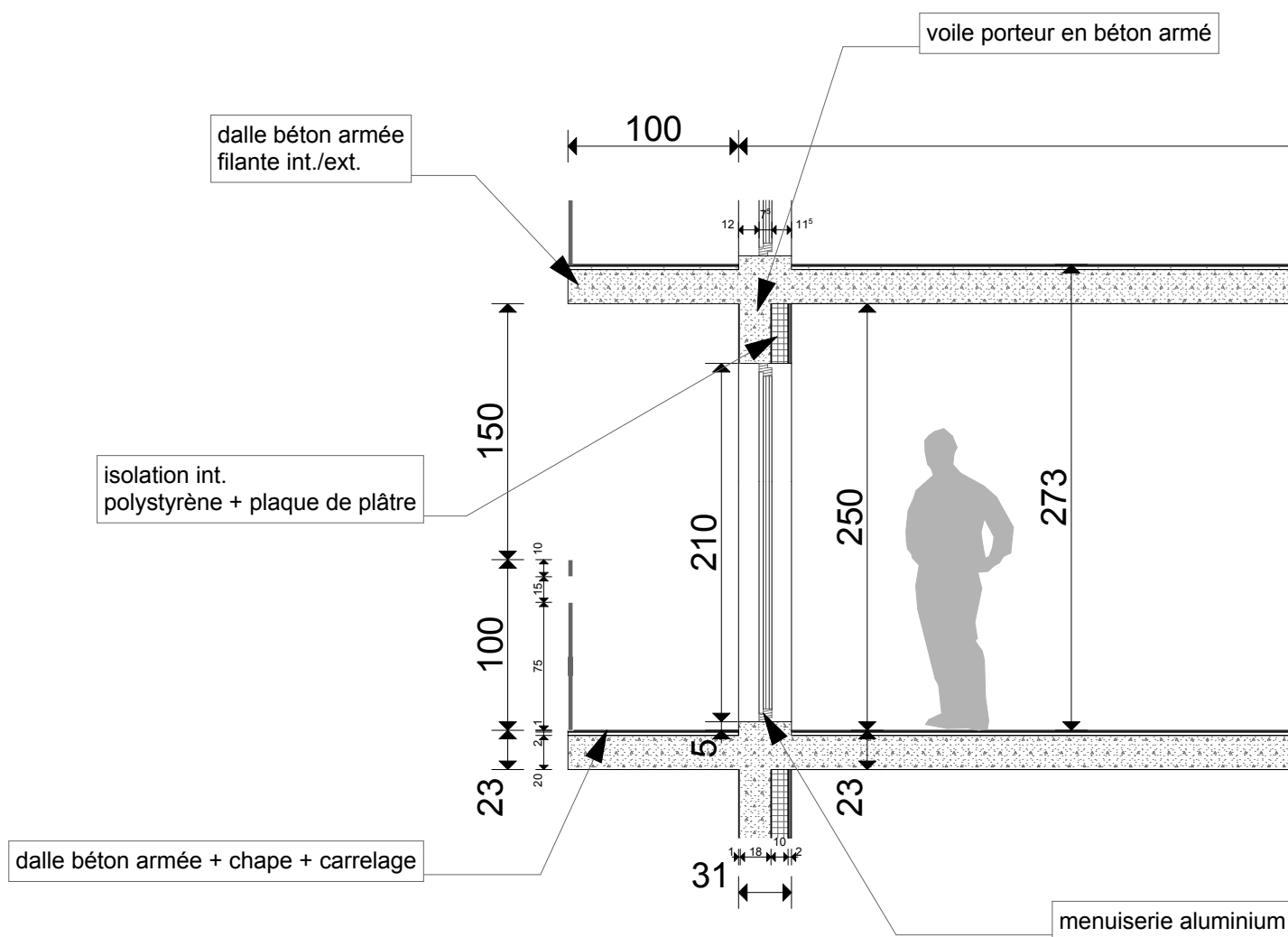


# TPOLOGIE A

## UNE BARRE

# TPOLOGIE A

## LINEAR BUILDING





---

# **T**YPOLOGIE **B** **UNE MAISON**

---

# **T**YPOLOGIE **B** **HOUSE**

---

## **GROUPE #2**

Justine Furet  
Pierre André  
Eléonore Wimart  
Alice Barrois  
Aoife Grogan

---

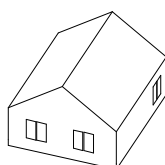
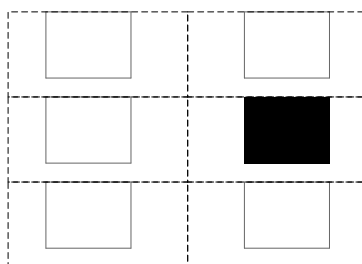
## **GROUPE #5**

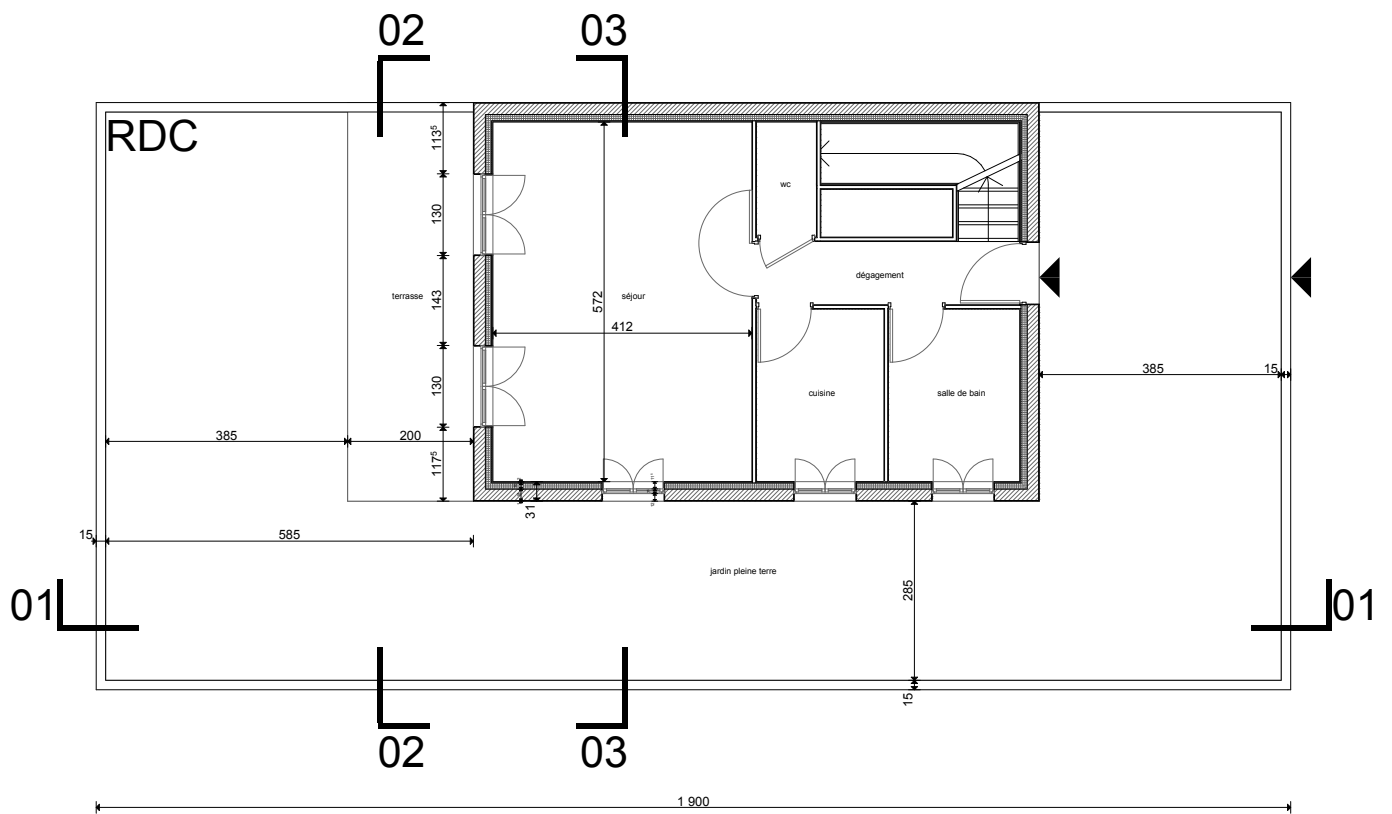
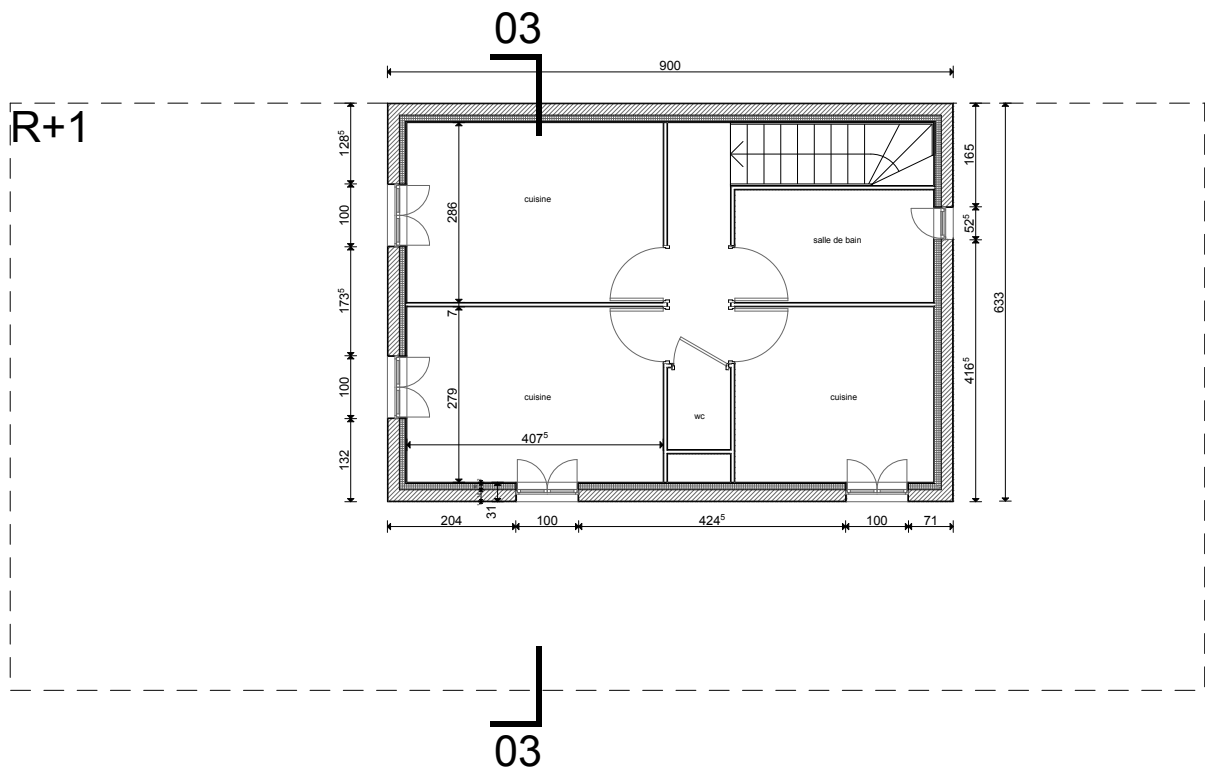
Laura Fontaine  
Gaëlle Louyot  
Céline Dupré  
Shane Morrissey

---

## **GROUPE #8**

Reda Oussnnane  
Enzo Ricciotti  
Audrey Rocher  
Peter O'Brien

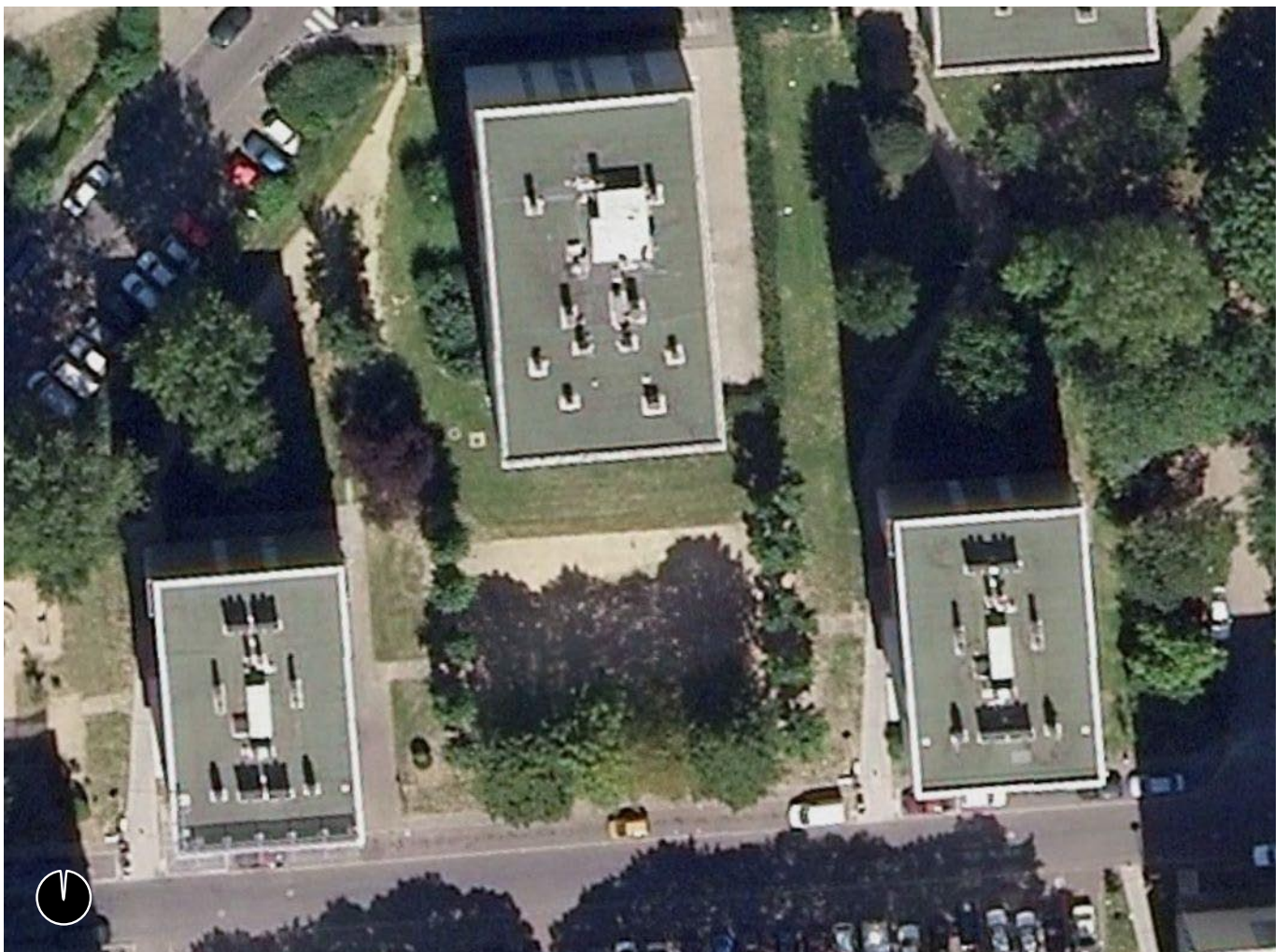




TYPOLOGIE | B  
HOUSE







---

## TYPOLOGIE UNE TOUR

C

---

### GROUPE #3

Tristan Gautard  
Audrey Aquarronne  
Emeline Bonnet  
Cathy Kavanaugh

---

### GROUPE #6

Pierre Marquis  
Amine Sabri  
Cerise Honoré  
Alexandra Pickerell

---

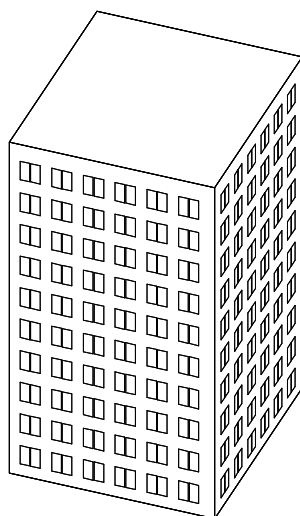
### GROUPE #9

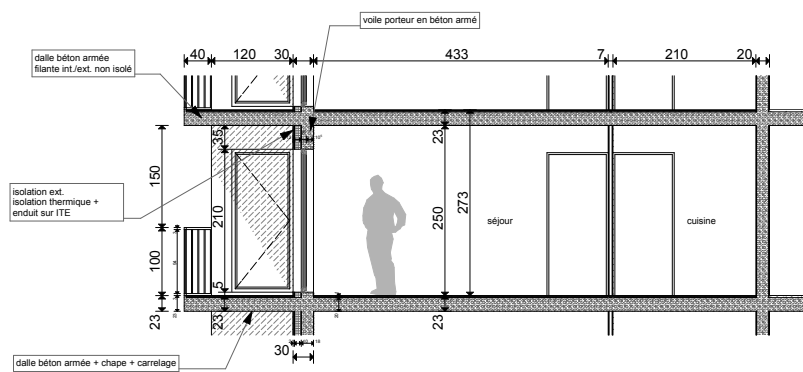
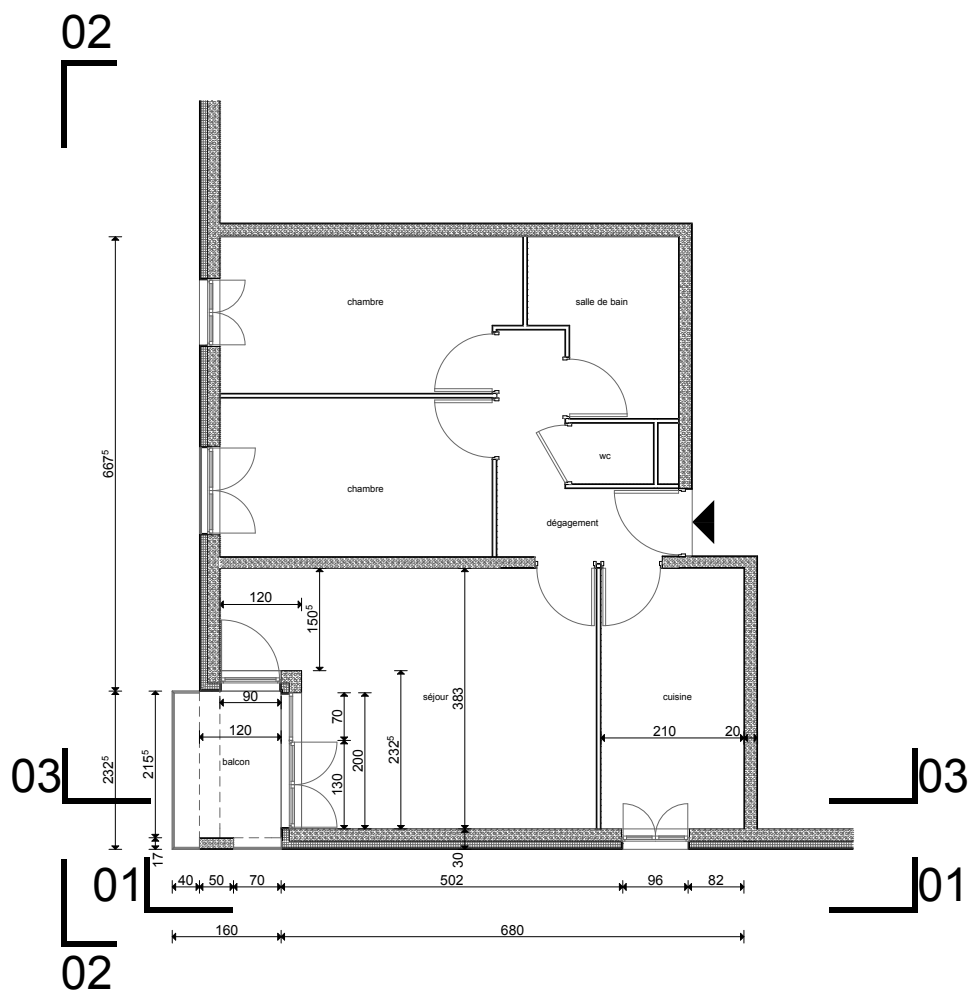
Quentin Perchais  
Adriana Sandulescu  
Sandrine Vignarath  
Nadir Barnat

---

## TYPOLOGIE TOWER

C





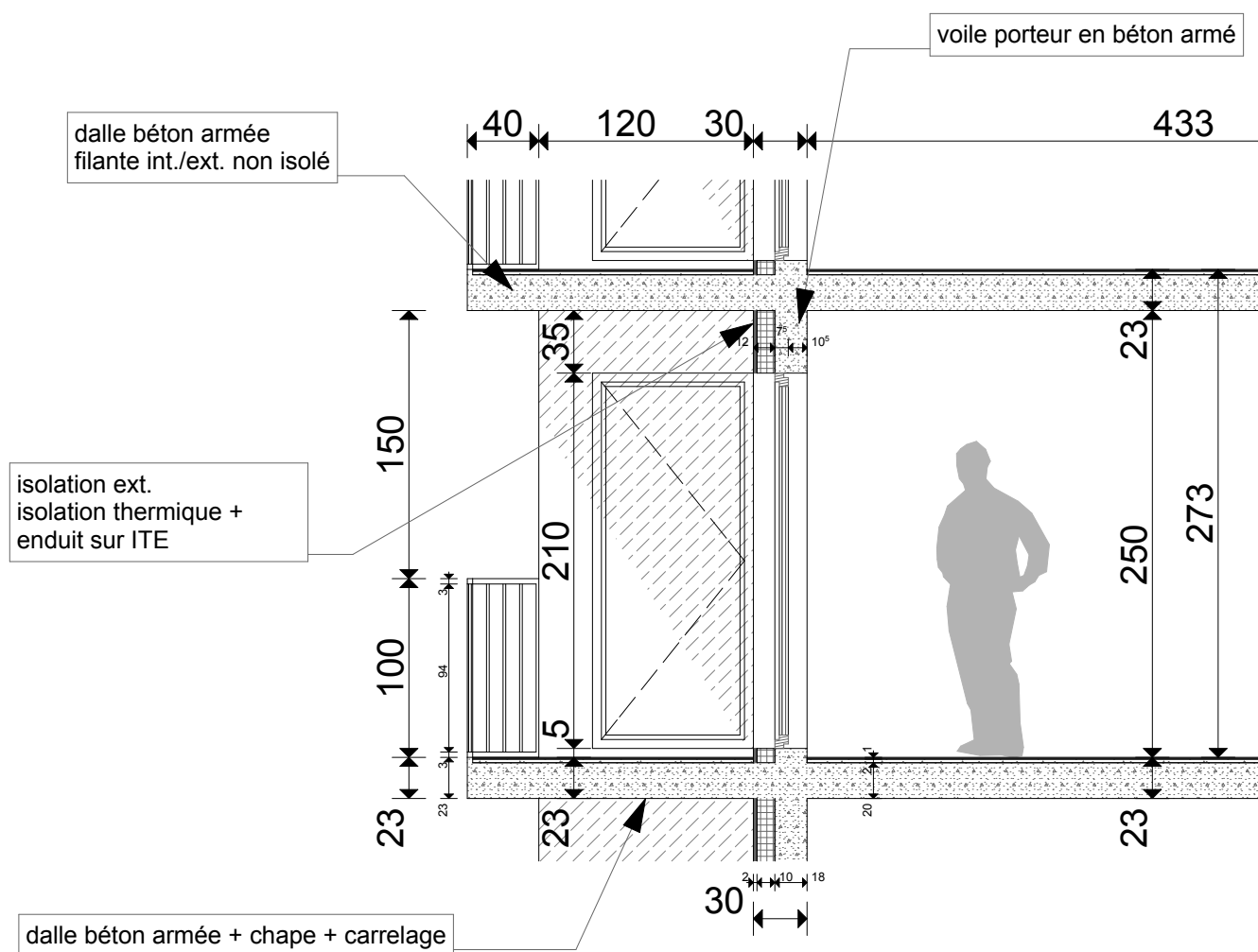


## TYPOLOGIE UNE TOUR

C

## TYPOLOGIE TOWER

C





---

**REHABILITATIONS**

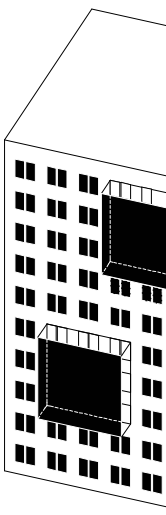
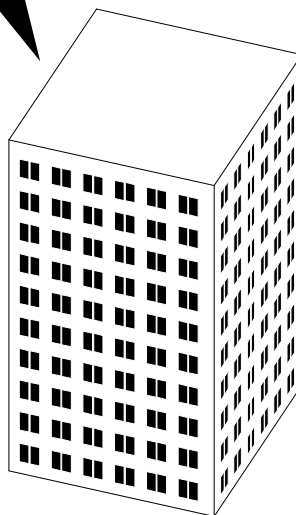
---

**REHABILITATIONS**

---

REHABILITATION **a**

renouvellement des baies  
/ renewal of windows



greffe de modules  
/ transplant modules

REHABILITATION **b**

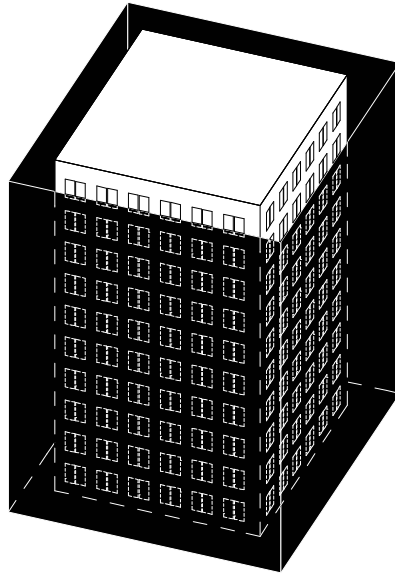
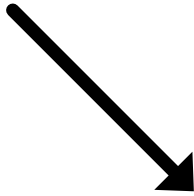
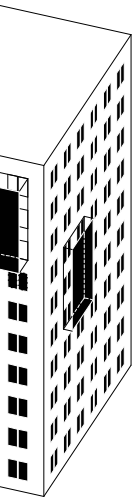
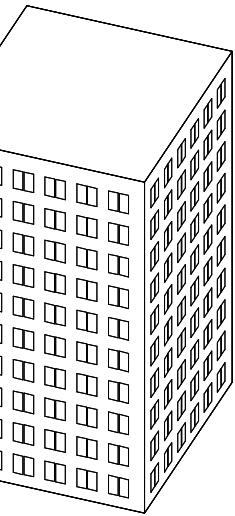
---

## EXEMPLE

TYPOLOGIE

C

tour / tower



REHABILITATION

C

emballage global  
/ overall packaging



---

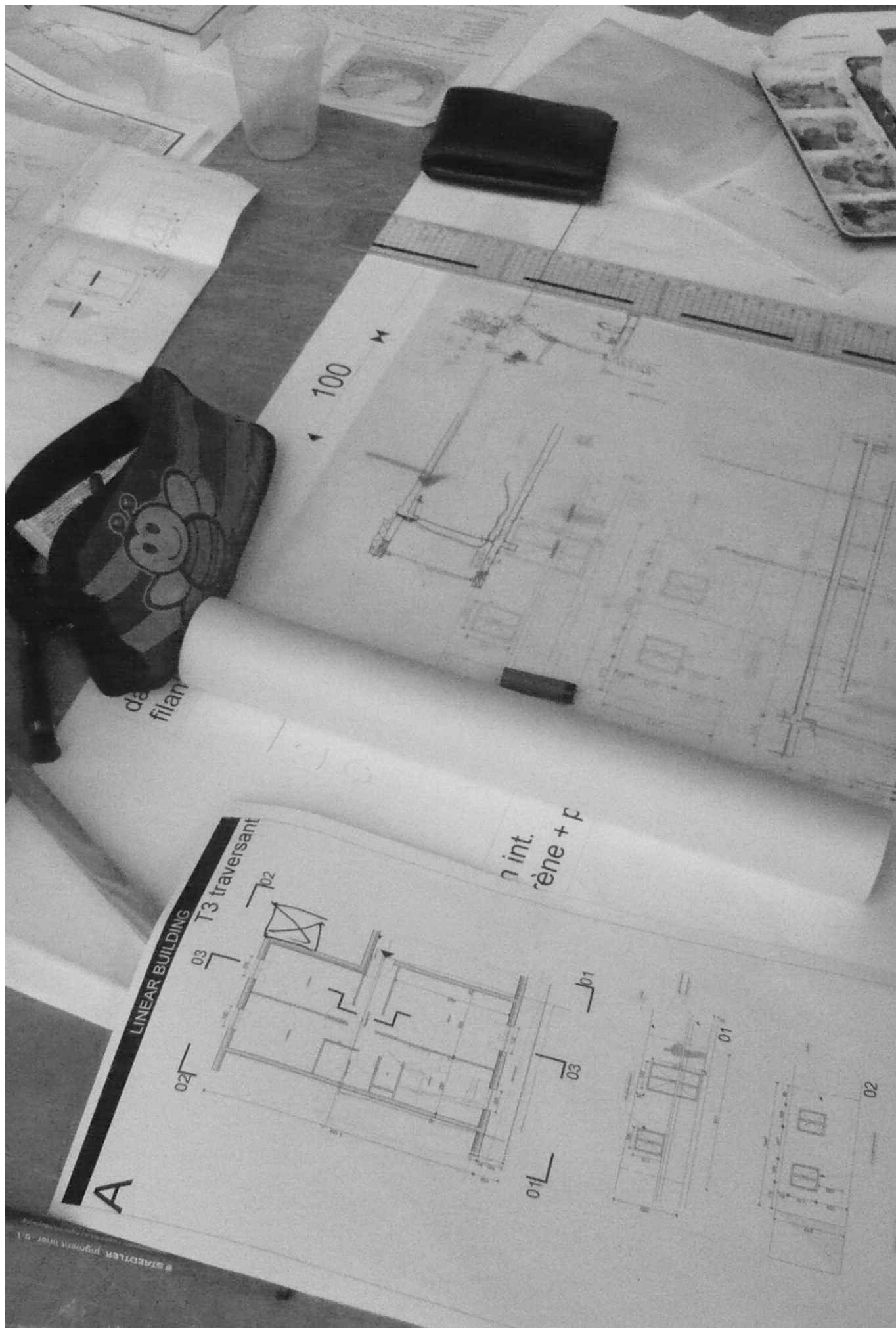
# **PHASE 01**

# **TRAVAIL EN EQUIPE**

---

# **PHASE 01**

# **TEAMWORK**





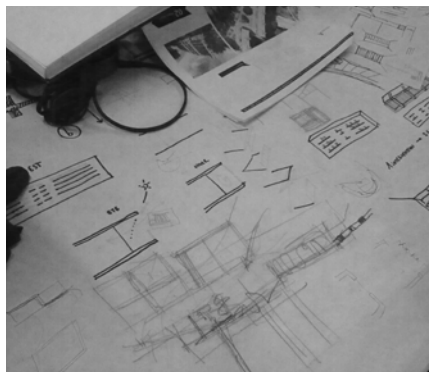
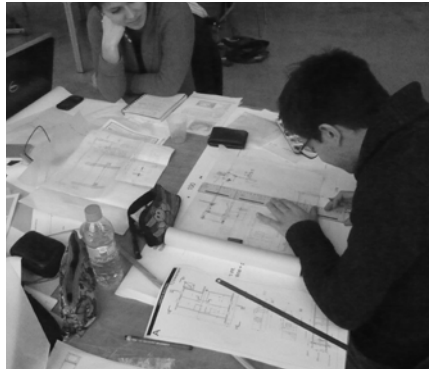
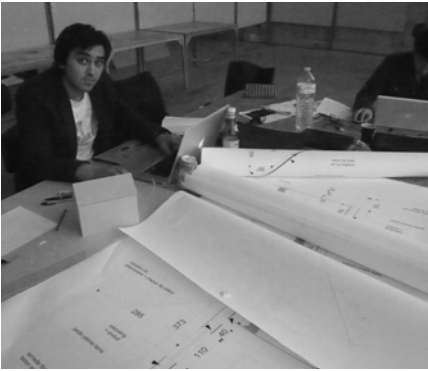
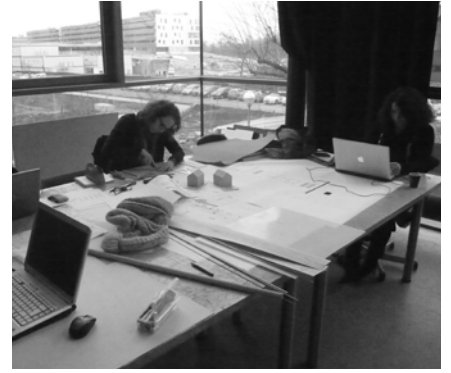
## OBJECTIFS PHASE 01

Au cours de cette phase, les équipes doivent analyser les données climatiques du site en question, formuler plusieurs stratégies climatiques, architecturales et programmatiques.

## OBJECTIVES PHASE 01

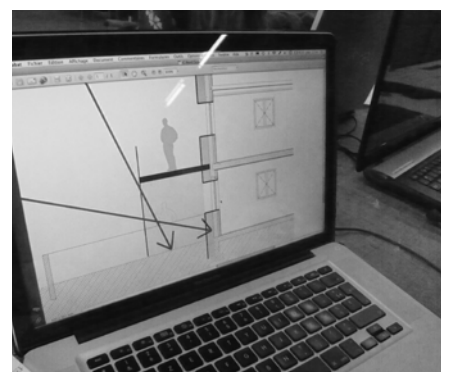
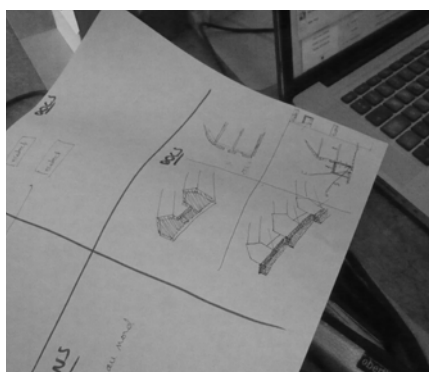
During this phase, the teams must analyse the climatic information for their particular site, then put forward several approaches to climate, architecture and programme.

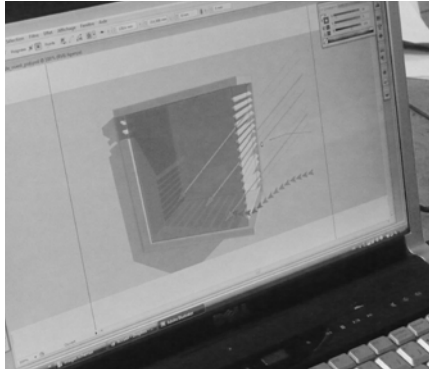
|    | Ve<br>08                 | Sa/Di<br>09/10     | Lu<br>11                 | Ma<br>12                  | Me<br>13               | Je<br>14                 | Ve<br>15                 | Sa/Di<br>16/17   | Lu<br>18           |
|----|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| 9  |                          | journées<br>libres |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 10 | café                     |                    | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe      | travail<br>en équipe   | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe     |  | affichage          |
| 11 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 12 | Lancement                |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 13 |                          |                    | conférence<br>B.Cimerman | présentation<br>étudiants | affichage              |                          | conférence<br>M.Bénard   | école<br>ouverte<br>travail en<br>équipe<br>synthèse<br>impression<br>rendu<br>pré-<br>affichage | rendu<br>définitif |
| 14 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 15 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 16 | correction<br>à la table |                    | correction à<br>la table | correction à<br>la table  | rendu<br>intermédiaire | correction<br>à la table | correction<br>à la table |  |                    |
| 17 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 18 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 19 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  | pot final          |
| 20 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 21 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |



# PHASE 01

DU 08/02/13 AU 13/02/13







---

# **PHASE 02**

# **PRESENTATION**

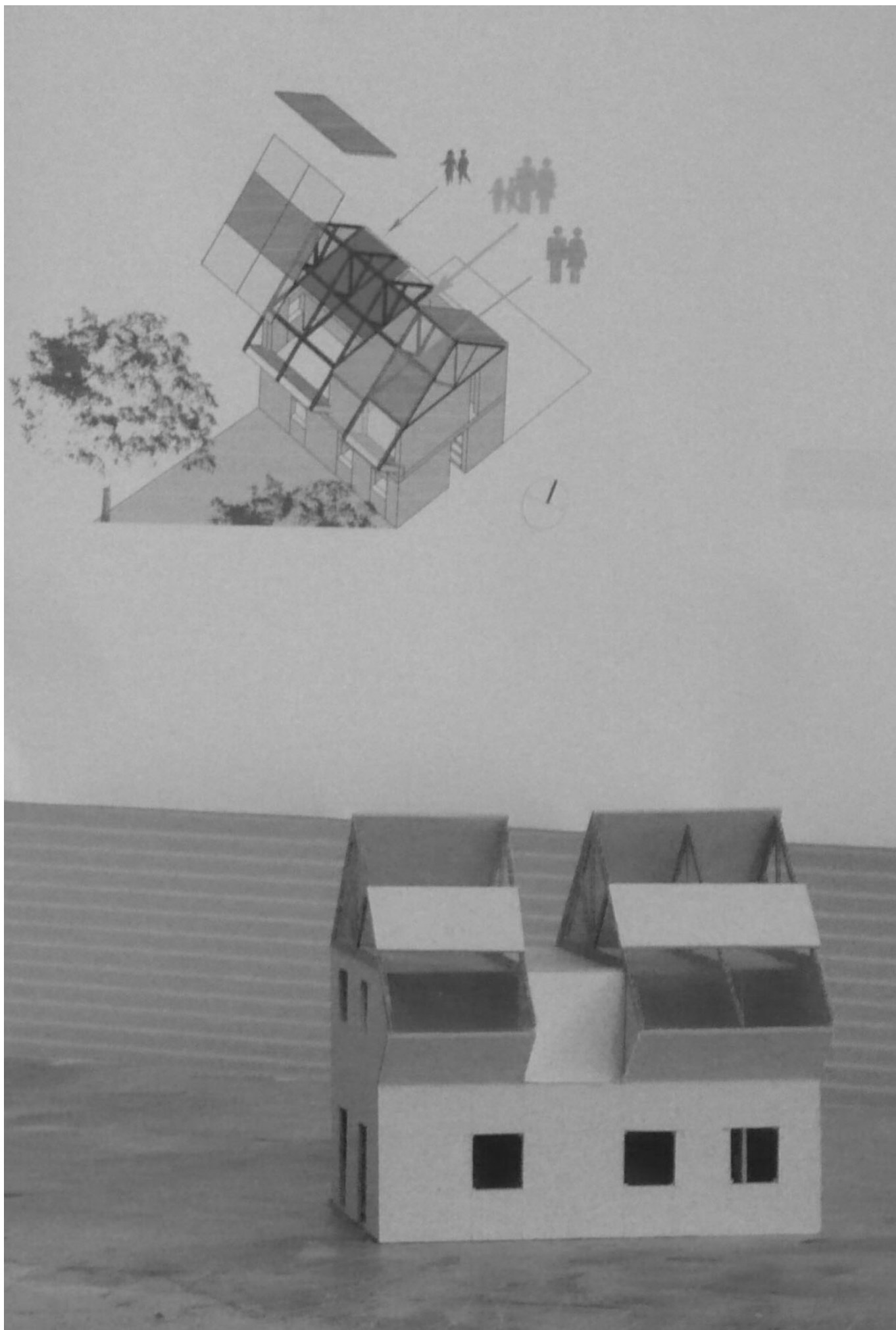
# **INTERMEDIAIRE**

---

# **PHASE 02**

# **INTERMEDIARY**

# **PRESENTATION**



## OBJECTIFS PHASE 02

La présentation intermédiaire permet de choisir une hypothèse de projet parmi plusieurs recherches, de re-définir les objectifs, les attentes, et les limites en vue d'optimiser le travail au cours de la 3ème phase.

Cette présentation inclu généralement les documents suivants, sous forme d'esquisses, de croquis et de dessins :

- croquis au 1/20
- façades au 1/20
- analyse climatique et contextuelle
- stratégie de réponse énergétique et climatique
- maquettes d'étude aux échelles appropriées.

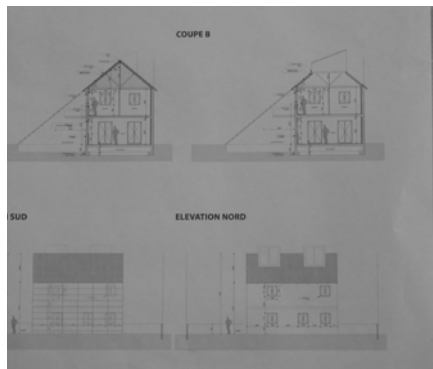
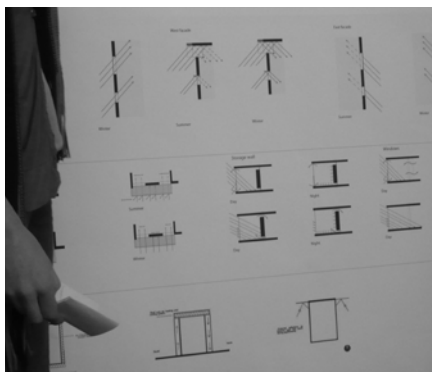
## OBJECTIVES PHASE 02

One hypothetical project is chosen from those advanced during the intermediary presentation; objectives, expectations and limitations are then redefined with a view to optimising phase 03. The documents to be submitted with the presentation are, in the form of drafts, sketches and drawings:

- 1 sketch scale 1/20
- Facades scale 1/20
- Analysis of climate and context
- Corresponding energy and climate strategy
- Models to an appropriate scale

|    | Ve<br>08                 | Sa/Di<br>09/10     | Lu<br>11                 | Ma<br>12                  | Me<br>13               | Je<br>14                 | Ve<br>15                 | Sa/Di<br>16/17   | Lu<br>18           |
|----|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| 9  |                          | journées<br>libres |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 10 | café                     |                    | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe      | travail<br>en équipe   | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe     |  | affichage          |
| 11 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 12 | Lancement                |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 13 |                          |                    | conférence<br>B.Cimerman | présentation<br>étudiants | affichage              |                          | conférence<br>M.Bénard   | école<br>ouverte<br>travail en<br>équipe<br>synthèse<br>impression<br>rendu<br>pré-<br>affichage | rendu<br>définitif |
| 14 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 15 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 16 | correction<br>à la table |                    | correction à<br>la table | correction à<br>la table  | rendu<br>intermédiaire | correction<br>à la table | correction<br>à la table |  |                    |
| 17 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 18 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 19 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  | pot final          |
| 20 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 21 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |

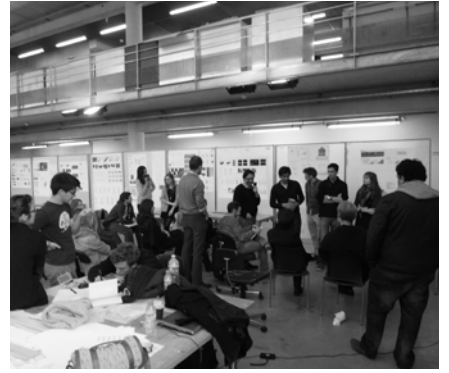




# PHASE 02

LE 13/02/13







---

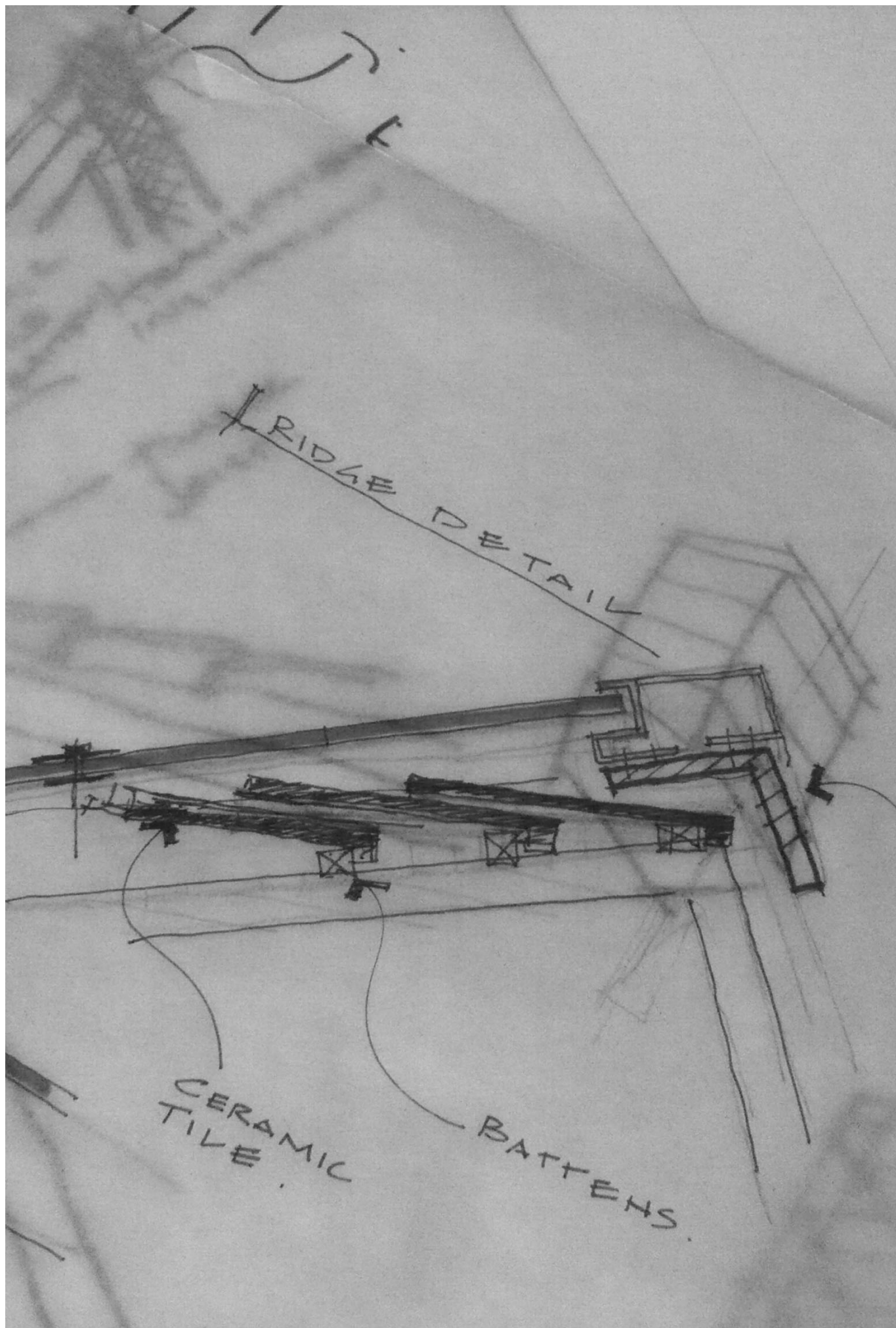
# **PHASE 03**

# **TRAVAIL EN EQUIPE**

---

# **PHASE 03**

# **TEAMWORK**



## OBJECTIFS PHASE 03

La deuxième phase consiste en un développement détaillé du projet choisi durant la présentation intermédiaire. Le projet s'affine d'heure en heures sous formes de plans, coupes, diagramme, détails, maquettes et simulations énergétiques.

Les matériaux de base pour la réalisation des maquettes sont fournis par l'école.

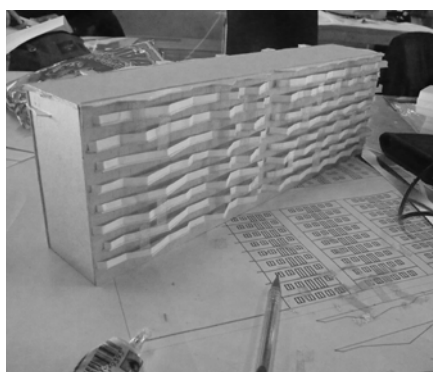
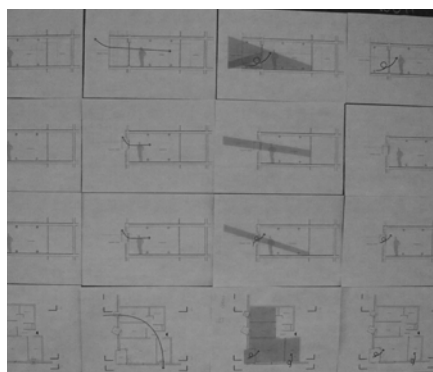
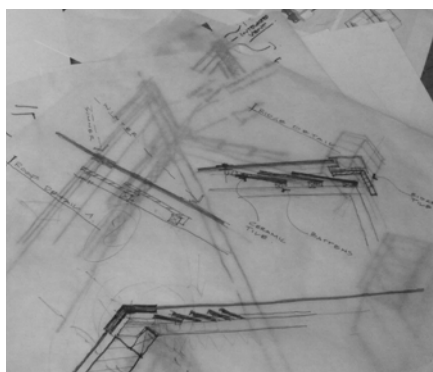
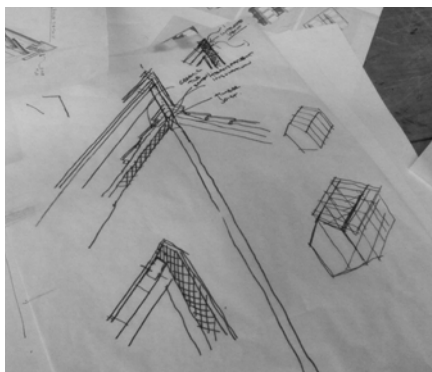
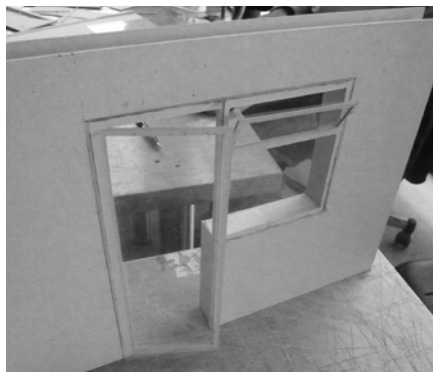
## OBJECTIVES PHASE 03

The third phase is a detailed development of the project chosen from the intermediary presentation. Little by little the project takes shape through plans, sections, diagrams, details, models and energy simulations.

The basic materials needed for the models are provided by the school.

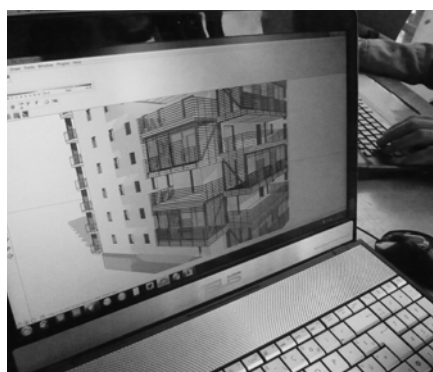
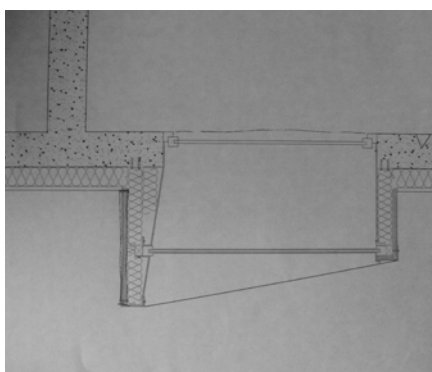
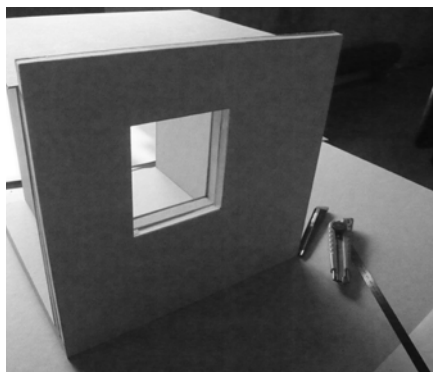
|    | Ve<br>08                 | Sa/Di<br>09/10     | Lu<br>11                 | Ma<br>12                  | Me<br>13               | Je<br>14                 | Ve<br>15                 | Sa/Di<br>16/17   | Lu<br>18           |
|----|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| 9  |                          | journées<br>libres |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 10 | café                     |                    | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe      | travail<br>en équipe   | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe     |  | affichage          |
| 11 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 12 | Lancement                |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 13 |                          |                    | conférence<br>B.Cimernan | présentation<br>étudiants | affichage              |                          | conférence<br>M.Bénard   |  |                    |
| 14 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          | école<br>ouverte<br>travail en<br>équipe<br>synthèse<br>impression<br>rendu<br>pré-<br>affichage |                    |
| 15 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 16 | correction<br>à la table |                    | correction à<br>la table | correction à<br>la table  |                        | correction<br>à la table | correction<br>à la table |  | rendu<br>définitif |
| 17 |                          |                    |                          |                           | rendu<br>intermédiaire |                          |                          |  |                    |
| 18 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 19 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  | pot final          |
| 20 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 21 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |

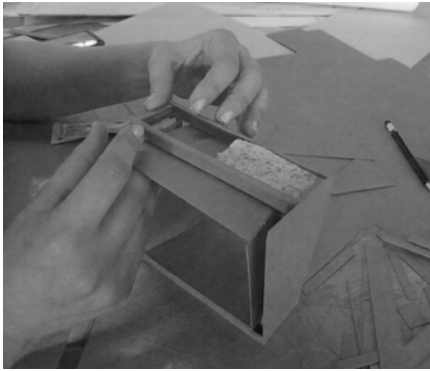
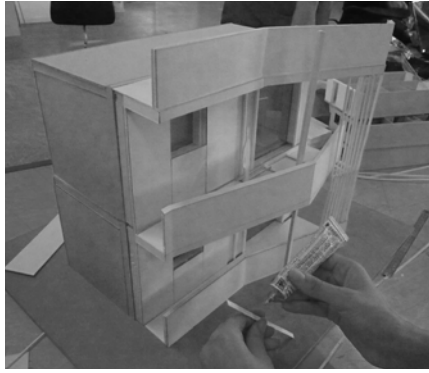
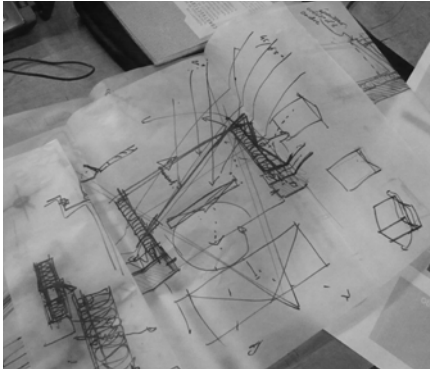




# PHASE 03

DU 14/02/13 AU 18/02/13







---

# **PHASE 04 PRESENTATION FINALE**

---

## **PHASE 04 FINAL PRESENTATION**



## OBJECTIFS PHASE 04

Cette présentation finale consiste à présenter une réponse architecturale soutenu par une stratégie climatique et dans certain cas économique, à un jury composé de professeur et de professionnel. Le support de cette présentation est composé généralement de plusieurs A0, ou A1, permettant ainsi d'exposer des détails à l'échelle 1/1.

Cette présentation comprend généralement les documents suivants:

- coupes au 1/20 ou 1/10 en fonction de la taille du projet.
- élévations extérieures au 1/200 ou au 1/100 en fonction de la taille du projet
- au moins 2 des détails significatifs au 1/5 ou 1/1 selon l'échelle des sections
- croquis perspective interne du module
- esquisse externe perspective vue générale du bâtiment rénové

- maquette physique partielle au 1/20

- Modèle informatique général destiné à permettre des simulations énergétiques par la suite.

perspective

- Exterior rough plans and general view of the renovated building
- Partial model to a scale of 1/20
- Computer model for later energy simulations.

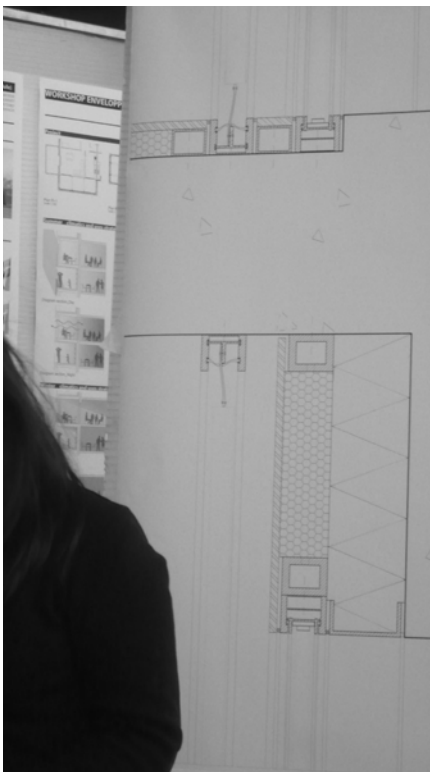
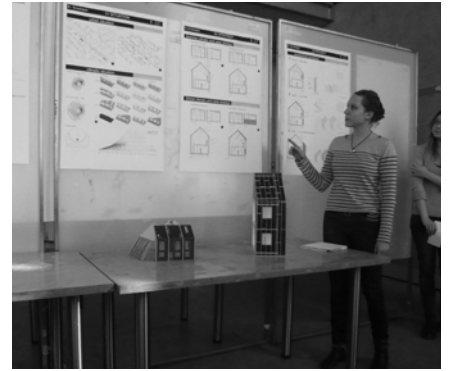
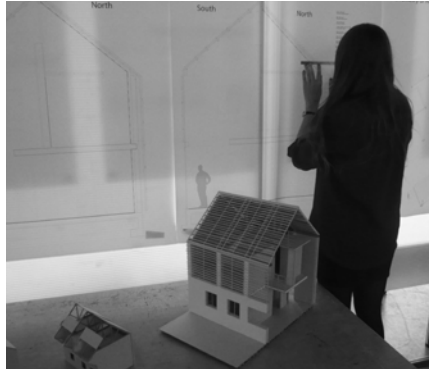
## OBJECTIVES PHASE 04

The final presentation given to a jury of both teacher and professional is an architectural response, including a climate and in some cases an economic strategy. Several A0 or A1 documents presenting details to a scale of 1/1 make up the backbone of the presentation, which will also include;

- Sections to a scale of 1/20 or 1/10 according to the size of the project
- Exterior elevations, scale 1/200 or 1/100 according to the size of the project
- At least 2 important details 1/5 or 1/1 depending on the scale of the cross-sections
- Sketches of the building's interior

|    | Ve<br>08                 | Sa/Di<br>09/10     | Lu<br>11                 | Ma<br>12                  | Me<br>13               | Je<br>14                 | Ve<br>15                 | Sa/Di<br>16/17   | Lu<br>18           |
|----|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| 9  |                          | journées<br>libres |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 10 | café                     |                    | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe      | travail<br>en équipe   | travail<br>en équipe     | travail<br>en équipe     |  | affichage          |
| 11 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 12 | Lancement                |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 13 |                          |                    | conférence<br>B.Cimernan | présentation<br>étudiants | affichage              |                          | conférence<br>M.Bénard   |  |                    |
| 14 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          | école<br>ouverte<br>travail en<br>équipe<br>synthèse<br>impression<br>rendu<br>pré-<br>affichage | rendu<br>définitif |
| 15 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 16 | correction<br>à la table |                    | correction à<br>la table | correction à<br>la table  |                        | correction<br>à la table | correction<br>à la table |  |                    |
| 17 |                          |                    |                          |                           | rendu<br>intermédiaire |                          |                          |  |                    |
| 18 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 19 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  | pot final          |
| 20 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |
| 21 |                          |                    |                          |                           |                        |                          |                          |  |                    |





# PHASE 04

LE 18/02/13





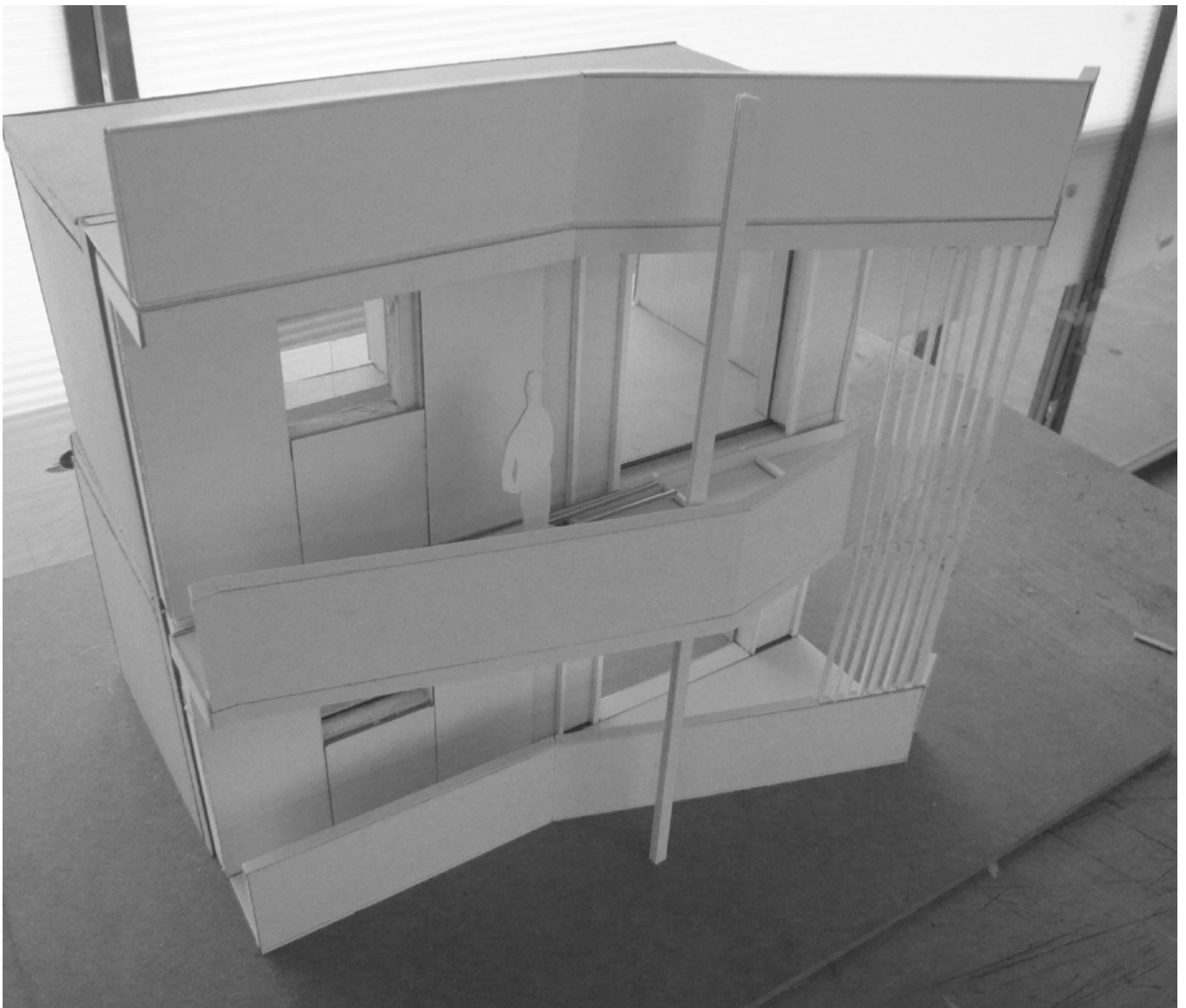
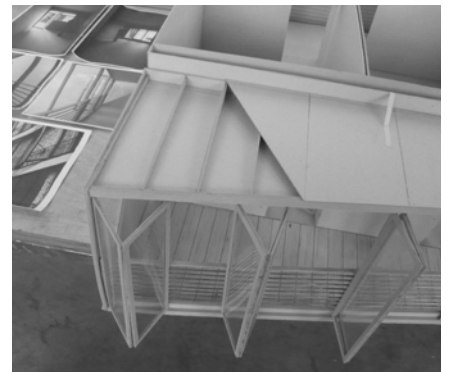
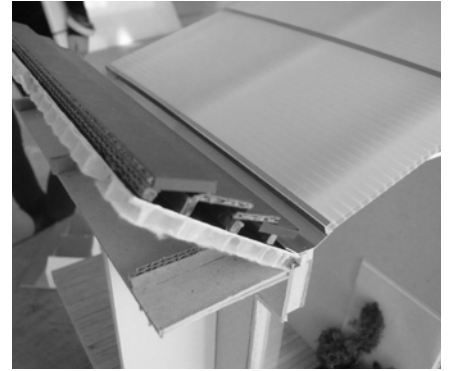


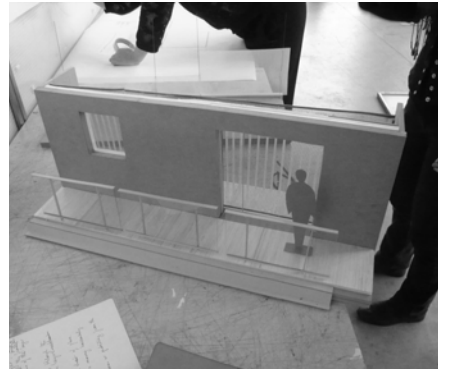
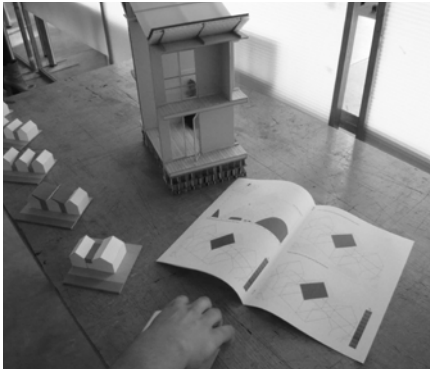
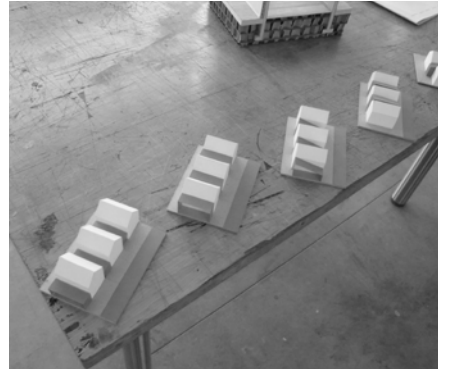
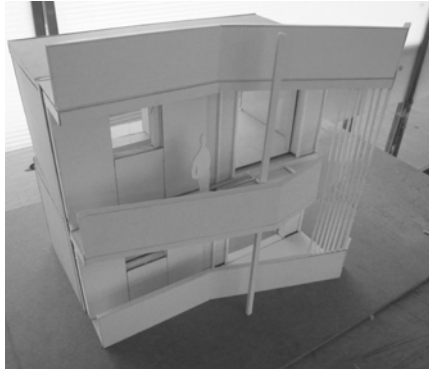
---

**PROJETS**

---

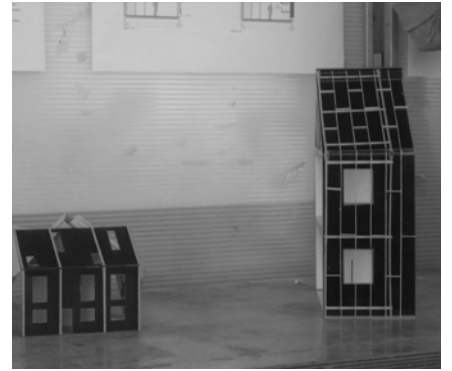
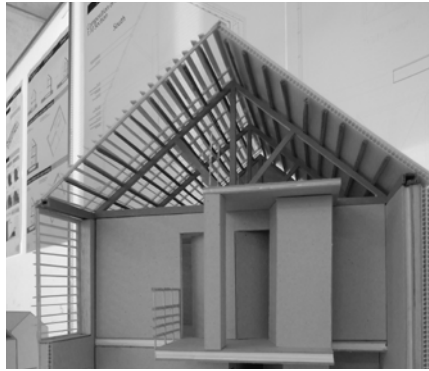
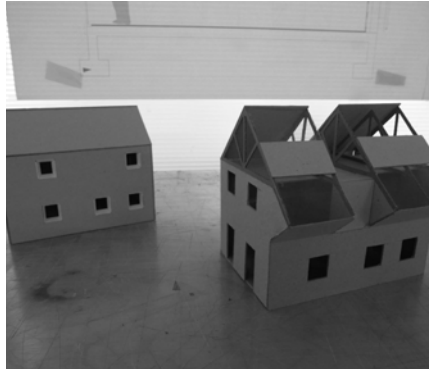
**PROJECTS**











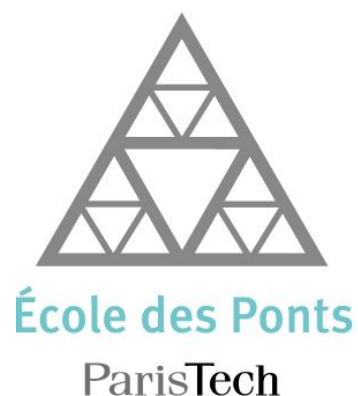


---

## **Annexe 3**

## **Rapport « Bilan énergétique et réhabilitation d'un groupe de bâtiments »**





## Rapport de stage scientifique

Sébastien MALAUSSÈNE

Élève ingénieur, 1<sup>re</sup> année

# Bilan énergétique et réhabilitation d'un groupe de bâtiment

Stage réalisé au sein du laboratoire Navier de l'École des Ponts ParisTech  
6-8 Avenue Blaise Pascal, 77420 Champs-sur-Marne, France

Avril 2013 - Juillet 2013

Maître de stage : M. Olivier Baverel et M. Jean-François Caron  
Tuteur de stage : M. Olivier Baverel et M. Jean-François Caron

# Fiche de synthèse

- Type de stage : Stage Scientifique
- Année académique : 2012/2013
- Auteur (Nom, prénom) : Malaussène, Sébastien
- Formation (1ère année) : 1<sup>re</sup> année ( Concours commun )
- Titre du rapport : Résilience de la réhabilitation énergétique face au changement climatique
- Organisme d'accueil : École des Ponts ParisTech - Laboratoire Navier
- Pays d'accueil : France
- Maître de stage : M. Olivier Baverel et M. Jean-François Caron
- Tuteur de stage : M. Olivier Baverel et M. Jean-François Caron
- Mots-clés caractérisant votre rapport (4 à 5 mots maximum) : Résilience, réhabilitation, changement climatique, énergie.
- Thème École : 07 Climatologie / 30 Énergétique / 34 Environnement



# Remerciements

Je tiens à remercier mes tuteurs de stage Olivier Baverel et Jean-François Caron pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet et qui malgré leur emploi du temps sont parvenus à m'accompagner tout au long de ce stage. Je remercie Mathieu Rivallain pour son aide et ses précieux conseils.

Je remercie également Jean-François Blassel et Guillemette Morel pour l'intérêt qu'ils ont porté sur mon travail et pour leur confiance ainsi que les élèves de l'école d'architecture pour leurs plans.

# Résumé

Les prédictions formulées par le GIEC indique, selon leur scénario le plus pessimiste, un réchauffement climatique de l'ordre de 4°C d'ici 2100. Cette information est à mettre en perspective avec le taux de réhabilitation des bâtiments en France qui n'a pas dépassé les 1.8 % depuis 1990. Il faut alors se demander quel type de réhabilitation est la plus adaptée face au réchauffement climatique.

Dans cette étude nous étudions 4 types de réhabilitation issues de la thèse de Mathieu Rivallain [28], nous travaillons sur 3 types de bâtiments situés dans la dorsale est parisienne. A l'aide de la technique du morphing nous avons produit des fichiers météo décrivant le climat futur et permettant ainsi en s'appuyant sur le logiciel de simulation thermique Pleiade+Comfie d'évaluer l'impact du changement climatique sur les différents types de réhabilitation au travers de plusieurs indicateurs.

Les résultats montre que le niveau d'inconfort dans les bâtiments va connaître une augmentation importante d'ici 2080. Le niveau d'inconfort de l'année de canicule en 2003 sera la moyenne d'ici l'horizon 2050 seulement. Peu des réhabilitations envisagées ont permis une réduction significative de l'inconfort.

**Mots clés :** Energétique des bâtiments, changement climatique, résilience, réhabilitation des bâtiments.

# Abstract

Predictions of the IPCC points, according to their most pessimistic scenario, to a rise of 4°C for the temperature. However the rehabilitation rate of buildings in France is very slow we have to decide which rehabilitation strategy is the best for buildings to increase thermal resilience to climate change.

In this study we used 4 types of rehabilitation strategy from the thesis of Mathieu Rivallain, we worked with 3 types of building from the east of Paris. Using the morphing method to produce futur hourly weather file and the dynamical simulation software Pleiade+Comfie, we assessed the impact of climate change on rehabilitation strategies through several indicators.

The results showed that incomfort rate will largely increase by 2080, incomfort level of the hot summer year 2003 will be on average by 2050. There was a few rehabilitation strategies that manage to significantly reduce incomfort rate.

**Keywords :** Climate change, energetic rehabilitation of buildings, resilience.

# Contents

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Fiche de synthèse</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Remerciements</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Résumé</b>   | <b>4</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>5</b>  |
| <b>List of Figures</b>  | <b>8</b>  |
| <b>List of Tables</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1 Introduction</b>   | <b>10</b> |
| 1.1 The World Energetic Situation . . . . .   | 10        |
| 1.2 The State of the French Real Estate Park . . . . .  | 10        |
| 1.3 Building Resilience to Climate Change . . . . .   | 11        |
| 1.4 Assessing the Resilience <sup>1</sup> of Energetic Rehabilitation to Climate Change . . . . . | 12        |
| <b>2 Methodology and Approach</b>   | <b>14</b> |
| 2.1 Presentation of the Izuba Energy software package . . . . .                                   | 14        |
| 2.2 Development and selection of hourly weather files . . . . .                                   | 15        |
| 2.2.1 Selection of the locations . . . . .  | 15        |
| 2.2.2 Development of future hourly weather files . . . . .  | 16        |
| 2.3 The Pleiade+Comfie inputs . . . . .   | 18        |
| 2.3.1 The three building morphologies . . . . .   | 18        |
| 2.3.2 Wall compositions . . . . .   | 18        |
| 2.3.3 Rehabilitation strategies . . . . .   | 20        |
| 2.3.4 Scenarios and equipment . . . . .   | 21        |
| 2.3.5 Simulations on Pleiade+Comfie . . . . .   | 23        |

---

<sup>1</sup>[12, 1]

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3 Results and Discussion</b>  | <b>24</b> |
| 3.1 Indicator choices . . . . .  | 24        |
| 3.2 Results, Analysis and Discussion . . . . .   | 26        |
| 3.2.1 Evolution of the consumption and the discomfort rate<br>in function of the period and the morphology for reha-<br>bilitation 0,A,B,C . . . . . | 27        |
| 3.2.2 Evolution of different discomfort criteria in function of<br>the climate for each morphology (rehabilitation 0) . . .                          | 29        |
| 3.2.3 Evolution of the adaptive discomfort in function of the<br>rehabilitation and the climate for each morphology . .                              | 31        |
| <b>4 Conclusion and personal contribution</b>  | <b>33</b> |
| 4.1 Conclusion . . . . .   | 33        |
| 4.2 Personal contribution . . . . .  | 34        |
| <b>Annexe A</b>  | <b>35</b> |
| <b>Annexe B</b>  | <b>36</b> |
| <b>Annexe C</b>  | <b>37</b> |
| <b>Bibliography</b>  | <b>38</b> |

# List of Figures

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Evolution of the rehabilitation rate in France and Germany . .   | 11 |
| 2.1 | Tower, House and Block . . . . .   | 18 |
| 2.2 | The Pareto fronts between investment cost and primary energy consumption . . . . .   | 20 |
| 2.3 | Evolution of the efficiency of the boiler in function of the loading rate . . . . .  | 22 |
| 3.1 | Evolution of the consumption and the discomfort rate in function of the period and the morphology for rehabilitation 0,A,B and C . . . . . | 27 |
| 3.2 | Evolution of different discomfort criteria in function of the climate for each morphology (rehabilitation 0) . . . . .                     | 29 |
| 3.3 | Evolution of the adaptive discomfort in function of the rehabilitation and the climate for each morphology . . . . .                       | 31 |

# List of Tables

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Climate Classification . . . . .   | 16 |
| 2.2 | Summary of the chosen locations, dates and types . . . . .   | 17 |
| 2.3 | Wall compositions . . . . .  | 19 |
| 2.4 | List of the different rehabilitation strategies . . . . .  | 21 |
| 3.1 | Suggested applicability for the categories and their associated<br>acceptable temperature ranges . . . . . | 25 |
| 3.2 | Summary of the different indicators with their unit . . . . .  | 26 |



# Chapter 1

## Introduction

### 1.1 The World Energetic Situation

Today the humanity would have need 1.2 Earth to live in a sustainable way [20]. In Limit to Growth, Donella Meadows argued that we use resources faster than we should and that we have already overstep the Earth capacity to provide a sustainable life to Men. Moreover this tendency will maybe worsen in the future years because the world energy needs will be multiplied by a factor between 1.5 and 3 by 2050 and between 2 and 5 by 2100 [4, 23].

However the humanity seems increasingly preoccupied by environmental issues (lots of countries have created a Department of Ecology) and we can still improve our energetic performances in many fields such as the building sector [29].

### 1.2 The State of the French Real Estate Park

The French building sector has already made very important progresses since 1973. At the beginning these improvements were simply due to simple recommended acts like switching off the lights when you quit a room. These simple habits resulted in energy savings until the mid 80's[8]. But at the same time, the growth of the real estate French park made these simple habits less effectives. As a result, the French government was forced to enhance the energy efficiency of buildings. This policy led to multiple thermal regulations (RT2005, RT2012) and also to the apparition of the factor 4 in 2005 which wants to divide building emissions by four until 2050.

Yet in 2011 the building sector still had an important energetic impact. It was responsible for 21% of total CO2 emissions in France and for 44% of the total consumption of final energy [4]. Another important fact is that the

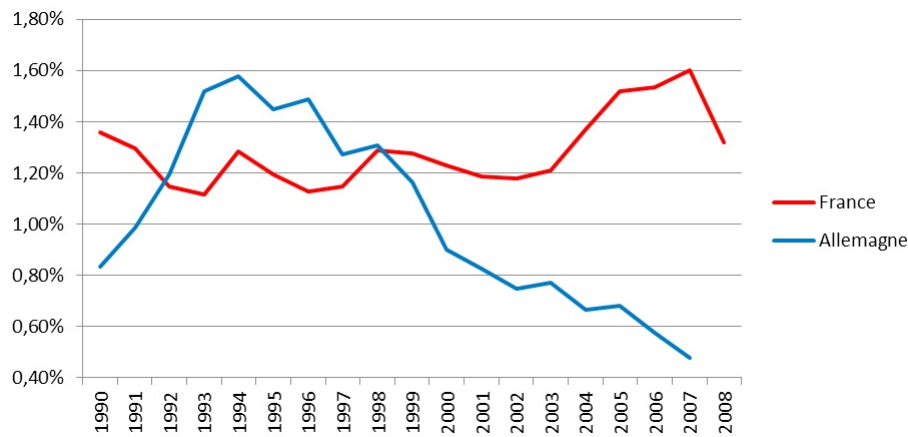


Figure 1.1: *Evolution of the rehabilitation rate in France and Germany*

rehabilitation rate of the park is very slow as shown on Figure 1.1 (??) so it is important to develop effective rehabilitation strategies and to build new buildings with high energetic efficiency.

### 1.3 Building Resilience to Climate Change

Predictions of the world's climate from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) point to a warmer world. Under the A1F1<sup>1</sup> scenario mid-latitude mean temperature would rise by approximately 4° [25] by 2100. Thus it is important to know what will be the response of buildings to this increase of temperatures. It is also important to evaluate the efficiency of different rehabilitation strategies to make buildings more resilient to climate change. Many works that stress the effect of climate change on the building sector can be found.

In Hong Kong, A.L.S Chan used the morphing method to produce future hourly weather data for thermal building simulation. This method proposed by Belcher et al. [5] is a series of shifting and linear stretching combining current weather data and emission scenario. It enables to develop future weather data that encapsulate the average climate change while preserving the realistic variability of the local weather. After using these data in the EnergyPlus simulation software, he discovered that climate change will be responsible for a rise in the energy consumption of cooling system that will lie between 2.6% and 14.3% for the tertiary sector and between 3.7% and 24% for the residential sector.

<sup>1</sup>The most pessimistic : rapid growth with intensive use of fossil energy

Another study by D. Coley et al. [9] showed, by using the morphing method to create future weather data, that the relationship between a rise in external temperature and the thermal response of a building was linear. To produce this result they tested over 400 different combinations of future weather, architecture, ventilation strategy, ventilation type, thermal mass, glazing, U-value and building use (house, school, apartment, or office). Then they measured the maximal internal temperature in function of the external  $\delta T$ . They obtained linear relationships and thus created a constant of proportionality named "Climate Change Amplification Coefficient".

In Australia, X. Wang et al. [32] also used the morphing method and the software AccuRate to evaluate what they named the Average Emission Reduction Carbon. They wanted to know the percentage of reduction of CO<sub>2</sub> emission that could be maintain under a changing climate compared to the reduction that would have been realised under a stationary climate. Their conclusion was that carbon emission reduction scheme should take into account climate change because as global warming increases the ERC is deteriorating.

In England, K.J. Lomas et al. [17] calculate the increase in the number of day that will overstep a comfort criterion. They used the morphing method to produce futur hourly weather file and the BSEN 15215 <sup>2</sup> comfort criterion which is based on the idea that humans have the capacity to adapt to temperature variation. Thus with this criterion you can calculate daily temperature range into which the internal temperature of the building should lie. They found that the upper limit of this range will increase by 2°C by 2080 and that the number of hours above 28°C will increase from 4 in 2010 to 126 in 2080.

## 1.4 Assessing the Resilience<sup>3</sup> of Energetic Rehabilitation to Climate Change

The aim of this paper is to assess the impact of climate change on different parameters (internal temperature, heating needs, heating consumption, and comfort level) that describe the behaviour of a building. We want to assess how these parameters will change if the weather will become warmer but also if it will become colder. We will use different types of rehabilitation strategy to asses their efficiency and we will also use different type of building morphology (tower, house, and block) in order to be able to assess its role

---

<sup>2</sup>Equivalent to NFEN 15215

<sup>3</sup>[12, 1]

on the variation of these parameters.

This work is part of a research program named "Ignit Mutat Res" and wants to be a complement to a PhD thesis written by Mathieu Rivallain [28] who worked on the subject of the selection of rehabilitation program on buildings. We will take several elements of the thesis to help us in our work that will be detailed later.

In order to accomplish our objectives we will first select hourly weather data for different locations and use the morphing method to produce future hourly weather file. Then we will use these files in a thermal simulation software named Pleiade+Comfie [26] developed by Mines ParisTech with the Izuba Energie firm to assess the different parameters of the buildings. The different morphologies that will be used here were given by students in the ENSAVT who worked on a similar subject. They wanted to assess the impact of different morphologic rehabilitation on the energetic consumption of buildings.

First we will present our method describing how we produce the weather files and presenting the simulation software. We will also describe our inputs for Pleiade+comfie (scenario, wall compositions). Then we will present our results and make some conclusions on them.

# Chapter 2

## Methodology and Approach

### 2.1 Presentation of the Izuba Energy software package

In this study we use multiple software of the Izuba Energy package to make thermal building simulations.

**Alcyone** With this software you draw the building general structure (internal and external walls, rooftop, floors). You have also to precise the standard composition for each element with the colour of the surfaces and the thermal bridges. You can also define the different thermal zones that separate the building which is of great use when you have a building with several buildings to know the temperature of specific floors (the last one for example). Then you can convert the file to Pleiade+Comfie input file.

**Pleiade+Comfie** This software is at the core of the simulation. Here you can define the different compositions that will be use in the different structures that compose the building. For each composition you have to precise the thickness of each material with their density, their specific heat and their thermal coefficient. The software makes users enable to switch from a composition to another very easily which is important when you have to assess several rehabilitation strategies.

In Pleiade+Comfie you also have to precise the different hourly scenarios that define the use of buildings. You have to compute five scenarios : occultation, airing, occupancy, temperature order and heat generated by apparatuses.

Then you select an hourly weather file and you launch the simulation.

**MeteoCalc** This software allows us to convert weather file of different formats (TMY, EPW, ...) to the good format used in Pleiade+Comfie which is TRY (Typical Reference Year).

## 2.2 Development and selection of hourly weather files

### 2.2.1 Selection of the locations

Our study is linked with a project research proposed by Jean-François Blassel within the "Ignis Mutat Res" research program. This project is focused on the Parisian east dorsal and wants to study her energetic resilience. Thus we selected a relevant location to describe the climate of the Parisian east dorsal.

The U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy provides weather data for more than 2100 locations throughout the world. These data are free of charge and are available on the web <sup>1</sup>. In France the best location proposed to describe our climate is Paris Orly. The file was a "typical" weather file and was developed by the International Weather for Energy Calculations (IWECC) [3]. The IWECC is the result of an ASHRAE research project.

These typical weather files are hourly weather data for 1-year period included information about the solar radiation <sup>2</sup>, the temperature, the relative humidity. They are generated by realising a collation of weather data in order to respect the realistic variability of the local weather. The files available on the EnergyPlus website are derived from up to 18 years of hourly weather data originally archived at the U. S. National Climatic Data Centre and were on EPW format. We selected this type of file because MeteoCalc is able to convert it to the good format for Pleiade+Comfie and also because it was the good format to operate morphing as we will see later.

To assess the resilience we also needed other climates that were colder or warmer in order to simulate different climates that would potentially become Paris' climate. We used the ASHRAE classification to select the other climates [2]. The classification is composed of a number (1 to 7) that describe the average temperature followed by a letter (A, B, C) that describe the type of climate (Humid, Dry, Marine).

We can see in Table (2.1) that Nice and Berlin are respectively warmer

<sup>1</sup>[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)

<sup>2</sup>At least global horizontal radiation and diffuse horizontal radiation

| Location | Classification | Description   |
|----------|----------------|---------------|
| Orly     | 4A             | Mixed - Humid |
| Nice     | 3C             | Warm - Marine |
| Berlin   | 5C             | Cool - Marine |

Table 2.1: *Climate Classification*

and colder than the Orly climate. However these cities are not very far away from each other so their climates are not too different that's why we selected these two other locations.

We also selected a Design Summer Year (DSY) for our simulations which is also a hourly weather file for a 1-year period in which summer has been transform to represent the variability and extreme temperatures of a hot summer. We used this file in order to assess the impact of a particularly hot summer on internal temperature variation in buildings. During the heat stroke in 2003 temperature were 3.5 °C greater on average than the normal seasonal temperatures and this summer is considered is evaluated as the warmest since at least 1500 [18]. Thus we took the weather of Montreuil in 2003 because it is a city located in the east of Paris.

### 2.2.2 Development of future hourly weather files

Using the morphing method [5] we also created future hourly weather file for the Paris Orly location. The morphing method is a series of shifting (2.1), linear stretching (2.2) and a combination of both (2.3) combining current weather data and emission scenario :

$$(2.1) \quad x = x_0 + \Delta x_m$$

$$(2.2) \quad x = \alpha_m x_0$$

$$(2.3) \quad x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m(x_0 - x_m)$$

The result is an hourly weather file that encapsulates climate change while preserving the realistic variability.

To operate morphing on our weather file, we used an Excel software developed by the University of Southampton named "CCWorldWeather-Gen". It allows us to morph weather files in the EPW format with a climate change scenario produced by the Intergovernmental Panel on Climate CHange (IPCC) [25]. Indeed the IPCC published in 2000 the Special Report on Emissions Scenarios (SRES) [21] in which four scenario families were described (A1, A2, B1, B2). These families answer to different hypothesis



concerning world economic development or world energy-use. The SRES was still used in the latest assessment report of the IPCC published in 2007. These assessment reports have the purpose to give scientific and socio-economic information about climate change in the world.

On CCWorldWeather we used the A2 scenario to produce morphed files. This scenario describes a heterogeneous and regionalised world with the following hypotheses :

- Regionally oriented economic development
- Continuously increasing population
- Independently operating, self-reliant nations

Under these hypotheses global warming would range between 2.0 and 5.4 °C. The data used in CCWorldWeather that describes the climate change scenario were free of charge and available on the IPCC website<sup>3</sup>. We used the data produce by the Hadley Centre for the Third Assessment Report which have a spatial resolution of about 417Km x 278Km [27]. CCWorld-GenWeather automatically selects the nearest point among the 4 nearest points of the grid. For our location the point was at approximately 20kms.

Thus we produced morphed files of the Orly weather under the A2 scenario for 2050 and 2080. These files were of great use to assess the impact of climate change on building performances. The last task consisted in converting all these files to the good format<sup>4</sup> for Pleiade+Comfie with MeteoCalc.

| Locations | Date | Type                         |
|-----------|------|------------------------------|
|           | 2012 | Typical Reference Year (TRY) |
| Orly      | 2050 | Morphed TRY                  |
|           | 2080 | Morphed TRY                  |
| Nice      | 2012 | TRY                          |
| Berlin    | 2012 | TRY                          |
| Montreuil | 2003 | DSY (Equivalent to TRY)      |

Table 2.2: *Summary of the chosen locations, dates and types*

<sup>3</sup>[http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3\\_download.html](http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3_download.html)

<sup>4</sup>The good format is Typical Reference Year (.try)

## 2.3 The Pleiade+Comfie inputs

### 2.3.1 The three building morphologies

During our work we exchanged information with students of ENSAVT because they were working on a similar subject under the same research program "Ignis Mutat Res". They wanted to assess the impact of the morphology and the typology on the energy consumption of buildings. Thus we decided to also take into account the impact of the morphology at a softer scale. We chose three types of morphologies that describe the major part of the entire existing real estate park : the tower, the simple house, the block.

All these buildings were chosen in the Parisian area to match with the principal climate chosen (Orly). We chose the following buildings (2.3.1) :

**Tower** The chosen tower is located in Sevrans. Her plan was given by Cecile Martinier a student in the ENSAVT that was working on the project described earlier. This tower has a width of 20m and a length of 22m, her height is of 47m. This is a very particular tower because her compactness is very low (0,21). So we can assume that it will have a very good thermal behavior.

**House** The chosen house is located in Montfermeil. Her plan was given by Paul Covillaud also a student in the ENSAVT. Her width is of 9m and her length of 9,30m, her height is of 5,2m. Her compactness is 0,63 which is a quite good compactness ( $<0,7$ ).

**Block** The chosen block is located in Grimaud. The plan came from the thesis[28] of Mathieu Rivallain where it was fully described. His width is of 10m and his length of 16m, his height is of 11,5m. His compactness is 0,39.

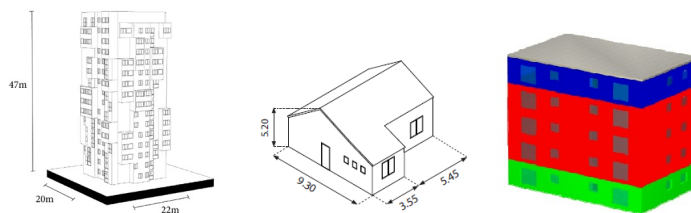


Figure 2.1: Tower, House and Block

### 2.3.2 Wall compositions

Before rehabilitation there are no specific thermal isolation strategies in the wall compositions. All these materials are already saved in Pleiade+Comfie

with the following information :

- Thickness of the material [mm] ;
- Thermal conductivity of the material [W/(m.K)] ;
- Density of the material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;
- Specific heat [J/(kg.K)] ;
- Thermal resistance of the building component [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ].

The different compositions are sum-up in the following table.

| Morphology        | Block/Tower           | House                     |
|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| Lower floor (mm)  | Heavy concrete : 150  | Extruded polystyrene : 50 |
|                   | Mortar : 50           | Heavy Concrete : 160      |
|                   | Tiles : 20            | Mortar : 50<br>Tiles : 20 |
| Normal floor (mm) | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |
|                   | Heavy Concrete : 150  | Air knife : 50            |
|                   | Mortar : 50           | Heavy concrete : 160      |
|                   | Tiles : 10            | Mortar : 50<br>Tiles : 10 |
| Rooftop           | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |
|                   | Heavy concrete : 150  | Air knife : 50            |
|                   | Pure bitumen : 4      | Heavy concrete : 160      |
|                   | Limestone farm : 30   | Gravel : 50               |
| External walls    | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |
|                   | Air knife : 50        | Air knife : 50            |
|                   | Heavy concrete : 160  | Heavy concrete : 160      |
|                   | External coating : 20 | External coating : 20     |
| External walls    | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |
|                   | Air knife : 50        | Air knife : 50            |
|                   | Heavy concrete : 160  | Heavy concrete : 160      |
|                   | External coating : 20 | External coating : 20     |
| Divider           | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |
|                   | Heavy concrete : 160  | Heavy concrete : 160      |
|                   | Placoplatre BA13      | Placoplatre BA13          |

Table 2.3: *Wall compositions* <sup>5</sup>

<sup>5</sup>Source : Mathieu Rivallain in [28]

### 2.3.3 Rehabilitation strategies

In his thesis Mathieu Rivallain developed a tool to select rehabilitation strategies among multiple possibilities under multi-criterion optimization. Thus he produced several results depending on which criteria were selected to make the optimization. In this study we used the first results presented in his thesis on page 147. They were produced with the Pareto fronts between investment cost and primary energy consumption and correspond to three points.

The rehabilitation A corresponds to an effective but expensive solution, B is a mixed one and C is cheaper but not very effective. In the following table we detailed the different strategies (3.2.3). Rehabilitation 0 correspond to the starting case with the basic compositions.

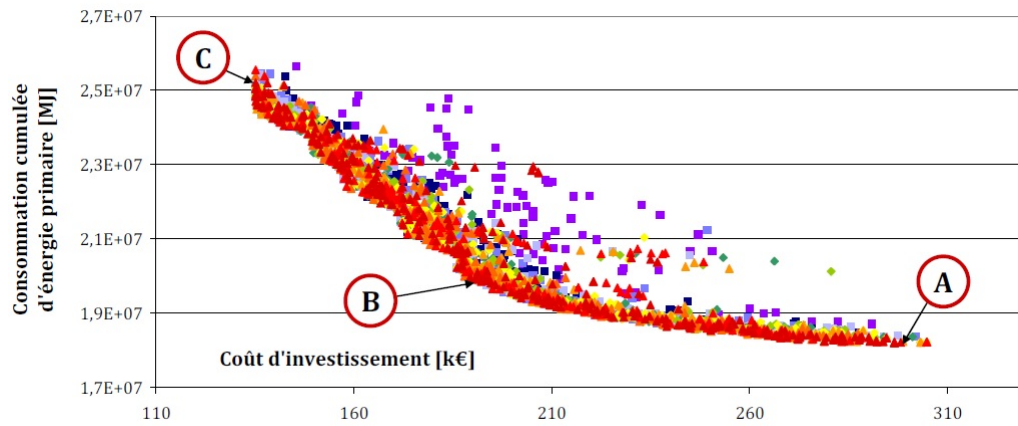


Figure 2.2: The Pareto fronts between investment cost and primary energy consumption<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Source : Mathieu Rivallain in [28]

|                  |                |  |
|------------------|----------------|--|
| Rehabilitation A | External walls | External Thermal Insulation, mineral wool : 300 mm |
|                  | Rooftop        | ETI polyurethane : 300 mm                          |
|                  | Lower floor    | ETI extruded polystyrene : 250 mm                  |
|                  | Openings       | Triple glazed low emissivity (blade Argon)         |
|                  | Ventilation    | Turbofan (Double flux : 0.1 vol/h)                 |
| Rehabilitation B | External walls | External Thermal Insulation, mineral wool : 120 mm |
|                  | Rooftop        | ETI polyurethane : 100 mm                          |
|                  | Lower floor    | ETI extruded polystyrene : 100 mm                  |
|                  | Openings       | Double glazed low emissivity (blade Argon)         |
|                  | Ventilation    | Turbo fan (Double flux : 0.1 vol/h)                |
| Rehabilitation C | External walls | External Thermal Insulation, mineral wool : 100 mm |
|                  | Rooftop        | ETI polyurethane : 100 mm                          |
|                  | Lower floor    | ETI extruded polystyrene : 100 mm                  |
|                  | Openings       | Double glazed low emissivity (blade Argon)         |
|                  | Ventilation    | Hygro-B (0.4 vol/h)                                |

Table 2.4: *List of the different rehabilitation strategies*

We computed the different composition in Pleiade+Comfie. The simulation software allows us to switch from one to another.

### 2.3.4 Scenarios and equipment

The scenarios computed to describe how the buildings were used were also given in the thesis of Mathieu Rivallain where he described the different hypotheses. *We didn't compute a cooling strategy because we were interested in the discomfort rate.*

**Natural ventilation** The ventilation in the basic state, without rehabilitation, is insured by a controlled mechanical ventilation and produced an air renewal of 0,6 vol/h. During hot summer night the air renewal is increased to 10 vol/h. We had to compute a different ventilation strategy for each location.

We compute a different ventilation strategy for Montreuil, Berlin, Nice and Paris Orly. We didn't separate the scenario for Paris Orly in order to see the impact of climate change on actual building.

**Heating system** The boiler is characterized by the following parameters :

- Rated load efficiency : 80 % ;
- 30 % load efficiency : 65 % ;

- Load loss : 3kWh (tower and block), 1kWh (house) ;
- Rated power : Depends on the heating needs.

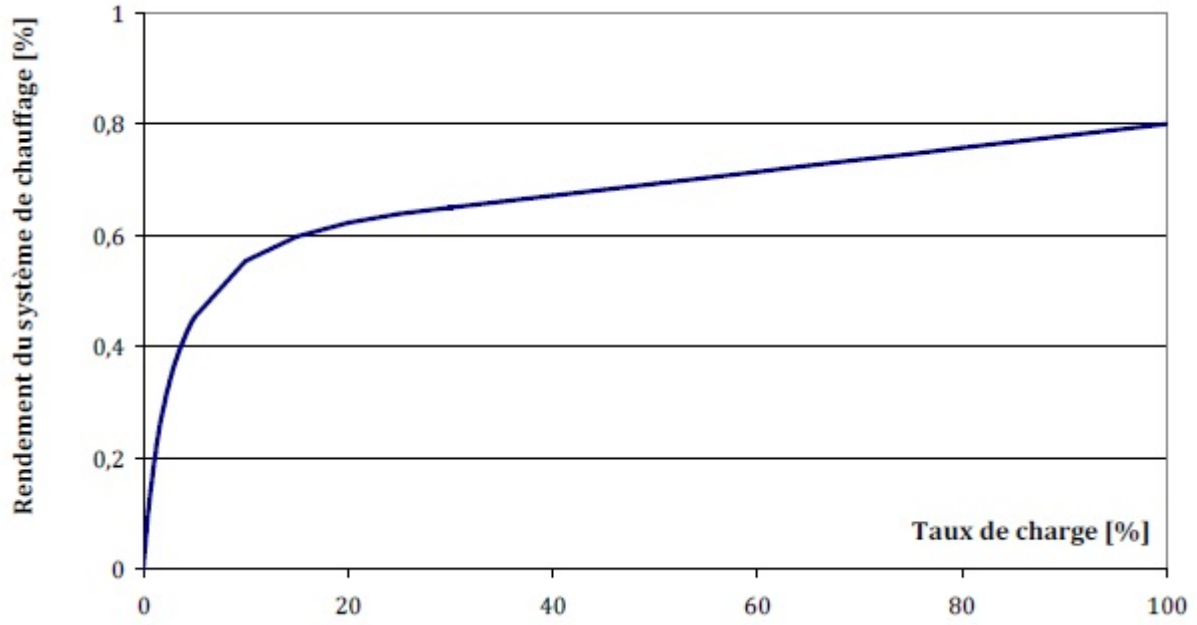


Figure 2.3: Evolution of the efficiency of the boiler in function of the loading rate<sup>7</sup>

The hourly efficiency is calculated with the Th-BCE 2012 method which will be detailed later. We use the same characteristics for each simulation, only the rated power was modified.

**Occupation** We assume that there is one person every 25  $m^2$  and that the scenario of occupation is the following :

- From Monday to Friday :
  - From 0 h to 8 h : 100 %;
  - From 8 h to 18 h : 50 %;
  - from 18 h to 24 h : 100 %
- Saturday and Sunday : 100 %.

**Ocultation** During winter shutters are closed during the night to add a thermal resistance against cold night and during summer they are closed during the daylight to enhance thermal comfort. The additional thermal resistance is 1  $m^2.K/W$ .

<sup>7</sup>Source : Mathieu Rivallain in [28]

**Heating order** The heating temperature is fixed to 19°C during the whole year.

**Internal input** Internal input are simulated by a constant power of 2,6  $V/m^2$ .

### 2.3.5 Simulations on Pleiade+Comfie

At this stage we had 3 rehabilitation strategies on 3 different buildings and for 6 different climates which represent 72 simulations on Pleiade+Comfie. These simulations were realized manually by switching after each simulation the parameters. It represented approximately 4-5 hours of work each time we had to make all these simulations.



# Chapter 3

## Results and Discussion

### 3.1 Indicator choices

We had to select which indicators were relevant to our study. After each simulation Pleiade+Comfie produces an 8754 lines Excel file in which several information are available. It is an hourly file for a 1-year period. For each hour and for each thermal zone you have the internal and external temperature, the heating needs, and the solar energetic inputs. You also have information about the whole year, for each thermal zone you have the total heating needs, the minimal, mean and maximal temperature, the amplification coefficient, the discomfort rate.

To assess the energetic efficiency of a rehabilitation strategy we first needed the **heating needs** of the building that were provided by Pleiade+Comfie. Then, on Excel, we compute the calculation of the hourly efficiency of the boiler in order to calculate the total **heating consumption** with the Th-BCE 2012 method.

In this method, the hourly efficiency of the boiler is calculating in function of the loading rate at 100 % and 30 % and of the load losses. Then you divide the hourly heating needs by the hourly efficiency to obtain the hourly consumption. Finally, you sum all the hourly consumptions. This method is precisely described on page 63-64 of the thesis.

As we didn't precise a cooling strategy we also had to have information about the discomfort rate in the building. Many articles on the subject can be found in the literature [6, 10, 11]. In our study we used three indicators :

**Total discomfort** The percentage of hours during which the temperature was above 28°C.

**Adaptative discomfort** This indicators is based on the idea that thermal discomfort depends on the evolution of external weather conditions

and on the fact that human have the capacity to get used to different level of temperature. Thus comfort temperature range is calculated depending on the evolution of the external temperature. This evolution was studied and described by Nicol, Humphreys and McCartney in 2002 [19, 22]. It is based on the calculation of the running mean temperature and can be define by recurrence like this :

$$(3.1) \quad \theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1}$$

Where :

- $\theta_{rm}$  : running mean temperature of today ;
- $\theta_{rm-1}$  : running mean temperature of the previous day ;
- $\theta_{ed-1}$  : daily mean temperature of the previous day ;
- $\alpha$  : Time constant that lies between 0 and 1 (recommended value 0,8). It allows us to diminish the impact of the external temperature.

Then the NFEN 15251 (AFNOR 2007) standard defines a temperature range for non-industrial buildings without cooling system depending on their category.

| Category | Explanation  | Limit of deviation (°C) | Range of acceptability (%) |
|----------|--|-------------------------|----------------------------|
| I        | High level of expectation for very sensitive and fragile users (hospitals)     | $\pm 2$                 | 90                         |
| II       | Normal expectation for new buildings   | $\pm 3$                 | 80                         |
| III      | Moderate expectation (existing buildings)                                      | $\pm 4$                 | 65                         |
| IV       | Values outside the criteria for the above categories (only in a limited period | $\pm > 4$               | $< 65$                     |

Table 3.1: *Suggested applicability for the categories and their associated acceptable temperature ranges* <sup>1</sup>

As we work with buildings of the category II in our study, the expression of the temperature range is :

$$(3.2) \quad \theta_{imax,imin} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 \pm 3$$

Then the adaptive thermal discomfort is assessed with the following equation. The result is given in °C.hours :

<sup>1</sup>Source : M. Taleghani et al. in [31]

$$(3.3) \quad \sum_{occupation} (\theta_{op}(h) - \theta_{imax}(d))_{\theta_{op} > \theta_{imax}}$$

Where :

- $\theta_{op}$  : Hourly operative temperature (°C);
- $\theta_{imax}$  : Daily maximal limit of the operative temperature;

This criterion is very interesting for several reason : you can specify the degree of requirement that you want for your building with the different categories and also; it enables to compare discomfort under each climate in a similar way seeing that its temperature range is variable depending on the variability of the climate and thus can cover extreme hot temperatures like those of 2080 ; it gives a sense of the human acclimatization to hot temperature and on the contrary to his difficulty to get along with important temperature variations.

**Sleeping discomfort** A study conducted by Djongyang N. et al. [10] concluded that the thermo neutral temperature of humans during sleeping when you have a total insulation of 0.94 clo<sup>2</sup> ranges between 27°C and 29 °C. Thus we calculate the number of night hours <sup>3</sup>during which the temperature was above 29°C to give us a good impression of the sleeping thermal discomfort.

| Indicator                           | Unit               |
|-------------------------------------|--------------------|
| Heating needs of the building       | kWh/m <sup>2</sup> |
| Heating consumption of the building | kWh/m <sup>2</sup> |
| Total discomfort                    | kWh/m <sup>2</sup> |
| Adaptive discomfort                 | °C.hours           |
| Sleeping discomfort                 | ∅                  |

Table 3.2: *Summary of the different indicators with their unit*

## 3.2 Results, Analysis and Discussion

We will present three sets of result that we selected among the multiple possibilities offered. If you want more information about something you

<sup>2</sup>The clo is a unit that measured the insulation provided by clothes or layer, 0.94 clo correspond to a normal summer quilt [15]

<sup>3</sup>From 22h to 7h

think could be relevant you can refer to the annexe where all the results are presented in a less presentable way.

It is important to remember that these results depend on the choices we made for our scenarios of use in the building and that we never tried to optimize these scenarios. Thus we it is more important to focus on the scales than on the real number.

We had 4 types of variables : rehabilitation strategy, morphology, weather and indicators.

### 3.2.1 Evolution of the consumption and the discomfort rate in function of the period and the morphology for rehabilitation 0,A,B,C

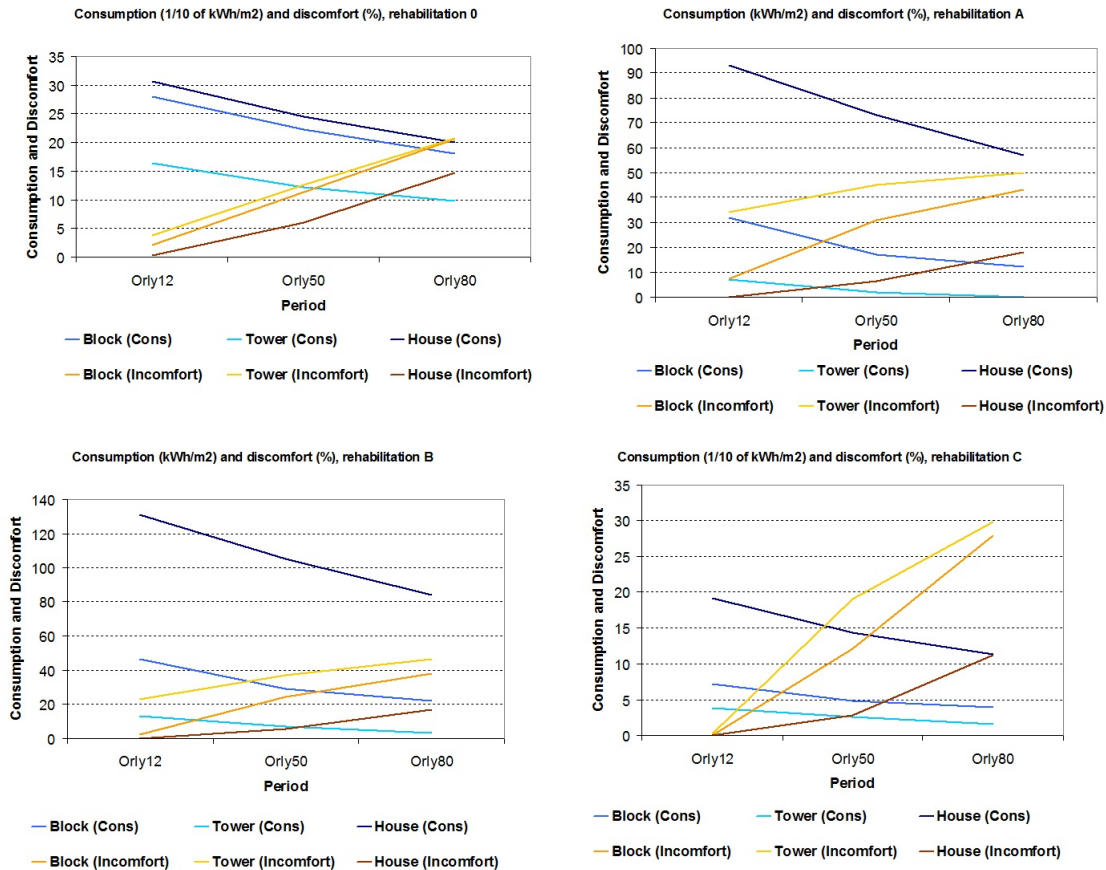


Figure 3.1: Evolution of the consumption and the discomfort rate in function of the period and the morphology for rehabilitation 0,A,B,C

In these graphics we can easily see the effect of climate change on the two indicators. The heating energetic consumption decreases and the discomfort rate increases whatever the rehabilitation strategy or the morphology is. The scale of these tendencies are not very readable on this type of graphics but it shows that even if climate change have the effect to reduce heating consumption (which is a good thing), the increase in discomfort rate will bring an increase of the cooling consumption in buildings with cooling system. Thus it will conduct to a global increase of the energetic consumption.

By comparing one graphic with another we can also see that the rehabilitation strategy have the expected effect on the heating consumption which declines, for a given climate, as the rehabilitation strategy become increasingly important. However discomfort increases as the rehabilitation strategy become more effective on energy consumption reduction. We can assume that important rehabilitation strategies have this effect on the discomfort rate because isolated buildings are not easy to cool down when their internal temperature is high if you only use natural ventilation.

If you look at the morphologies, you can notice that they are always ranked in the same order : the tower is the worst morphology in term of comfort according to this criterion followed by respectively the block and the house but it is the better morphology in term of heating consumption followed by respectively the block and the house.

The abnormally low consumption of the tower can be due to several facts. First the dimensions of this tower are very particular, her compactness is very low (the ratio between her height and her width or length is only of two) which is not representable of the majority of the built towers. This low compactness makes energy needs decrease because the ratio between the exchange surfaces with the outside and the living surfaces diminishes. Another fact is that we didn't develop a cooling strategy so *there was no cooling energy used* to reduce the discomfort rate and the tower is the morphology where discomfort rate is the more elevated whatever the rehabilitation strategy is. We may repeat ourselves here but this is a very important thing to remember because, with no rehabilitation, the discomfort rate will reach about 20 % in the tower by 2080. It means that if we develop a cooling strategy that started when the temperature exceeds 28°C (which doesn't seem to be a bad strategy), the cooling system will work 20 % of the time on a whole year (about 1750 hours) and thus increases, in an important way, the heating-cooling energy consumption.

### 3.2.2 Evolution of different discomfort criteria in function of the climate for each morphology (rehabilitation 0)

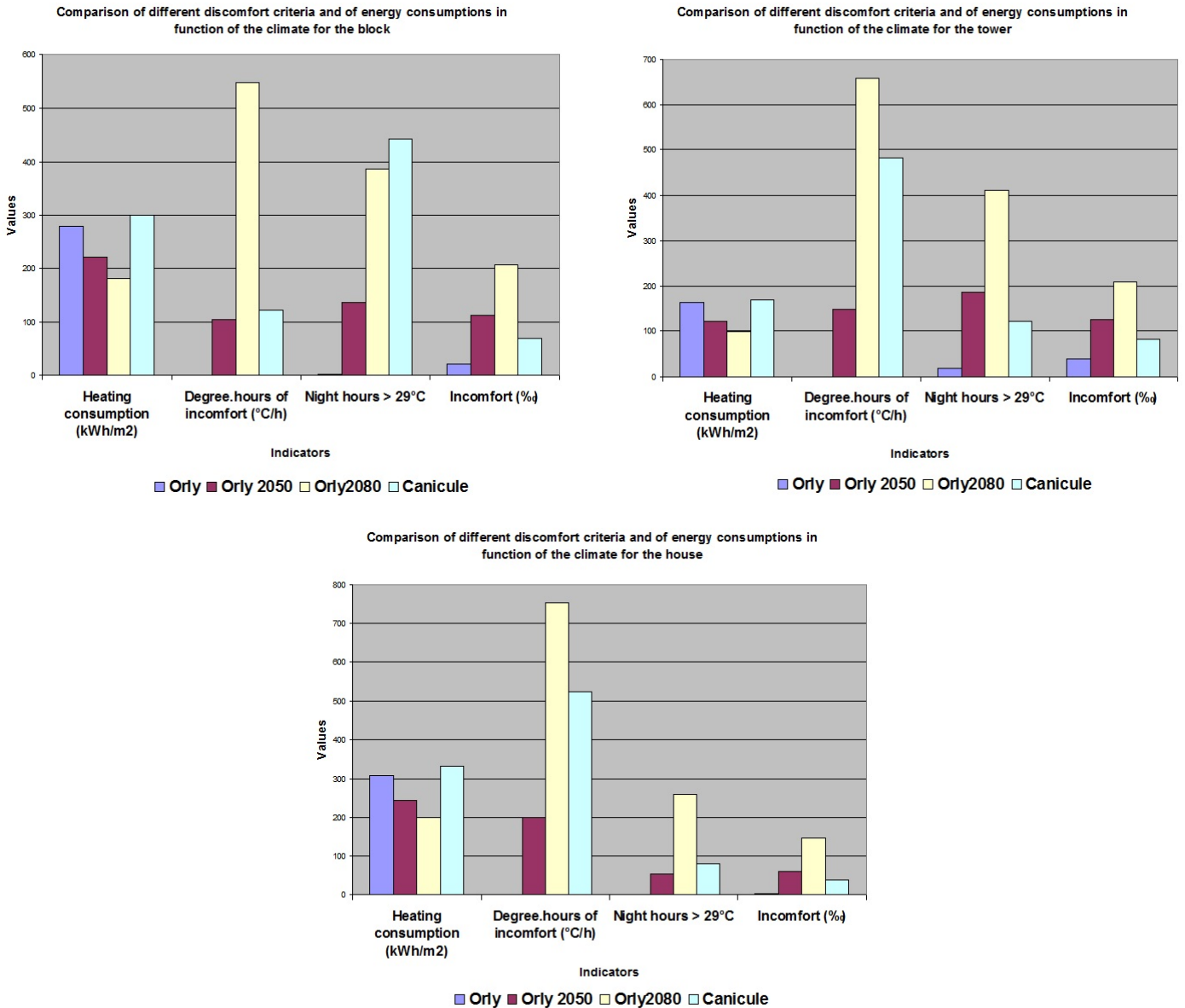


Figure 3.2: Evolution of different discomfort criteria in function of the climate for each morphology (rehabilitation 0)

In these graphics we can improve what our conclusions we have made with the precedent graphics as we can assess the effect of climate change on heating energy consumption reduction. In 2080 the heating consumption will decrease by 35 % for the block and the house and 40 % for the tower. As we could assume it, the climate change in Orly for 2050 and 2080 will also have for consequence an increase of all the discomfort criteria. With these graphics we can have a good idea of the impact of climate change if no rehabilitation strategy is proposed on the comfort criteria.

We can notice the apparition of a regular adaptive discomfort by 2050 that will range between 100 and 200 °C.hours. This adaptive discomfort will be multiplied by a factor between 3 and 5 by 2080 compared to its level of 2050. In the blocks people will experiment each year the same adaptive discomfort as the 2003 hot summer year by 2050. In 2080 all the adaptive discomfort will exceed the level of 2003.

Night discomfort will also appear significantly by 2050, for the tower it will even be higher than the 2003 night discomfort rate. It is interesting to notice that the block is the only morphology where night discomfort will never exceed the one of 2003 through climate change.

Discomfort rate also increases with climate change as expected but what is interesting to notice is that the discomfort rate of 2050 will slightly exceed the one of 2003 for each morphology and that by 2080 discomfort rate will be about 3-time higher than the level of the 2003 hot summer year for the block, 2.5-time higher for the tower and 4-time higher for the house.



### 3.2.3 Evolution of the adaptive discomfort in function of the rehabilitation and the climate for each morphology

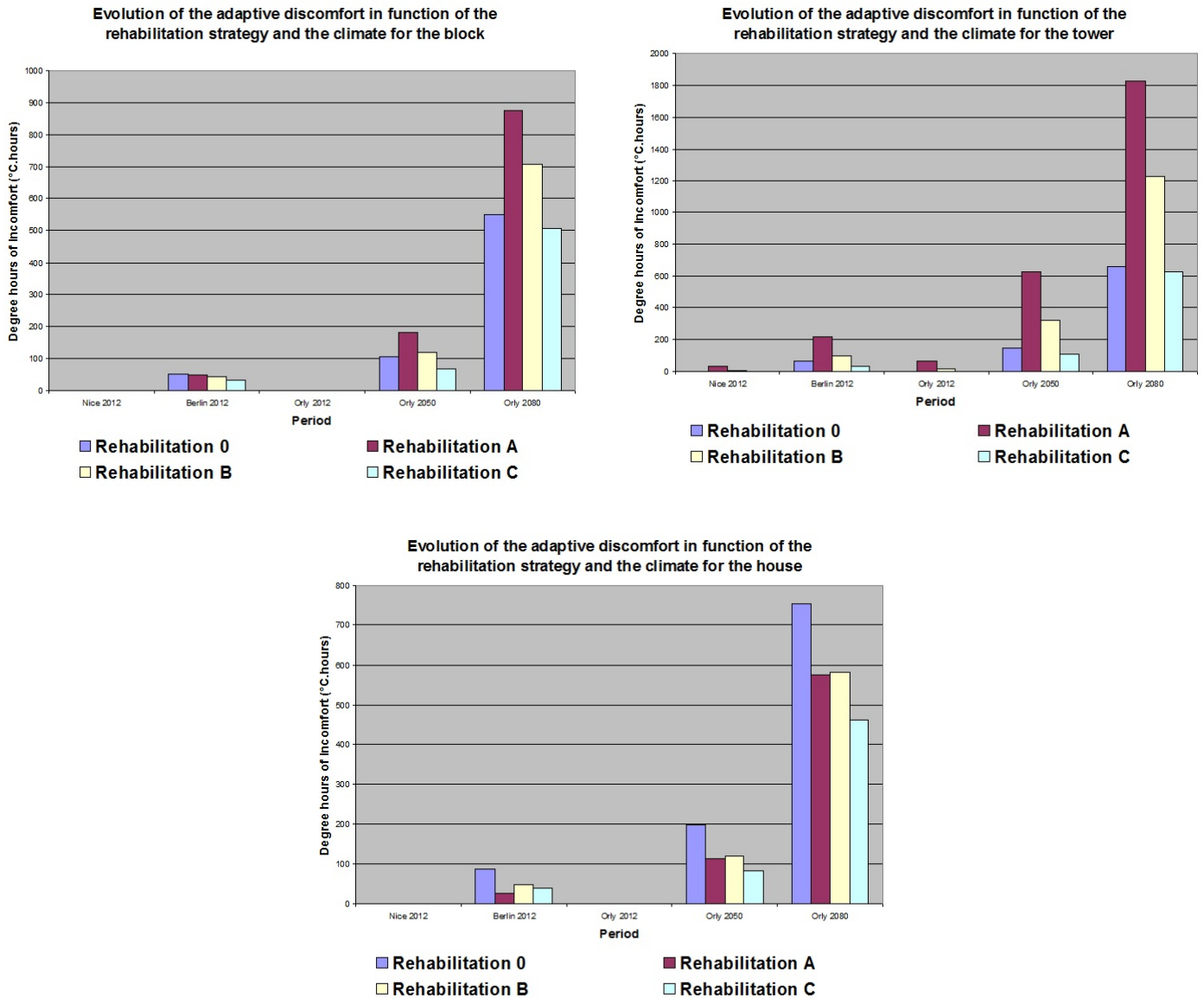


Figure 3.3: *Evolution of the adaptive discomfort in function of the rehabilitation and the climate for each morphology*

These graphics show that rehabilitation C is the best rehabilitation in term of adaptive discomfort reduction. For each climate, rehabilitation C provides an adaptive discomfort which is inferior to the case without rehabilitation. In 2050 the reduction is not relevant for the tower and the block ( $<10\%$ ) but is of 22% for the house. In 2080 the reduction is of 34% for the block, 28% for the tower and 59% for the house.

A surprising fact is that the morphologies have different reactions to the rehabilitation strategy. In Orly for the tower and the block rehabilitation A and B provide an adaptive discomfort higher than the case without rehabilitation. For the block the increase is of 60 % between rehabilitation 0 and A in 2050 and 65 % in 2080. For the tower the increase is of 250 % in 2050 and 450 % in 2080. We can conclude that for the tower climate change will make rehabilitation strategy increasingly ineffective in term of comfort. However in the case of the house, rehabilitation A and B already provide a level of adaptive discomfort which is lower than the level of the case without rehabilitation strategy which was not expected.

We didn't find a specific explanation to this fact. We can just say that rehabilitation make buildings easy to heat but not easy to cool down with simply natural ventilation, it reduces considerably temperature variations mainly when compactness is low as for the block and the tower. Thus, as the calculation of the adaptive discomfort is based on the external and internal temperatures (through the operative temperature for example), a local heatwave has the effect to heat the building at a high temperature but if the temperature then abruptly returns to normal, there is a gap between running mean temperature that go down and operative temperature which stays high because building doesn't easily cool down.

These graphics also show that Nice climate is more desirable than Berlin one in term of adaptive comfort. It is probably due to the fact that Nice climate is more temperate without important temperature variations whereas it is the contrary for Nice.

## Chapter 4

# Conclusion and personal contribution

### 4.1 Conclusion

This study proves that the thesis of Mathieu Rivallain is a good root to produce works on the subject of the energetic rehabilitation. The subject of this study was to assess the impact of climate change on rehabilitation strategies through several indicators that were relevant for a building. The methodology was inspired by several works already made on similar subjects in the literature so the bibliographic research was very important.

However this study is characterized by the fact that a lot of parameters were able to vary. We had 3 morphologies, 4 rehabilitation strategies, 6 climates and more than 5 different indicators (temperature, comfort, consumption). A lot of data were produce and we were not able to present all the results that could have been presented.

The main conclusion we could made is that climate change will significantly affect comfort. All the discomfort indicators increase with climate change for a given rehabilitation strategy. For most of the discomfort criteria the 2003 hot summer year discomfort level will be on average by 2050 and will be largely exceed by 2080.

The house is the only morphology for which there is one rehabilitation strategy that reduce discomfort compared to the level of the case without rehabilitation strategy. However all the rehabilitation strategies had the expected effect on energy consumptions but with different scales.

In term of heating energy consumption this study illustrates the fact that very compact buildings are very effective but it proves the contrary in term of comfort because indicators show that discomfort is likely to increase more

significantly in these buildings.

## 4.2 Personal contribution

This study allowed me to build a big data base of 72 Excel files. I realized alone all these simulation with the advices of Mathieu Rivallain and Olivier Baverel, this work represents the major part of my internship. I think this database will not be lost, as i was part of a research program<sup>1</sup> it could be used in the future for another purpose in another project. Indeed I presented a little part of all the results I could present and if someone is interested in this subject he can refer to the annexe where I put all my results.

Besides I developed a methodology that was inspired by other studies on similar subjects so I think that the method also could be used for other studies on energetic rehabilitation that would take climate change into account. My bibliographic research allows me to find several things that was of great use in this study and that could be used in the future like the software CCWorldWeatherGen to create future hourly weather files or the different comfort criteria.

Finally I would like to insist on the fact that this study proves that the thesis of Mathieu Rivallain is a good root for research subjects and, as we work with architects, it also proves that the cooperation between architects and searchers can be productive. I am glad that my work could illustrate these facts.

---

<sup>1</sup>Ignis Mutat Res

# Annexe A

|                     |                                  |        |       |       |       |
|---------------------|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Type de Morphologie | Barre Grimaud                    | Réa0   | RéaA  | RéaB  | RéaC  |
| <b>Nice12</b>       | Tmax (°C)                        | 33.04  | 30.6  | 29.69 | 27.67 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.93  | 23.94 | 23.14 | 22.16 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 68297  | 290   | 2036  | 7449  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 85     | 0     | 3     | 9     |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 43131  | 2406  | 6406  | 11744 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 127    | 1     | 6     | 16    |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 43200  | 2400  | 6400  | 11800 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0      | 0.1   | 0     | 0     |
|                     | Heure nuit>29                    | 20     | 43    | 1     | 0     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 10.71  | 21.75 | 9.03  | 0.56  |
| <b>berlin12</b>     | Tmax (°C)                        | 34.34  | 29.36 | 30.12 | 29.95 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.37  | 22.04 | 21.45 | 20.79 |
|                     | Besoin annuel chauff (W)         | 188874 | 17671 | 28375 | 44901 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 236    | 22    | 35    | 56    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 77069  | 12707 | 17808 | 24328 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 343    | 34    | 53    | 83    |
|                     | P nominale de l'équipement (kWh) | 77100  | 12700 | 17800 | 24400 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 50     | 49    | 45    | 33    |
|                     | Heure nuit>29                    | 36     | 0     | 3     | 1     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 4.2    | 4.37  | 2.2   | 1.43  |
| <b>Only</b>         | Tmax (°C)                        | 30.6   | 29.62 | 28.86 | 27.04 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.35  | 22    | 21.44 | 20.69 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 152789 | 11818 | 20094 | 33371 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 191    | 15    | 25    | 42    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 68558  | 42610 | 44523 | 46436 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 280    | 31.9  | 46.53 | 71.55 |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 68600  | 42600 | 44600 | 46500 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0      | 0.26  | 0     | 0     |
|                     | Heure nuit>29                    | 1      | 3     | 0     | 0     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 2.14   | 7.31  | 2.03  | 0.02  |
| <b>Only50</b>       | Tmax (°C)                        | 35.18  | 33.43 | 32.64 | 30.62 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.54  | 23.61 | 22.99 | 22.1  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 120400 | 7384  | 13952 | 24640 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 151    | 9     | 17    | 31    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 62973  | 12051 | 15030 | 20227 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 222    | 17    | 29    | 48    |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 63000  | 12100 | 15100 | 20300 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 105    | 182   | 120   | 69    |
|                     | Heure nuit>29                    | 136    | 373   | 167   | 1     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 11.28  | 30.92 | 24.47 | 12.09 |
| <b>Only80</b>       | Tmax (°C)                        | 38.97  | 36.11 | 35.31 | 33.22 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 22.59  | 25.02 | 24.47 | 23.33 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 98092  | 6     | 13    | 18967 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 123    | 4947  | 10080 | 24    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 58057  | 9388  | 13344 | 18363 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 181    | 12    | 22    | 39    |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 58100  | 9400  | 13400 | 18400 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 549    | 874   | 707   | 508   |
|                     | Heure nuit>29                    | 386    | 1037  | 769   | 431   |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 20.66  | 42.93 | 37.95 | 27.9  |
| <b>Canicule</b>     | Tmax (°C)                        | 38.66  | 35    | 35.45 | 35.53 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.03  | 22.87 | 22.21 | 21.41 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 164771 | 17318 | 21715 | 35977 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 206    | 16    | 27    | 45    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 75800  | 12800 | 17787 | 24027 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 300    | 25    | 42    | 68    |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 75800  | 12800 | 17800 | 24000 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 123    | 339   | 334   | 328   |
|                     | Heure nuit>29                    | 443    | 115   | 66    | 63    |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 6.82   | 16.38 | 9.48  | 4.29  |

# Annexe B

| Type de Morphologie | Tour Sevrans                     | Réa0   | RéaA   | RéaB   | RéaC   |
|---------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Nice12</b>       | Tmax (°C)                        | 34.17  | 33.69  | 31.81  | 28.06  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.98  | 25.8   | 24.19  | 22.31  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 352891 | 208    | 464    | 36507  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 48     | 0      | 0      | 5      |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 232878 | 57684  | 55007  | 62668  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 69     | 0      | 0.2    | 8      |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 232900 | 57700  | 55000  | 62700  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0      | 29.5   | 5.5    | 0      |
|                     | Heure nuit>29                    | 6      | 712    | 300    | 0      |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 11.8   | 39.62  | 31.66  | 1.79   |
|                     | Tmax (°C)                        | 35.53  | 32.05  | 30.45  | 29.11  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.49  | 23.84  | 22.6   | 21.16  |
| <b>berlin12</b>     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 993954 | 38877  | 86140  | 234065 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 134    | 5      | 12     | 32     |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 422086 | 51506  | 76759  | 137288 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 192    | 8      | 18     | 46     |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 422100 | 51500  | 76800  | 137300 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 61     | 216    | 94.9   | 28.9   |
|                     | Heure nuit>29                    | 52     | 629    | 156    | 0      |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 5.33   | 38.63  | 26.69  | 3.57   |
|                     | Tmax (°C)                        | 32.09  | 32.89  | 31.48  | 27.38  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.47  | 23.72  | 22.5   | 21     |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 810005 | 27158  | 58671  | 177035 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 109    | 4      | 8      | 24     |
| <b>Orly</b>         | Puissance max chauff (W)         | 540624 | 477549 | 484013 | 490368 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 164    | 7      | 13     | 38     |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 540600 | 477500 | 484000 | 490400 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0.15   | 64.7   | 11     | 0      |
|                     | Heure nuit>29                    | 19     | 492    | 104    | 0      |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 3.9    | 34.07  | 22.95  | 0.18   |
|                     | Tmax (°C)                        | 36.92  | 35.3   | 33.61  | 30.73  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.64  | 25.51  | 24.08  | 22.37  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 625427 | 6100   | 27296  | 119017 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 84     | 1      | 4      | 16     |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 342267 | 222571 | 225005 | 229421 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 122    | 2      | 7      | 25     |
| <b>Orly50</b>       | P nominale de l'équipement (W)   | 342300 | 222600 | 225000 | 229400 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 148    | 624    | 324    | 107    |
|                     | Heure nuit>29                    | 185    | 1028   | 729    | 98     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 12.59  | 44.86  | 37.05  | 19.09  |
|                     | Tmax (°C)                        | 40.79  | 37.02  | 35.44  | 33.84  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 22.69  | 27.15  | 25.52  | 23.58  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 502291 | 837    | 14291  | 83999  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 68     | 0      | 2      | 11     |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 313401 | 23242  | 52550  | 98423  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 99     | 0      | 3      | 16     |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 313400 | 23200  | 52600  | 98400  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 658    | 1829   | 1227   | 625    |
| <b>Orly80</b>       | Heure nuit>29                    | 412    | 1389   | 1088   | 541    |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 20.78  | 49.74  | 46.52  | 29.77  |
|                     | Tmax (°C)                        | 39.94  | 35.82  | 36.07  | 36.15  |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.1   | 24.43  | 23.16  | 21.58  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 872402 | 26114  | 62104  | 188621 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 118    | 4      | 8      | 25     |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 413231 | 53954  | 78212  | 139237 |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 170    | 6      | 12     | 37     |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 413200 | 54000  | 78200  | 139200 |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 482    | 560    | 438    | 379    |
|                     | Heure nuit>29                    | 121    | 655    | 284    | 71     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 8.15   | 37.61  | 28.85  | 4.42   |
| <b>Canicule</b>     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |
|                     |                                  |        |        |        |        |

# Annexe C

| Type de Morphologie | Pavillon Montfermeil             | Réa0  | RéaA  | RéaB  | RéaC  |
|---------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Nice12</b>       | Tmax (°C)                        | 31.03 | 27.57 | 27.86 | 27.97 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.6  | 21.14 | 21.07 | 20.88 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 6982  | 1767  | 2650  | 3805  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 98    | 25    | 37    | 53    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 4223  | 1710  | 2004  | 2530  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 140   | 37    | 53    | 76    |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 4200  | 1700  | 2000  | 2500  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0     | 0     | 0     | 0     |
|                     | Heure nuit>29                    | 57    | 0     | 0     | 0     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 11.14 | 0.14  | 0.43  | 0.57  |
|                     | Tmax (°C)                        | 30.62 | 28.08 | 28.77 | 28.76 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 19.9  | 20.04 | 19.95 | 19.82 |
| <b>berlin12</b>     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 18798 | 5966  | 8377  | 10896 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 264   | 84    | 118   | 153   |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 7532  | 4680  | 4969  | 5023  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 377   | 127   | 175   | 222   |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 7500  | 4700  | 5000  | 5000  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 86    | 25    | 48    | 40    |
|                     | Heure nuit>29                    | 7     | 0     | 0     | 0     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 1.55  | 0.32  | 0.72  | 0.7   |
|                     | Tmax (°C)                        | 28.03 | 26.25 | 26.53 | 26.22 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 19.92 | 20.22 | 20.08 | 19.76 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 15247 | 4550  | 6509  | 8970  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 214   | 64    | 91    | 126   |
| <b>Only</b>         | Puissance max chauff (W)         | 6623  | 2458  | 3231  | 7616  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 307   | 93    | 131   | 192   |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 6600  | 2500  | 3200  | 7600  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 0.7   | 0     | 0     | 0     |
|                     | Heure nuit>29                    | 0     | 0     | 0     | 0     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 0.33  | 0     | 0     | 0     |
|                     | Tmax (°C)                        | 32.8  | 30.47 | 30.87 | 29.79 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.94 | 21.38 | 21.19 | 20.72 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 12127 | 3534  | 5120  | 6907  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 170   | 50    | 72    | 97    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 6215  | 2327  | 3062  | 4884  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 245   | 73    | 105   | 144   |
| <b>Only50</b>       | P nominale de l'équipement (W)   | 6200  | 2300  | 3100  | 4900  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 198   | 113   | 120   | 82    |
|                     | Heure nuit>29                    | 55    | 17    | 22    | 6     |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 6.09  | 6.52  | 5.75  | 2.76  |
|                     | Tmax (°C)                        | 36.34 | 33.75 | 34.19 | 33.13 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 21.86 | 22.41 | 22.18 | 21.65 |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 9930  | 2801  | 4125  | 5555  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 139   | 39    | 58    | 78    |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 5718  | 2128  | 2806  | 3487  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 200   | 57    | 84    | 113   |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 5700  | 2100  | 2800  | 3500  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 753   | 575   | 581   | 462   |
| <b>Only80</b>       | Heure nuit>29                    | 259   | 311   | 291   | 151   |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 14.66 | 18.03 | 16.54 | 11.15 |
|                     | Tmax (°C)                        | 37.13 | 36.13 | 36.38 | 36.47 |
|                     | Tmoy (°C)                        | 20.41 | 20.53 | 20.45 | 20.3  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh)       | 16492 | 5109  | 727   | 9513  |
|                     | Besoin annuel chauff (kWh/m2)    | 232   | 72    | 101   | 134   |
|                     | Puissance max chauff (W)         | 7419  | 2811  | 3673  | 4533  |
|                     | Conso chauffage (kWh/m2)         | 333   | 104   | 146   | 193   |
|                     | P nominale de l'équipement (W)   | 7400  | 2800  | 3700  | 4500  |
|                     | Degré heure inconfort (°C.heure) | 524   | 362   | 393   | 411   |
|                     | Heure nuit>29                    | 81    | 58    | 62    | 64    |
|                     | Inconfort max tout étage(%)      | 3.81  | 2.78  | 2.95  | 2.94  |
| <b>Canicule</b>     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |
|                     |                                  |       |       |       |       |



# Bibliography

- [1] W. Neil Adger. Building resilience to promote sustainability. *IHDP Update*, 2:1–3, 2003.
- [2] ANSI/ASHRAE/IESNA. Ashrae standard 90.1-2007 normative . *Appendix B - Building Envelope Climate Criteria*.
- [3] ASHRAE. International weather for energy calculations (iwec weather files). *Users Manual and CD-ROM*, 2001.
- [4] Commissariat Général au Développement Durable. Chifres clés de l'énergie, édition 2012. 2012.
- [5] S.E. Belcher, J.N. Hacker, and D.S. Powell. Constructing design weather data for future climate. *Building Services Engineering Research & Technology*, 21 (6):49–61, 2005.
- [6] Gail S. Brager and Richard J. de Dear. Thermal adaptation in the built environment : a literature review. *Energy and Buildings*, 27:83–96, 1998.
- [7] A.L.S. Chan. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in hong kong. *Energy and Buildings*, 43:2860–2868, 2011.
- [8] Loïc Chappoz. Les politiques d'efficacité énergétique en france et en allemagne : quand les deux voisins empruntent des chemins différents. 2013.
- [9] David Coley and Tristant Kershaw. Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. *Building and Environment*, 45:89–93, 2010.
- [10] Noël Djongyang, René Tchinda, and Donatien Njomo. Estmimation of some comfort parameters for sleeping eenvironment in dry-tropical sub-saharan africa region. *Energy Conversion and Management*, 58:110–119, 2012.

- [11] Université Joseph Fourier. Notion de confort thermique.
- [12] Erik Hollnagel and David D. Woods. *Resilient Engineering : Concept and Precept*. Ashgate, 2006.
- [13] Michael J. Holmes and Jacob N. Hacker. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Building*, 39:802–804, 2007.
- [14] Sára Hrabovszky-Horvátha, Tamás Pálvölgyi, Tamás Csoknyaic, and Attila Talamond. Generalized residential building typology for urban climate change mitigation and adaptation strategies: The case of Hungary. *Energy and Buildings*, 62:475–485, 2013.
- [15] Zhongping Lin and Shimin Deng. A study on the thermal comfort in sleeping environment in the subtropics - measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment*, 43:905–916, 2008.
- [16] Zhongping Lin and Shiming Deng. A study on the thermal comfort in sleeping environment in the subtropics - developing a thermal comfort model for sleeping. *Building and Environment*, 43:70–81, 2008.
- [17] K.J. Lomas and R. Giridharan. Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards. *Building and Environment*, 55:57–72, 2012.
- [18] J. Luterbacher, D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, and H. Wanner. Europe seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 303:503–1499, 2004.
- [19] Kathryn J McCartney and J Fergus Nicol. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 34:623–635, 2002.
- [20] Donella Meadows, Dennis Meadows, and Jorgen Randers. *Les Limites à la Croissance (dans un Monde Fini)*. Rue de l'échiquier, 2004.
- [21] Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart. *Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Uk., 2000.
- [22] J.F. Nicol and M. A. Humphreys. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Building*, 34:563–572, 2002.

- [23] OCDE. Energie : les cinquantes prochaines années. 1999.
- [24] OECD/IEA. World energy outlook 2008. 2008.
- [25] Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth assessment report. Available on : <http://www.ipcc.com>.
- [26] Bruno Peuportier and Isabelle Blanc Sommereux. Comfie, passive solar design tool for multizone buildings. manuel des utilisateurs. *Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris*.
- [27] V. Pope, M.L. Gallani, P.R. Rowntree, and R.A. Stratton. The impact of new parameterizations in the hadley centre climate model : Hadam3. *Clim. Dyn.*, 16:123–146, 2000.
- [28] Mathieu Rivallain. *Etude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants*. PhD thesis, Université Paris Est, 2013.
- [29] Sue Roaf, David Crichton, and Fergus Nicol. A 21st century survival guide. In *Adapting Building and Cities for Climate Change*, 2009.
- [30] Simon Roberts. Effects of climate change on the built environment. *Energy Policy*, 36:4552–4557, 2008.
- [31] Mohammad Taleghani, Martin Tenpierik, Stanley Kurvers, and Andy van den Dobbela. A review into buildings thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26:201–215, 2013.
- [32] Xiaoming Wang, Dong Chen, and Zheng Ren. Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings. *Building and Environment*, 46:871–883, 2011.





---

## **Annexe 4**

## **Catalogue des scénarios de projet, Master « Matière à penser »**



## 001 - B0 - csm

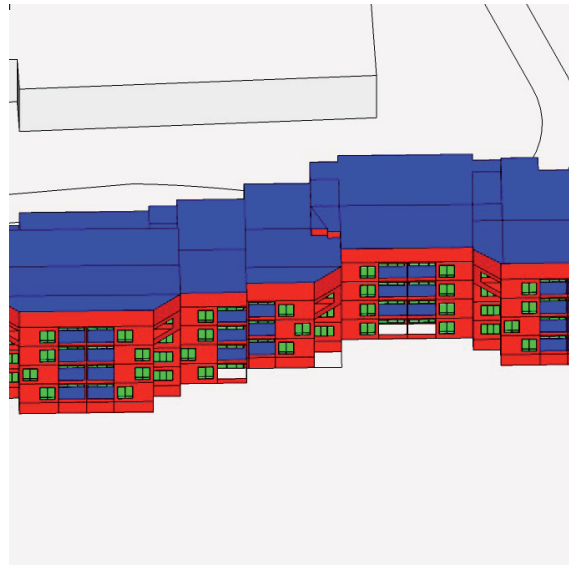


SHON : 3769.04  
 Compacité S/V : 0.399696574  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.3  
 % Vitrage Sud : 0.55



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 002 - B1 - csm

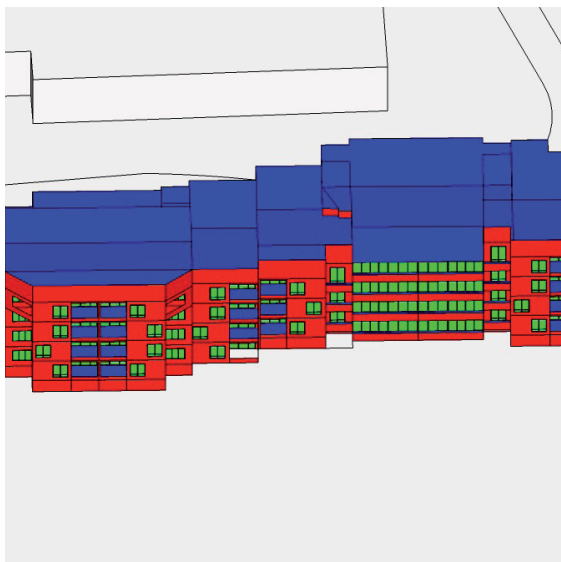


SHON : 3768.34  
 Compacité S/V : 0.39969499  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.3  
 % Vitrage Sud : 0.55



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 003 - B2 - csm



SHON : 3881.97  
 Compacité S/V : 0.400841341  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.2  
 % Vitrage Sud : 0.61



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 004 - B3 - csm



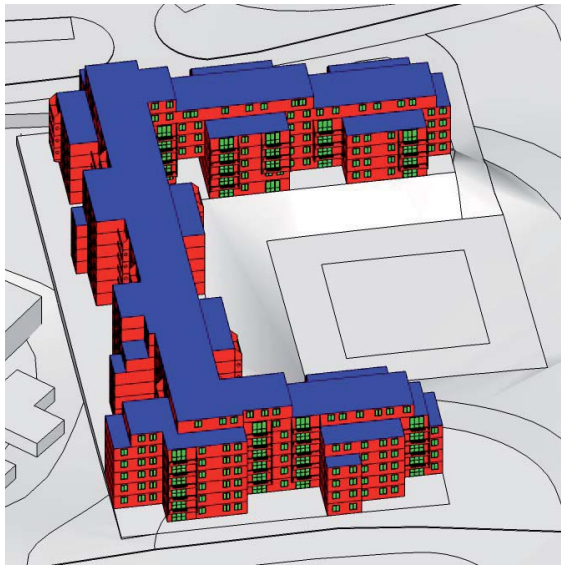
SHON : 4060.15  
 Compacité S/V : 0.432305709  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.6  
 % Vitrage Sud : 0.52



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran



## 009 - B0 - csm

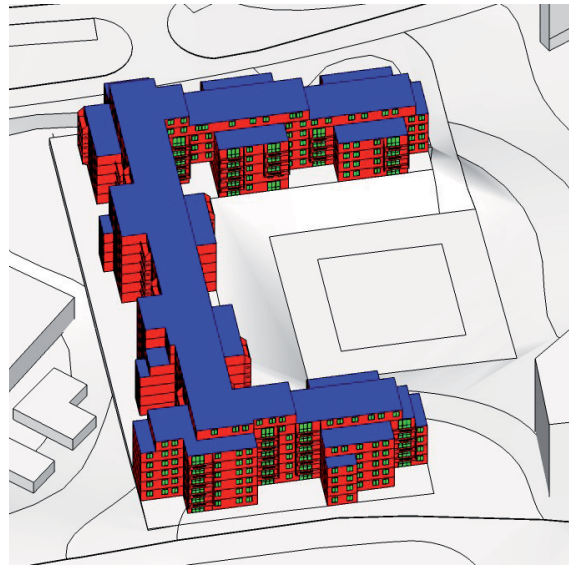


SHON : 16550.33  
 Compacité S/V : 0.409897353  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 11.7  
 % Vitrage Sud : 0.28



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 010 - B1 - csm

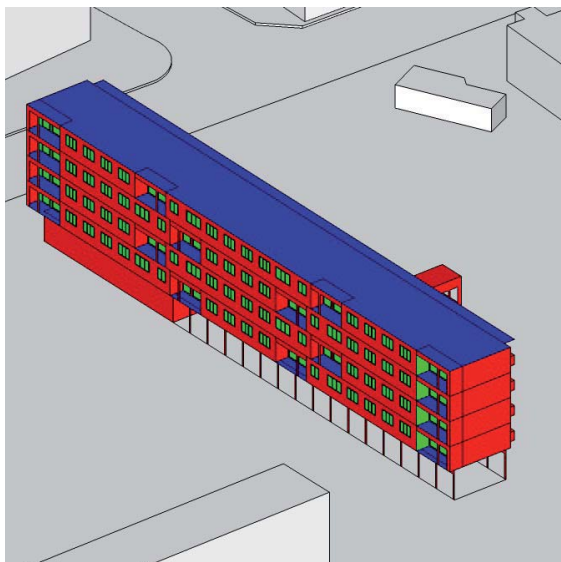


SHON : 16552.47  
 Compacité S/V : 0.409897986  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 11.7  
 % Vitrage Sud : 0.28



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 013 - B0 - mf

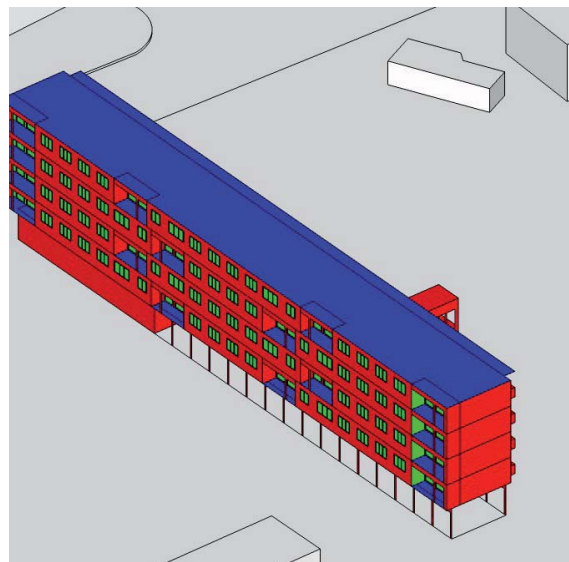


SHON : 2014.13  
 Compacité S/V : 0.405709948  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.8  
 % Vitrage Sud : 0.3



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 014 - B1 - mf

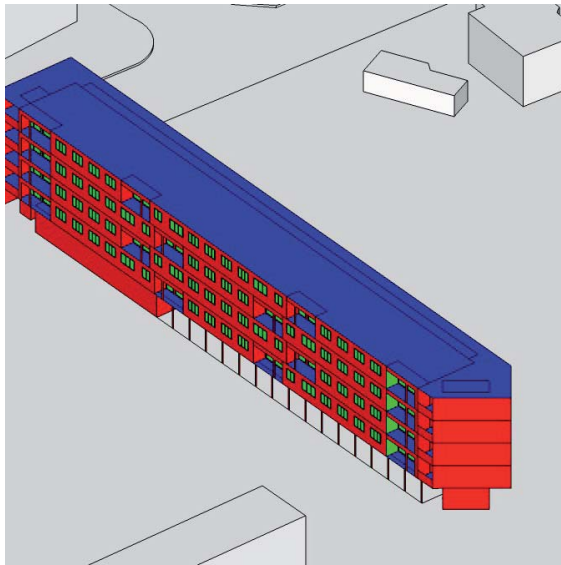


SHON : 2017.29  
 Compacité S/V : 0.405710099  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.8  
 % Vitrage Sud : 0.3



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 015 - B2 - mf

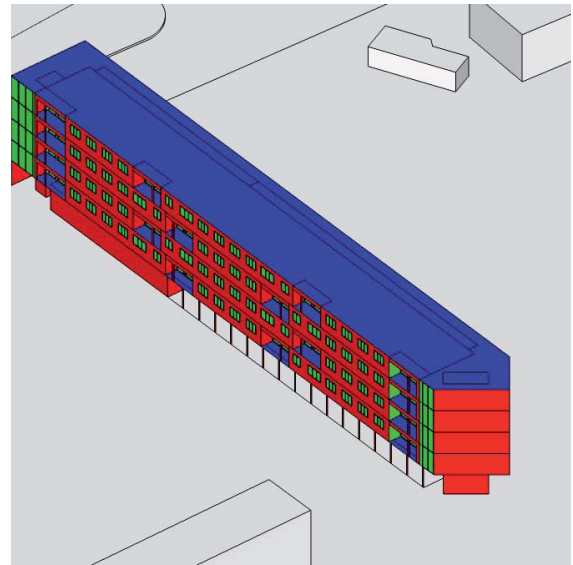


SHON : 2010.72  
 Compacité S/V : 0.405884444  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.9  
 % Vitrage Sud : 0.3



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 016 - B3 - mf

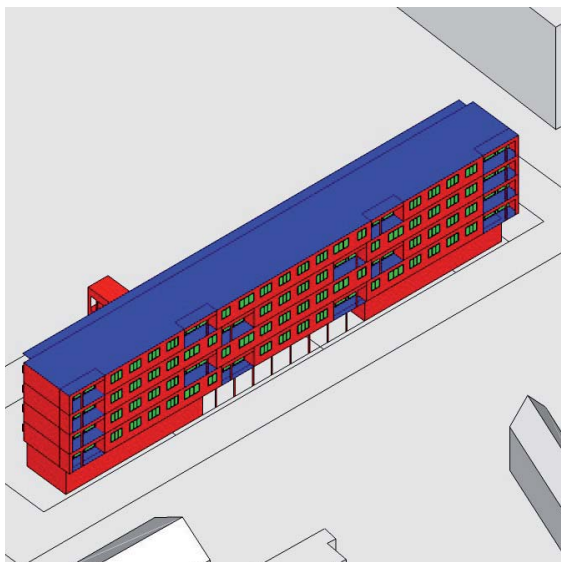


SHON : 2193.04  
 Compacité S/V : 0.302814564  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.5  
 % Vitrage Sud : 0.17



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 017 - B0 - mf

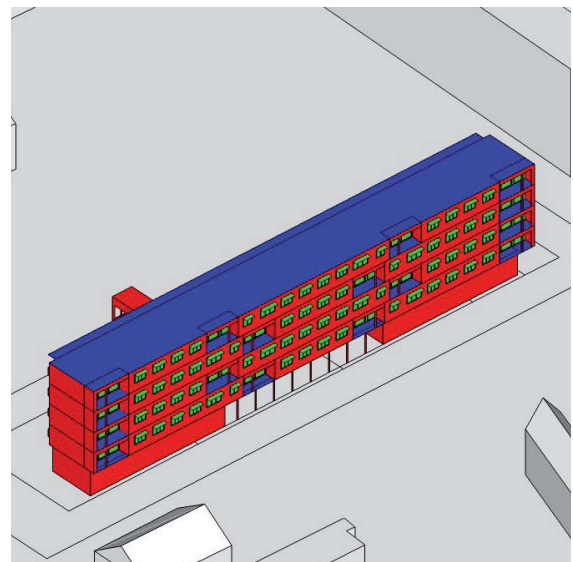


SHON : 2140.82  
 Compacité S/V : 0.401035711  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.9  
 % Vitrage Sud : 0.42



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 018 - B1 - mf

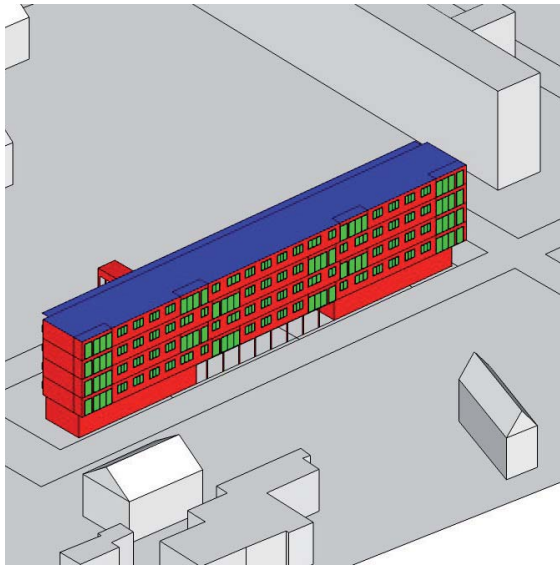


SHON : 2140.98  
 Compacité S/V : 0.401033093  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.9  
 % Vitrage Sud : 0.42



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 019 - B2 - mf

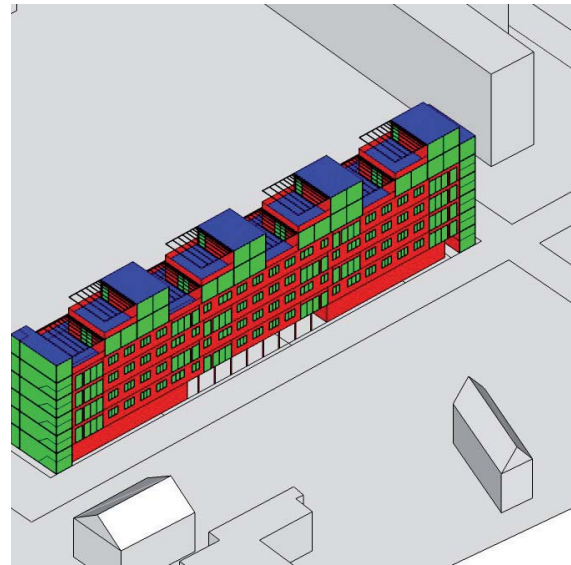


SHON : 2262.41  
 Compacité S/V : 0.401595627  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.4  
 % Vitrage Sud : 0.42



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 020 - B3 - mf

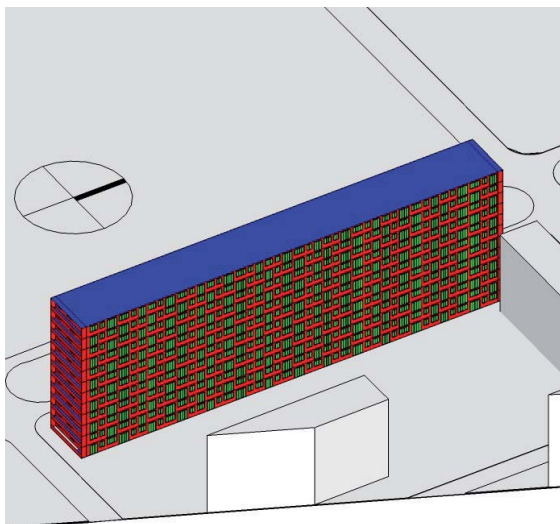


SHON : 2761.76  
 Compacité S/V : 0.347099116  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.9  
 % Vitrage Sud : 0.25



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 021 - B0 - csb

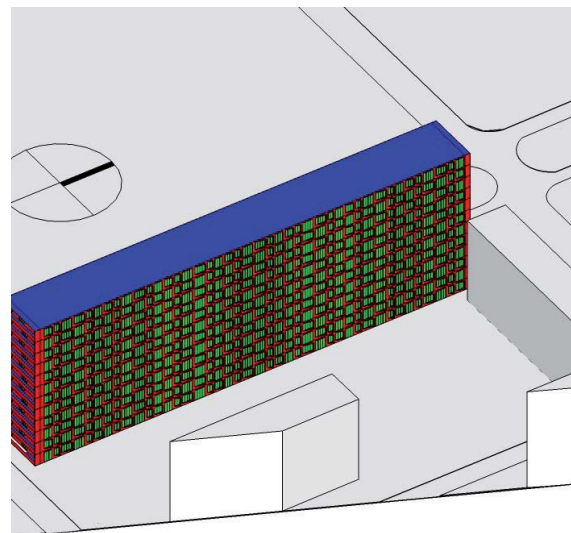


SHON : 14693.42  
 Compacité S/V : 0.391890165  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.5  
 % Vitrage Sud : 0.02



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 022 - B1 - csb



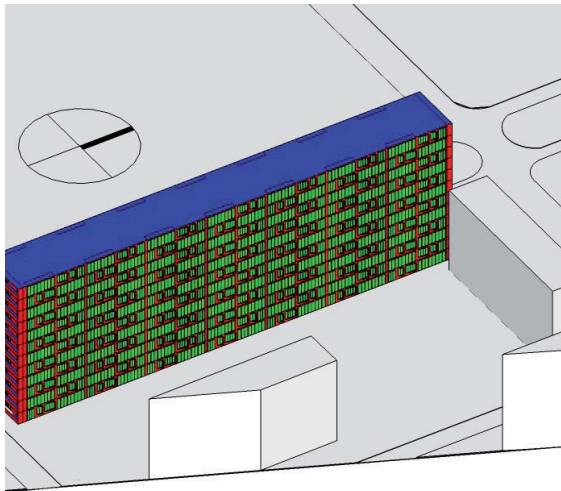
SHON : 14693.34  
 Compacité S/V : 0.391914147  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.5  
 % Vitrage Sud : 0.02



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans



## 023 - B2 - csb

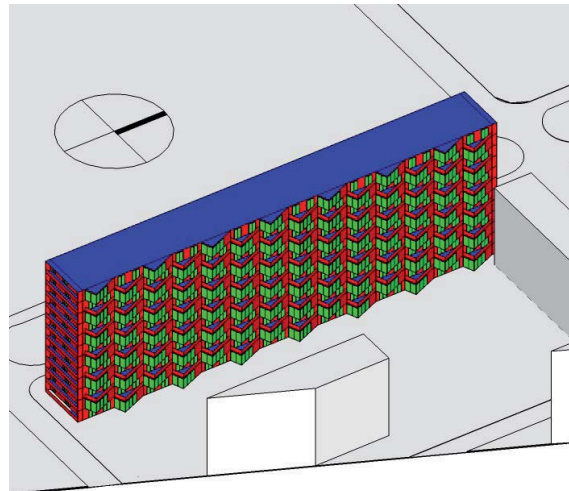


SHON : 15919.3  
 Compacité S/V : 0.391890678  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.3  
 % Vitrage Sud : 0.02



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 024 - B3 - csb

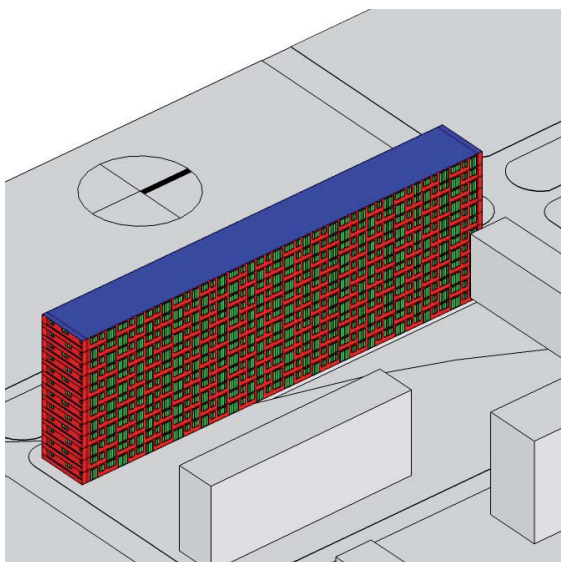


SHON : 15501.85  
 Compacité S/V : 0.392664607  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.3  
 % Vitrage Sud : 0.15



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 025 - B0 - csb

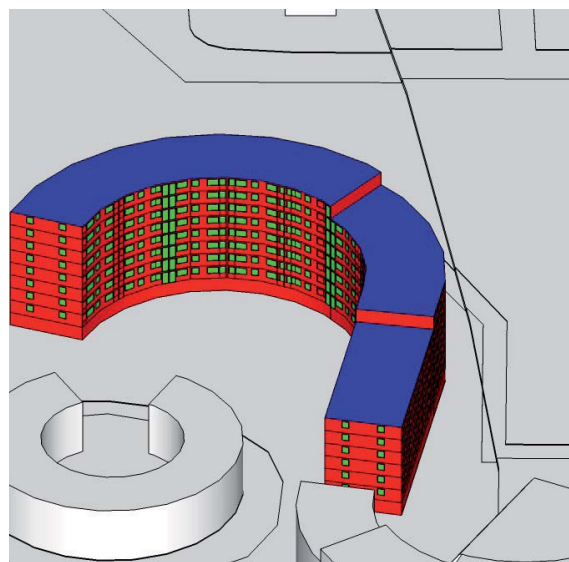


SHON : 14693.3  
 Compacité S/V : 0.391890165  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.5  
 % Vitrage Sud : 0.02



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 029 - B0 - sv

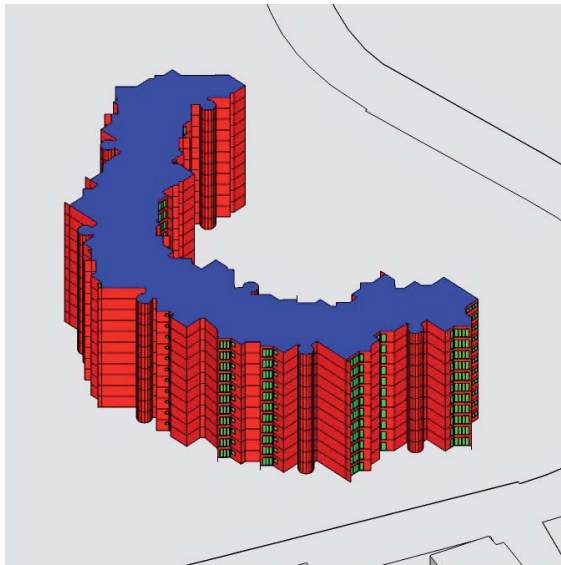


SHON : 20439.81  
 Compacité S/V : 0.36423756  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.5  
 % Vitrage Sud : 0.24



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 037 - B0 - sv



SHON : 18280.48  
 Compacité S/V : 0.444701821  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.5  
 % Vitrage Sud : 0.22



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 038 - B1 - sv

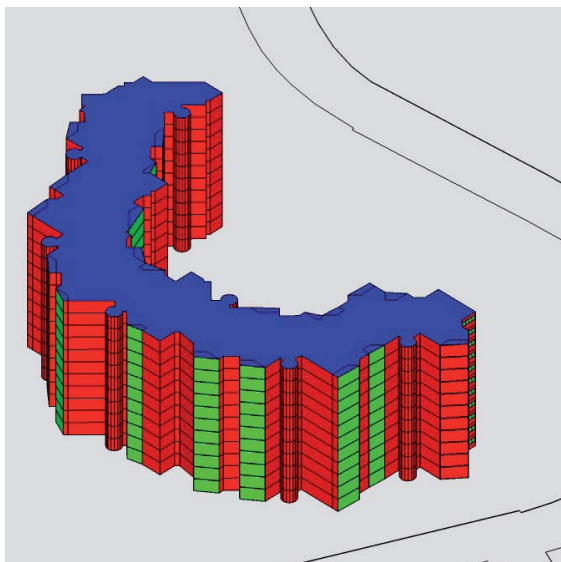


SHON : 18293.31  
 Compacité S/V : 0.444702301  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.5  
 % Vitrage Sud : 0.22



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 039 - B2 - sv

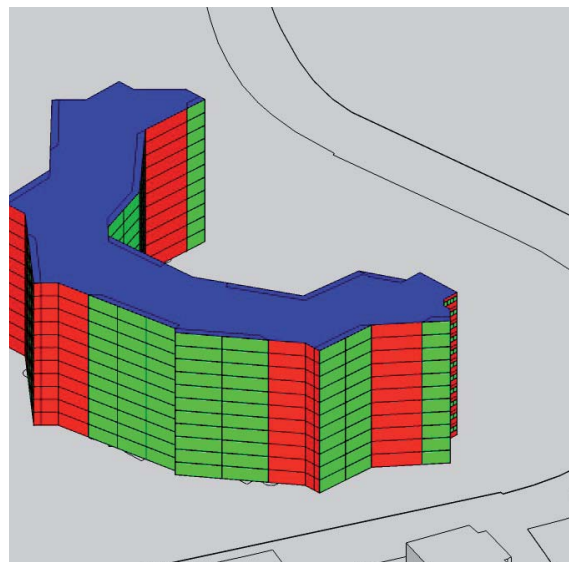


SHON : 19551.01  
 Compacité S/V : 0.44469468  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 9.4  
 % Vitrage Sud : 0.22



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 040 - B3 - sv

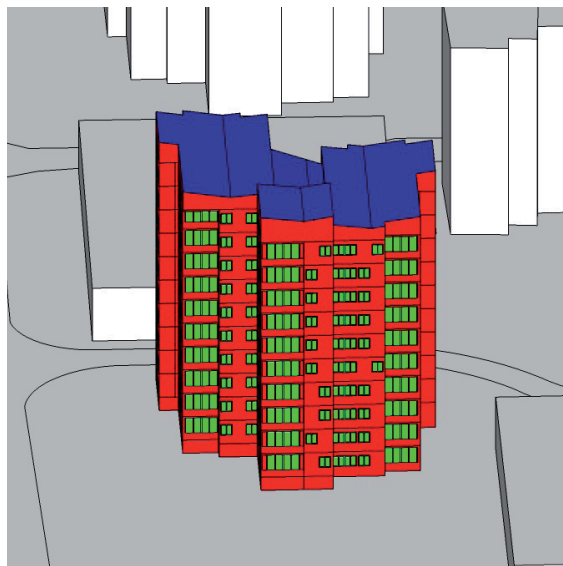


SHON : 20960.33  
 Compacité S/V : 0.444721459  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.6  
 % Vitrage Sud : 0.24



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

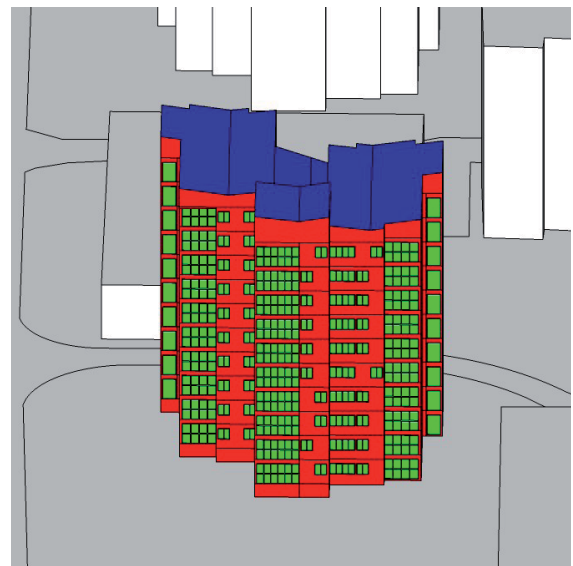
## 041 - T0 - csm



SHON : 5183.92  
 Compacité S/V : 0.394800629  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.4  
 % Vitrage Sud : 0.44

B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

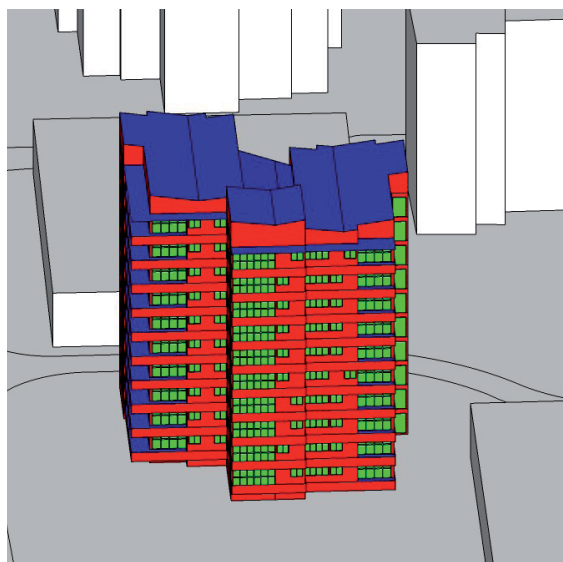
## 042 - T1 - csm



SHON : 5467.92  
 Compacité S/V : 0.395600726  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.2  
 % Vitrage Sud : 0.46

B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

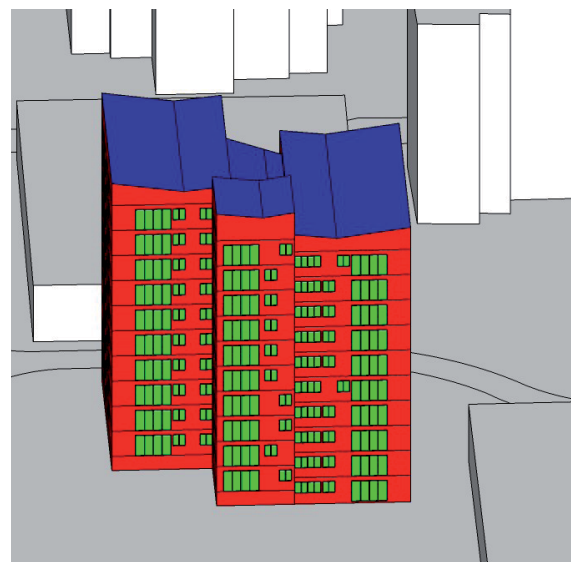
## 043 - T2 - csm



SHON : 5466.96  
 Compacité S/V : 0.39566459  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.2  
 % Vitrage Sud : 0.46

B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

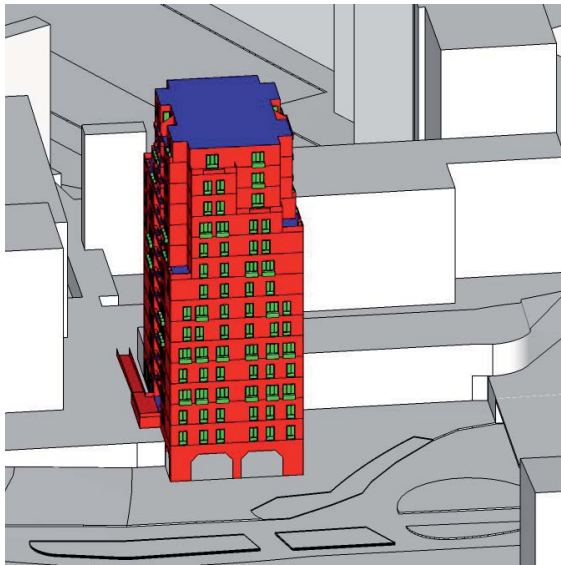
## 044 - T3 - csm



SHON : 6374.59  
 Compacité S/V : 0.395059538  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.2  
 % Vitrage Sud : 0.44

B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 049 - T0 - csm

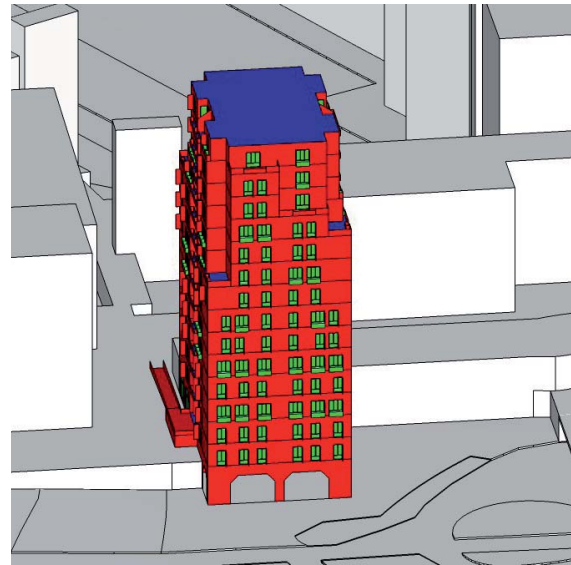


SHON : 4936.31  
 Compacité S/V : 0.402186651  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7  
 % Vitrage Sud : 0.25



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 050 - T1 - csm

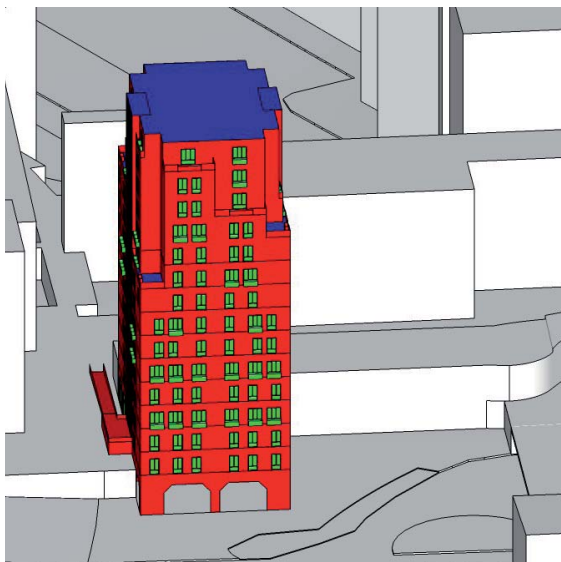


SHON : 4936.2  
 Compacité S/V : 0.402198042  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7  
 % Vitrage Sud : 0.26



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 051 - T2 - csm

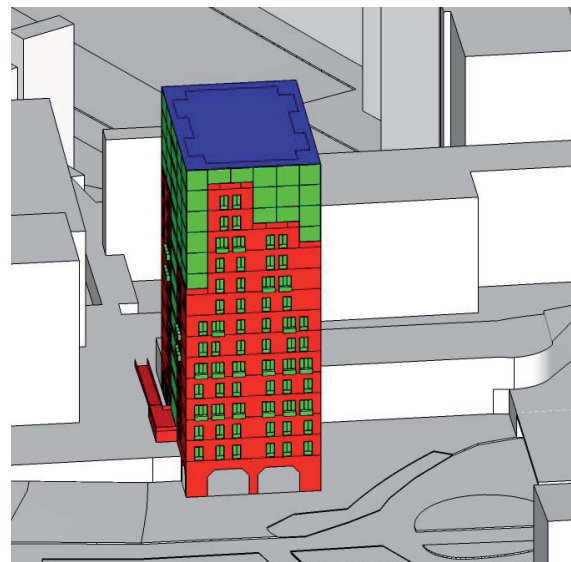


SHON : 5250.97  
 Compacité S/V : 0.402366884  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.4  
 % Vitrage Sud : 0.2



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 052 - T3 - csm



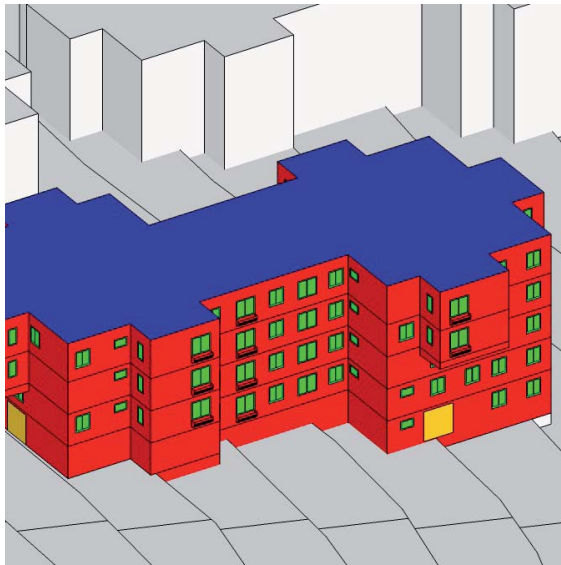
SHON : 5350.14  
 Compacité S/V : 0.382587031  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 4.8  
 % Vitrage Sud : 0.17



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans



## 053 - T0 - mf

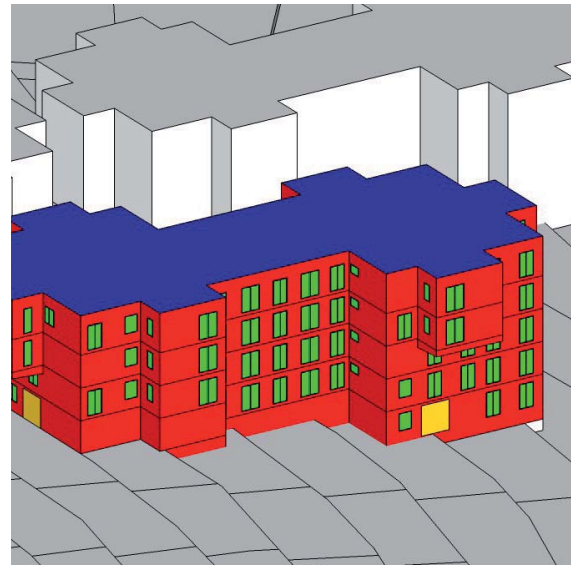


SHON : 3836.21  
 Compacité S/V : 0.336621886  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.6  
 % Vitrage Sud : 0.3



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 054 - T1 - mf

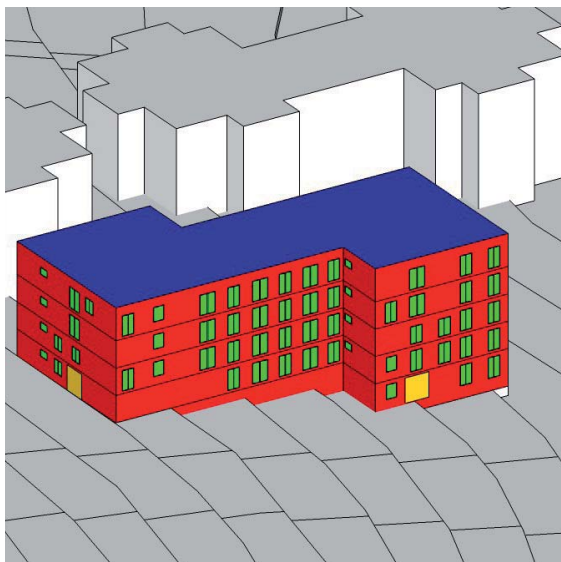


SHON : 3835.95  
 Compacité S/V : 0.336617825  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.6  
 % Vitrage Sud : 0.34



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 055 - T2 - mf

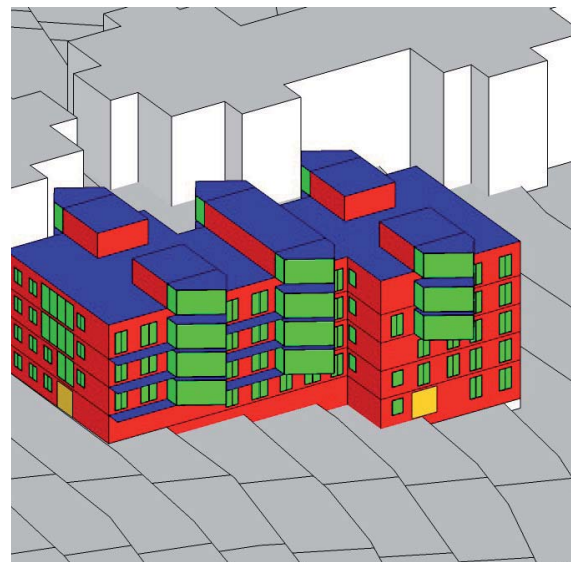


SHON : 3408.99  
 Compacité S/V : 0.336824166  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.1  
 % Vitrage Sud : 0.34



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 056 - T3 - mf



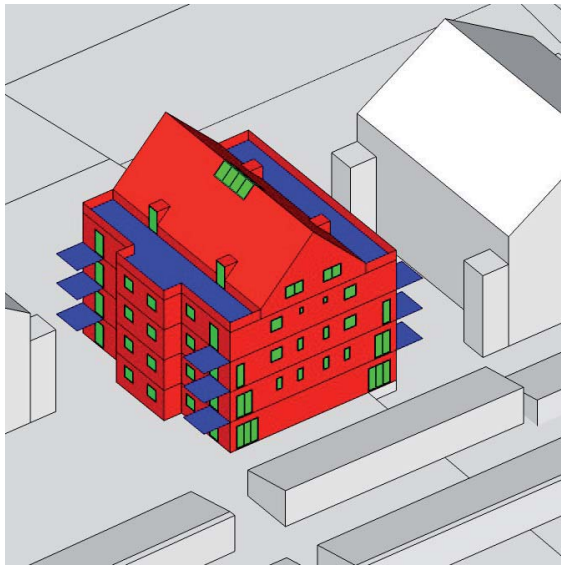
SHON : 4018.5  
 Compacité S/V : 0.34603542  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.3  
 % Vitrage Sud : 0.26



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans



## 057 - T0 - mf

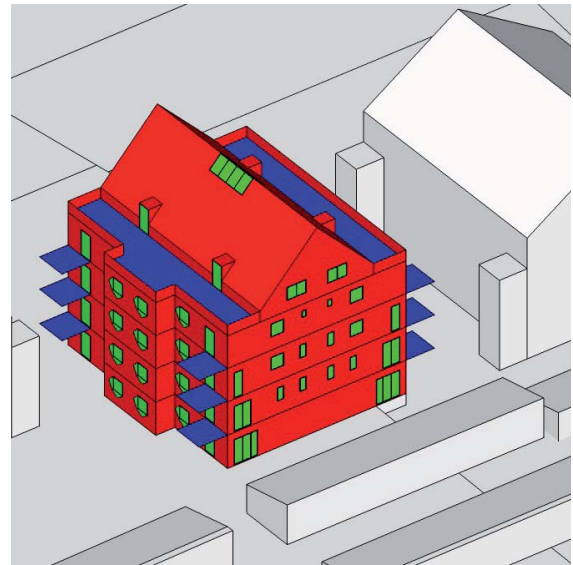


SHON : 1524.34  
 Compacité S/V : 0.356773985  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.2  
 % Vitrage Sud : 0.23



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 058 - T1 - mf

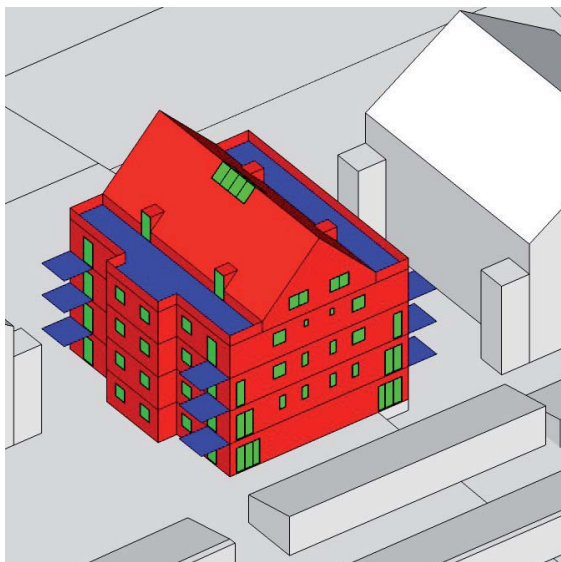


SHON : 1524.37  
 Compacité S/V : 0.356793983  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.2  
 % Vitrage Sud : 0.23



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 060 - T3 - mf

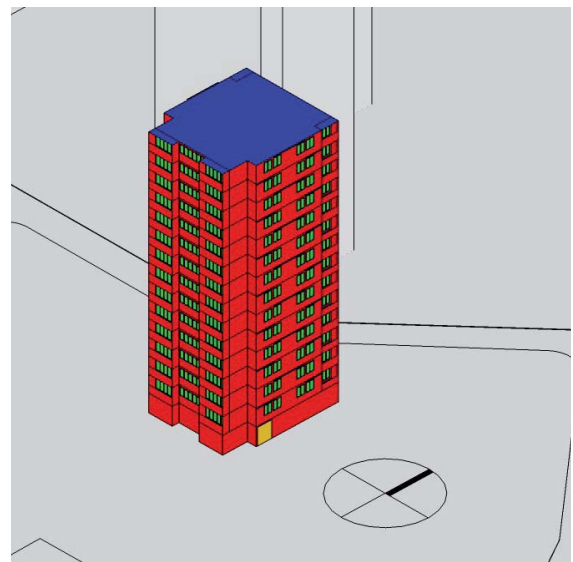


SHON : 1479.83  
 Compacité S/V : 0.35620951  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.1  
 % Vitrage Sud : 0.23



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 061 - T0 - csb

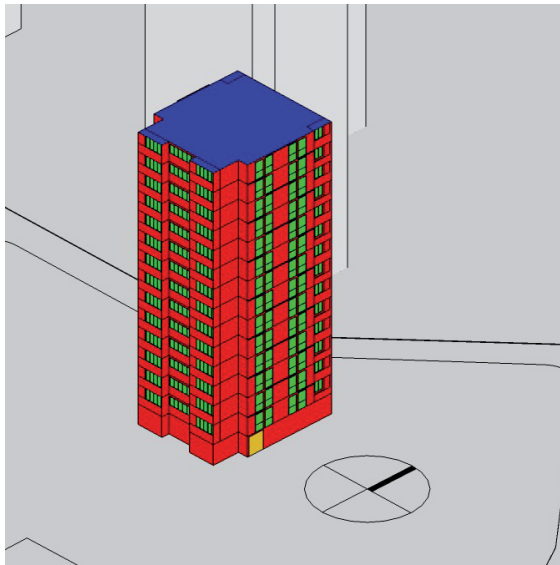


SHON : 5863.52  
 Compacité S/V : 0.326106182  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.5  
 % Vitrage Sud : 0.42



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 062 - T1 - csb

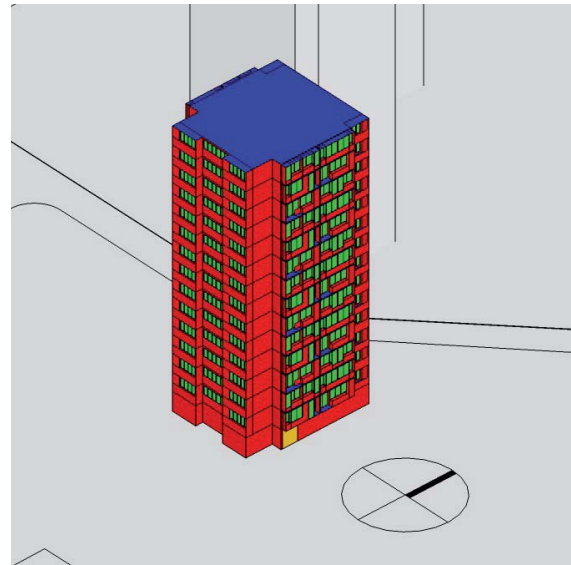


SHON : 5863.52  
 Compacité S/V : 0.326106182  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.6  
 % Vitrage Sud : 0.36



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 063 - T2 - csb

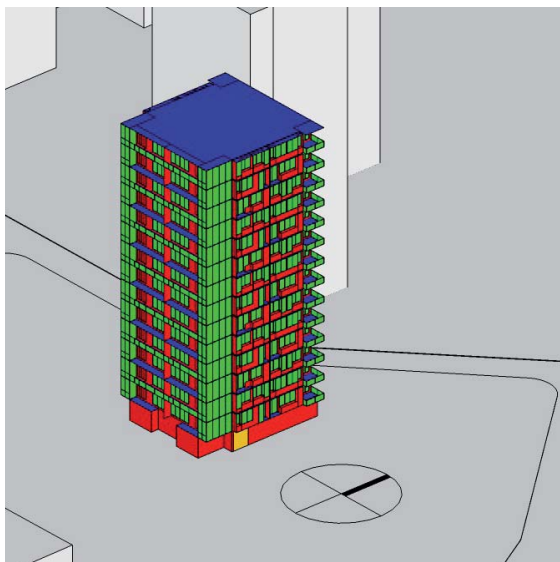


SHON : 6013.25  
 Compacité S/V : 0.32622652  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.6  
 % Vitrage Sud : 0.33



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 064 - T3 - csb

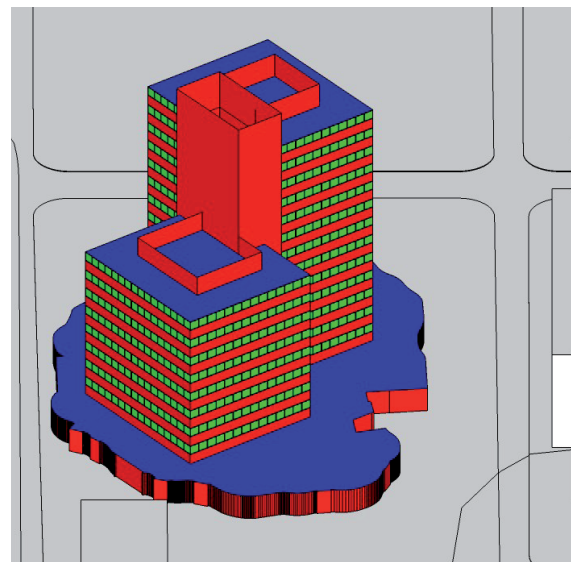


SHON : 6273.32  
 Compacité S/V : 0.326288429  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.8  
 % Vitrage Sud : 0.29



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 065 - T0 - csb

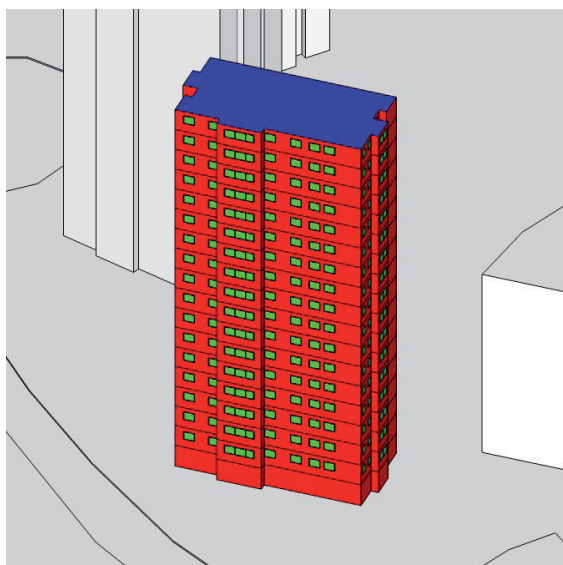


SHON : 9658.51  
 Compacité S/V : 0.381676235  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 8.2  
 % Vitrage Sud : 0.24



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 069 - T0 - sv

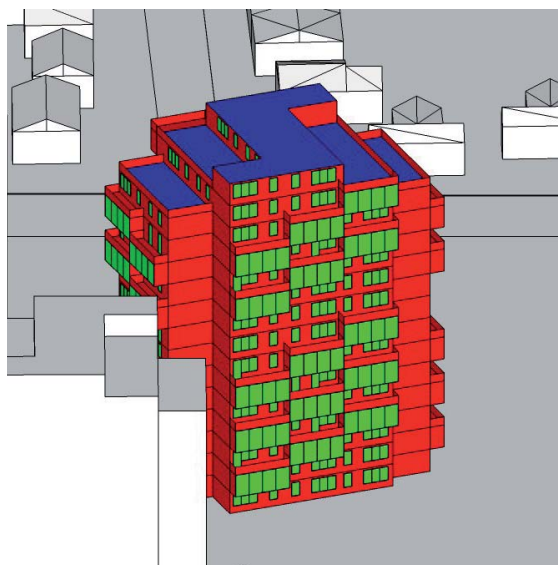


SHON : 6069.02  
 Compacité S/V : 0.362731791  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.3  
 % Vitrage Sud : 0.36



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 077 - T0 - sv

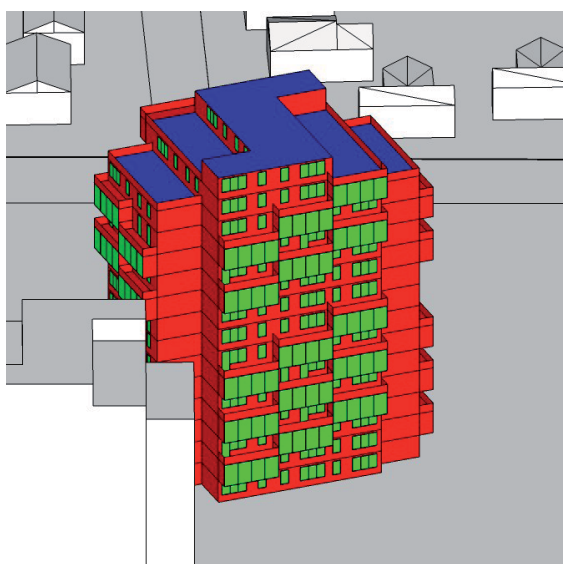


SHON : 8430.36  
 Compacité S/V : 0.407805175  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.4  
 % Vitrage Sud : 0.31



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 078 - T1 - sv

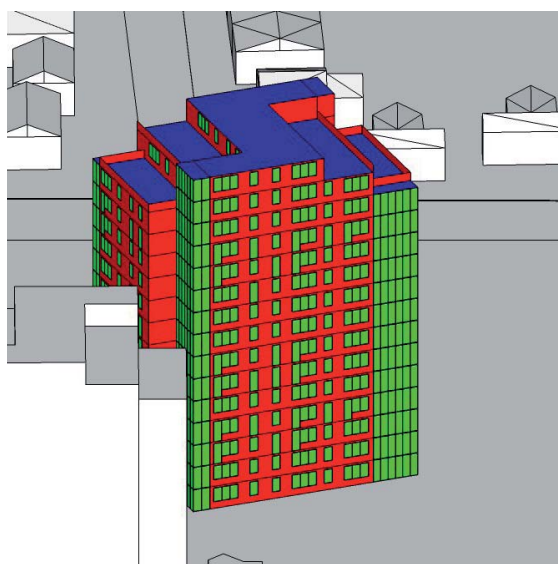


SHON : 9014.55  
 Compacité S/V : 0.408785266  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.4  
 % Vitrage Sud : 0.35



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

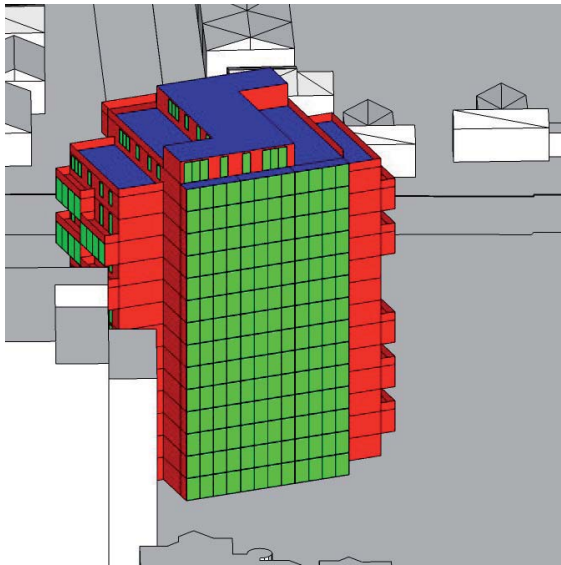
## 079 - T2 - sv



SHON : 9037.56  
 Compacité S/V : 0.407808223  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.5  
 % Vitrage Sud : 0.28



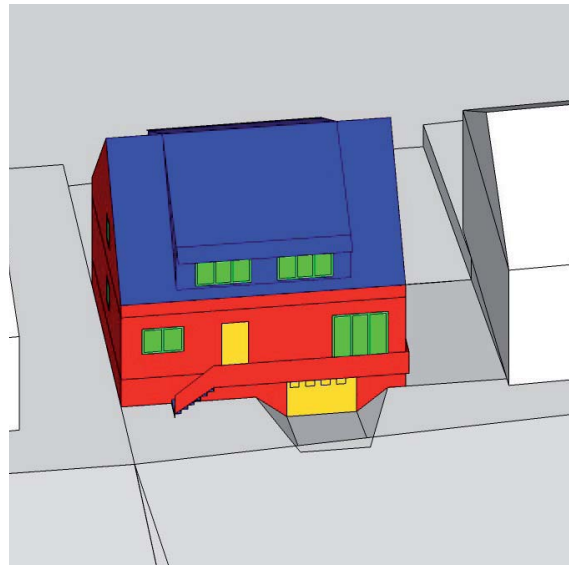
B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

**080 - T3 - sv**

SHON : 9317.49  
 Compacité S/V : 0.408469116  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.2  
 % Vitrage Sud : 0.49



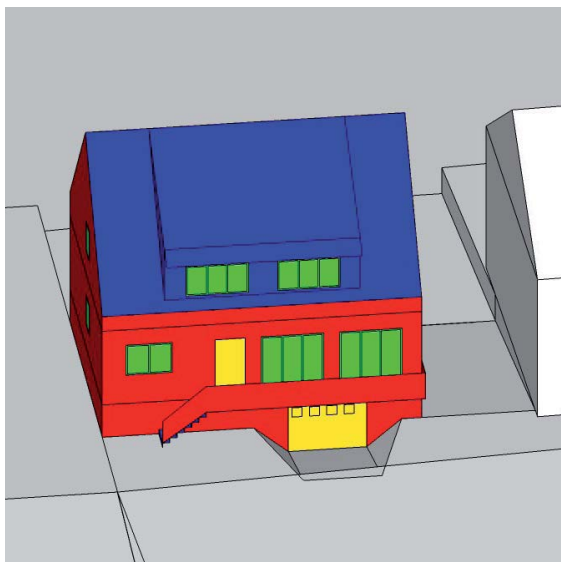
B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

**081 - P0 - csm**

SHON : 287.71  
 Compacité S/V : 0.355492438  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.7  
 % Vitrage Sud : 0.38



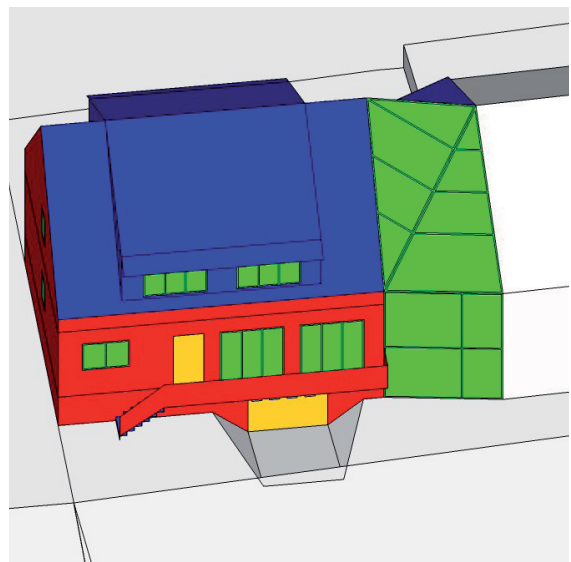
B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

**082 - P1 - csm**

SHON : 287.71  
 Compacité S/V : 0.355492438  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.7  
 % Vitrage Sud : 0.46



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

**083 - P2 - csm**

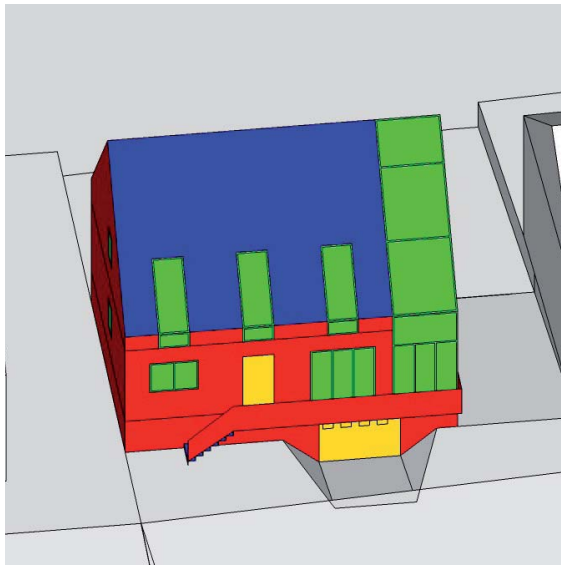
SHON : 326.34  
 Compacité S/V : 0.313443678  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.8  
 % Vitrage Sud : 0.63



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans



## 084 - P3 - csm

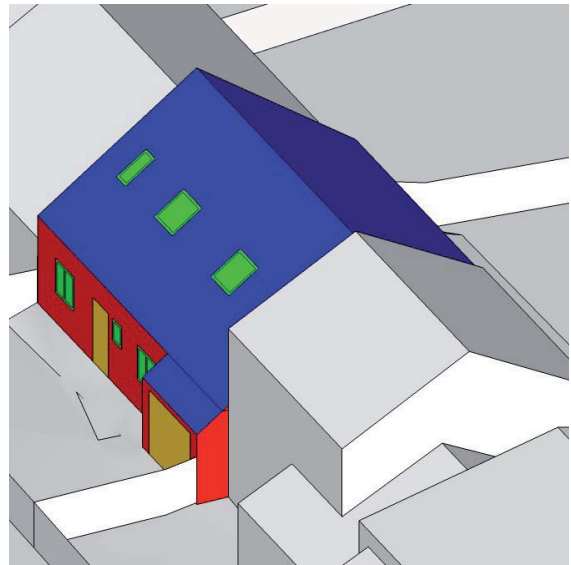


SHON : 256.16  
 Compacité S/V : 0.342651037  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6  
 % Vitrage Sud : 0.58



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 089 - P0 - csm

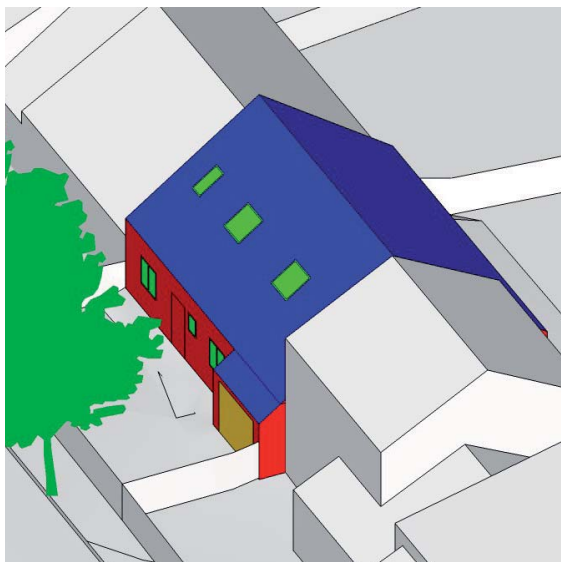


SHON : 168.95  
 Compacité S/V : 0.303525031  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.4  
 % Vitrage Sud : 0.08



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 090 - P1 - csm

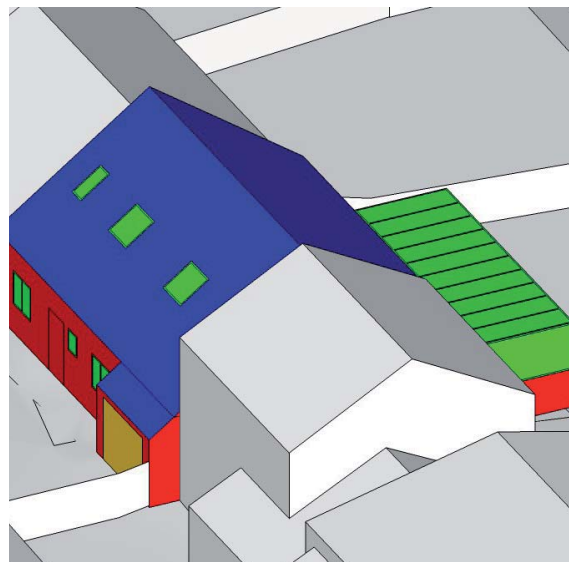


SHON : 168.94  
 Compacité S/V : 0.303525031  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.4  
 % Vitrage Sud : 0.08



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 091 - P2 - csm

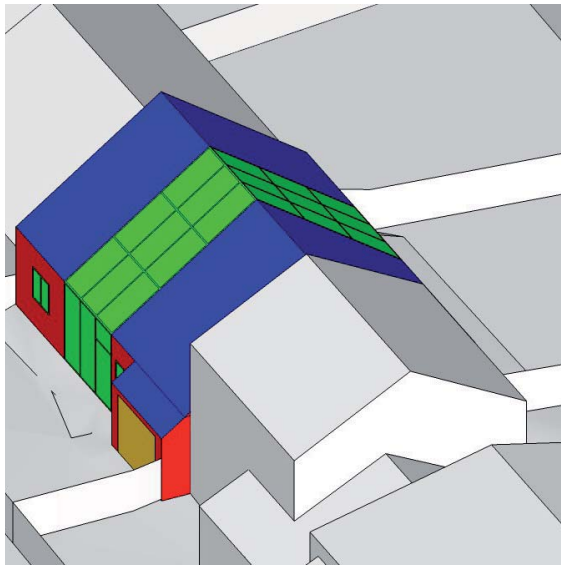


SHON : 196.17  
 Compacité S/V : 0.31407122  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.7  
 % Vitrage Sud : 0.09



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 092 - P3 - csm

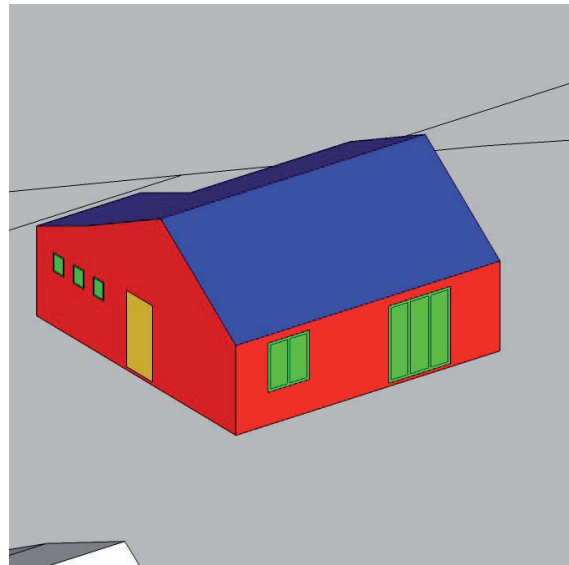


SHON : 161.19  
 Compacité S/V : 0.288516963  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.5  
 % Vitrage Sud : 0.1



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 093 - P0 - mf

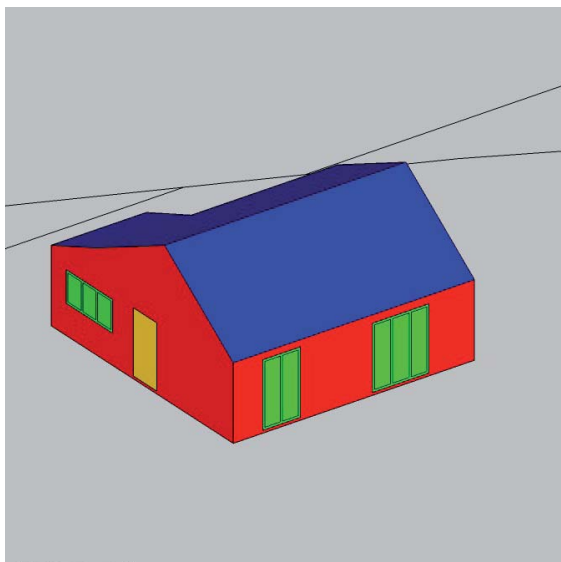


SHON : 77.94  
 Compacité S/V : 0.266427126  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.3  
 % Vitrage Sud : 0.4



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 094 - P1 - mf

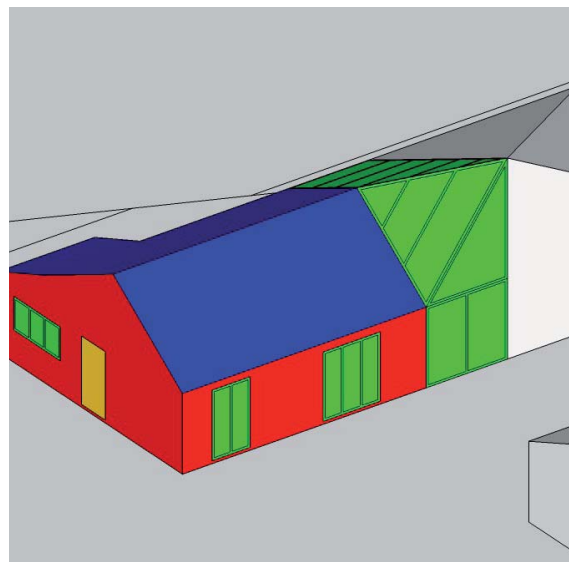


SHON : 77.94  
 Compacité S/V : 0.266427126  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.3  
 % Vitrage Sud : 0.42



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 095 - P2 - mf

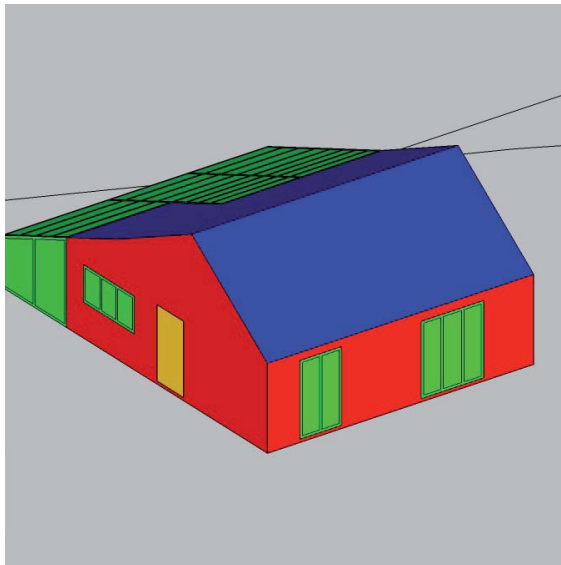


SHON : 100.07  
 Compacité S/V : 0.2547966  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.6  
 % Vitrage Sud : 0.33



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 096 - P3 - mf

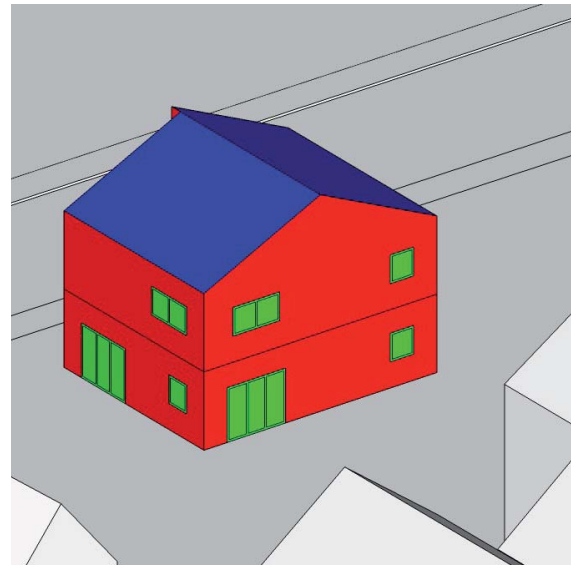


SHON : 118.58  
 Compacité S/V : 0.284690554  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.6  
 % Vitrage Sud : 0.1



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 097 - P0 - mf

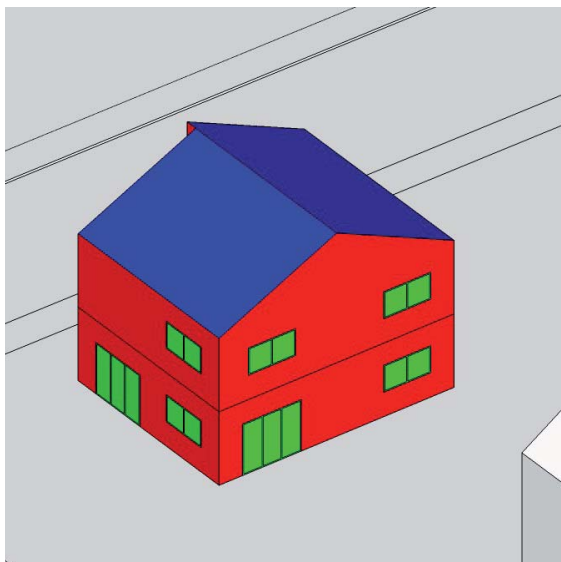


SHON : 182.46  
 Compacité S/V : 0.304744347  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.29



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 098 - P1 - mf

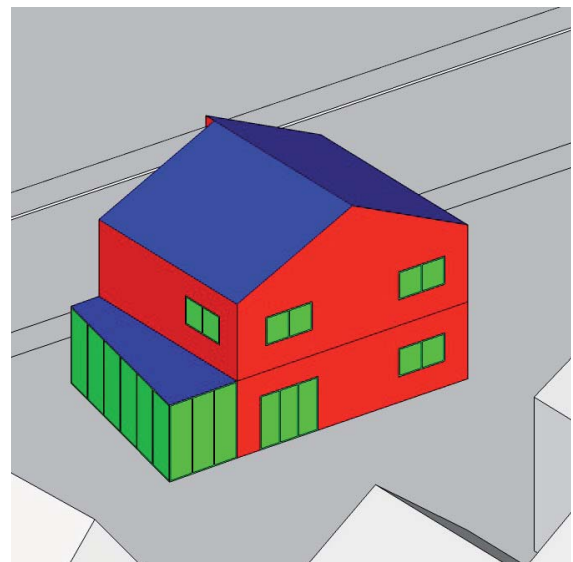


SHON : 182.46  
 Compacité S/V : 0.304744347  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.31



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 099 - P2 - mf

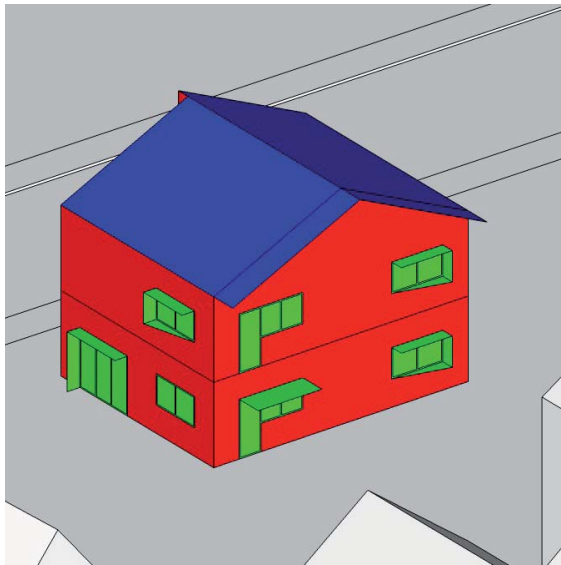


SHON : 196.03  
 Compacité S/V : 0.310364698  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.3  
 % Vitrage Sud : 0.28



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 100 - P3 - mf

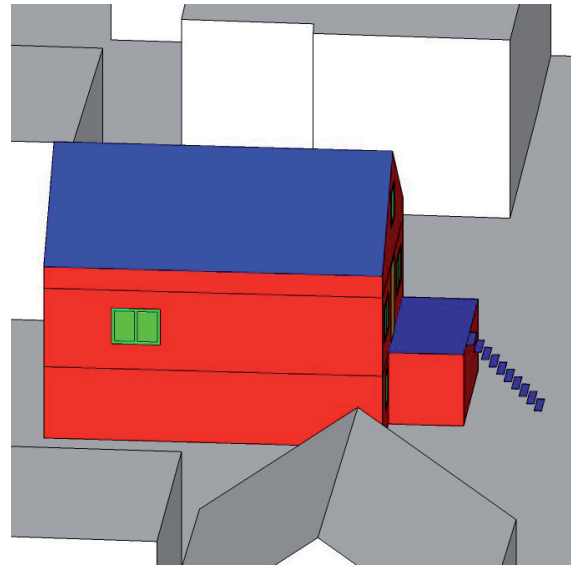


SHON : 174.92  
 Compacité S/V : 0.304677857  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.8  
 % Vitrage Sud : 0.31



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 101 - P0 - csb

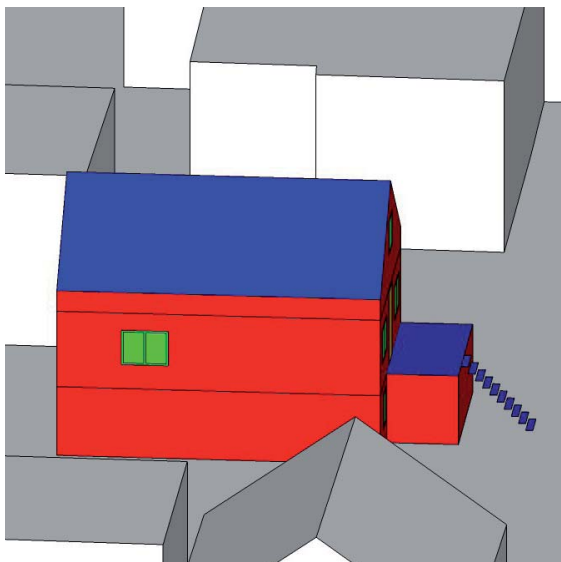


SHON : 154.06  
 Compacité S/V : 0.476724322  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.2  
 % Vitrage Sud : 0.1



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 102 - P1 - csb

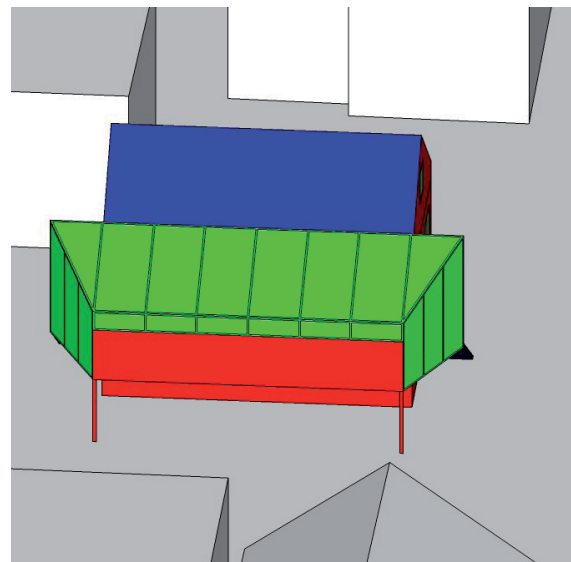


SHON : 154.06  
 Compacité S/V : 0.476724322  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.2  
 % Vitrage Sud : 0.1



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 103 - P2 - csb



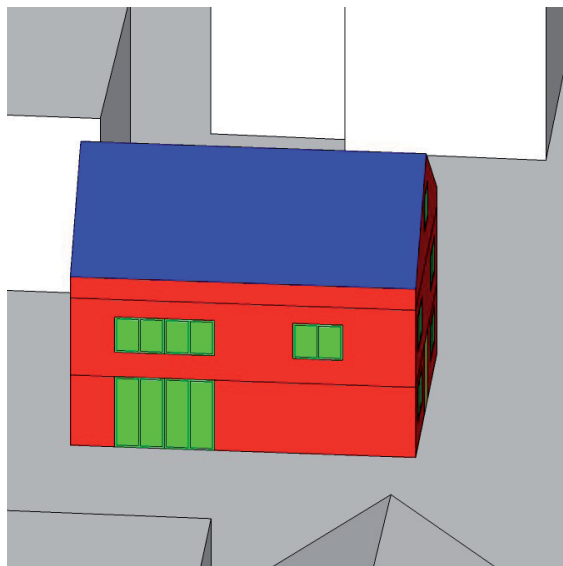
SHON : 180.46  
 Compacité S/V : 0.451964616  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 7.1  
 % Vitrage Sud : 0.54



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans



## 104 - P3 - csb

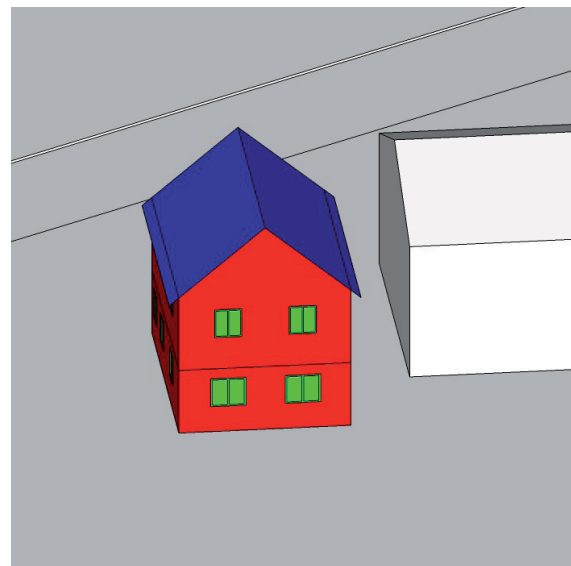


SHON : 145.07  
 Compacité S/V : 0.470315884  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.4



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 105 - P0 - csb

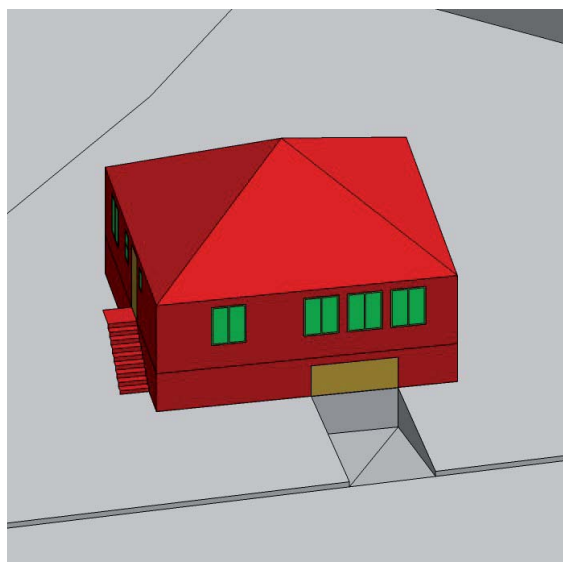


SHON : 124.66  
 Compacité S/V : 0.328213368  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.43



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 109 - P0 - sv

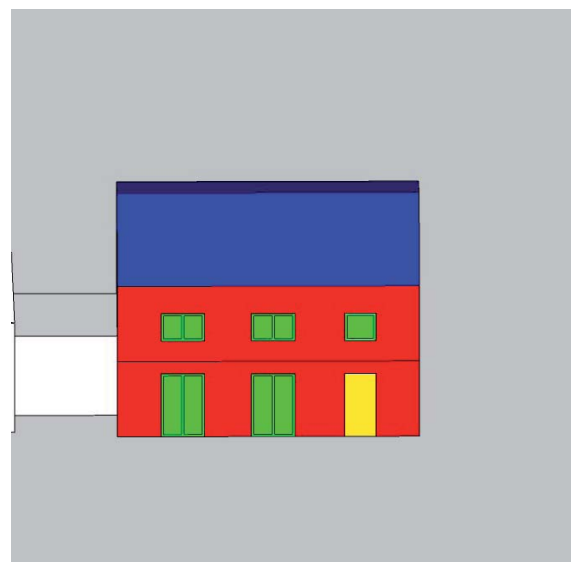


SHON : 205.97  
 Compacité S/V : 0.322517172  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.6  
 % Vitrage Sud : 0.59



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 117 - P0 - sv

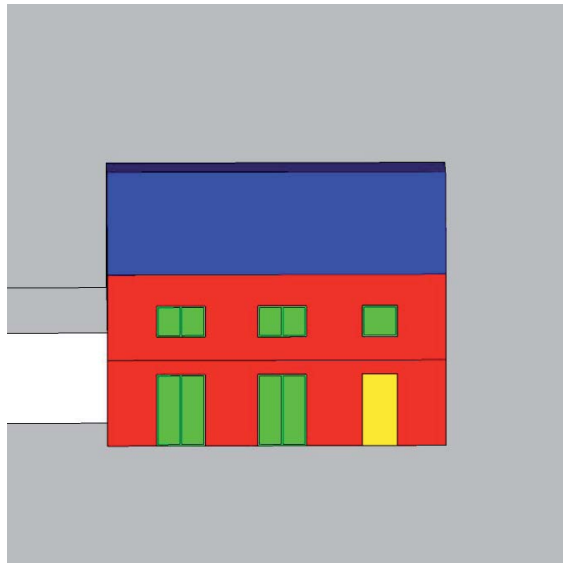


SHON : 148.25  
 Compacité S/V : 0.352988207  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.54



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevrans

## 118 - P1 - sv

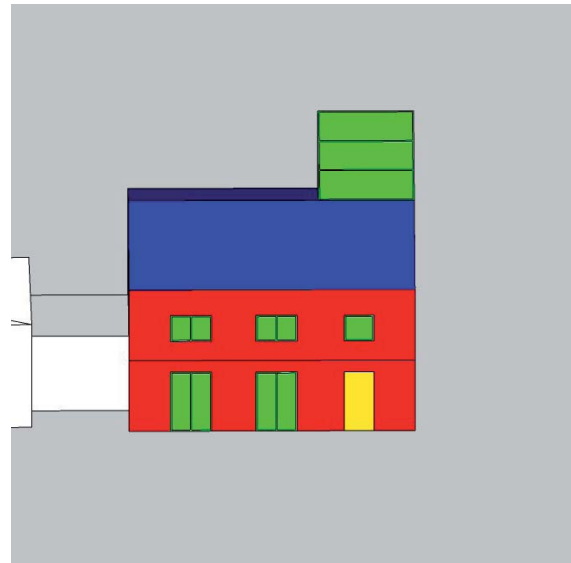


SHON : 148.25  
 Compacité S/V : 0.352988207  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 5.9  
 % Vitrage Sud : 0.54



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 119 - P2 - sv

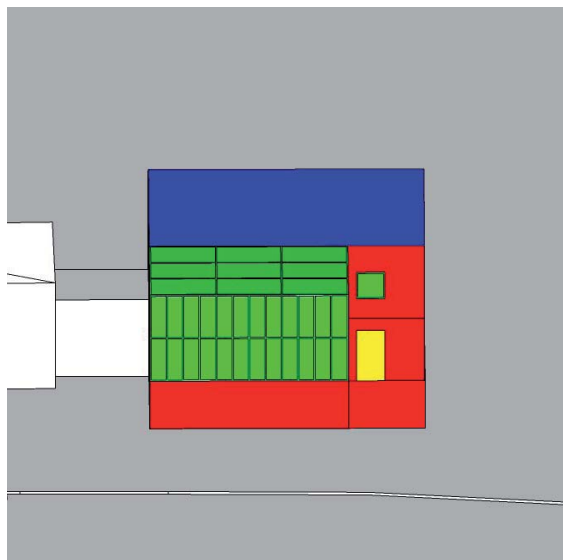


SHON : 148.25  
 Compacité S/V : 0.337519795  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.1  
 % Vitrage Sud : 0.72



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran

## 120 - P3 - sv



SHON : 172.75  
 Compacité S/V : 0.318009233  
 Compacité S/V<sup>2/3</sup> : 6.2  
 % Vitrage Sud : 0.27



B = Barre - T = Tour - P = Pavillon  
 0 = Etat initial - 1 = A minima - 2 = Plug - 3 = Enveloppe  
 csm = Champs-sur-Marne - mf = Montfermeil - csb = Clichy-sous-Bois - sv = Sevran



## Annexe 5

### Mémoires de Master « Matière à penser » liés au programme *Ignis mutat res*

Dans le cadre du séminaire « Matière à Penser » de 2013-2014 à l'Eavt, la plupart des étudiants de l'atelier de projet qui a produit les variations morphologiques des logements ont examiné, dans leur mémoire de Master, des aspects complémentaires de la réhabilitation énergétique et urbaine de la Dorsale Est. Les sujets traités sont les suivants :

Aïtcin, Estelle : L'analyse du cycle de vie des réhabilitations énergétiques, minimiser les impacts sur l'environnement ;

André, Pierre : Éclairage public économe en énergie, problème technique et enjeu urbain.

Aquaronne, Audrey : Le potentiel géothermique de la Dorsale Est ;

Biennu, Lou-Salomé : L'agriculture et la ville, potentialité, cohabitation ; l'agriculture peut-elle s'implanter de manière durable dans un tissu urbain existant ? ;

Bonnet, Emeline : L'intégration des serres solaires dans la réhabilitation des tours de logement, à quelles conditions la serre solaire est-elle une réponse énergétique et architectural efficace ? ;

Dillmann, David : Architecture solaire passive, réhabilitation de logements collectifs de la Dorsale Est ;

Fontaine, Laura : Transformations morphologiques et impacts sur la qualité des microclimats urbains, le potentiel des tissus urbains mixtes ;

Furet, Justine : Des gisements d'énergie dans le résidentiel, quelle échelle et quelle densité d'habitat permettent une valorisation optimale des énergies fatales issues du résidentiel ? ;

Gautard, Tristan : Le potentiel solaire de la Dorsale Est, l'autonomie énergétique grâce à l'énergie solaire est-elle possible ? ;

Hanart, Sophie et Joly, Alexiane : L'énergie fatale présente sur la Dorsale Est peut-elle servir de ressources à d'autres bâtiments ? ;

Marquis, Pierre : Algorithmes génétiques et lumière naturelle ;

Née, Lénéïk : Le petit éolien sur la Dorsale Est, les éoliennes en milieu urbain.

Rougier, Marie et Wilmart, Eléonore : Le confort en ville, étude de l'impact de la forme urbaine sur le confort du piéton ;

Sabri, Amine : Le biogaz dans la Dorsale Est, l'énergie des eaux usées pour la réhabilitation des grands ensembles ;

Virolleau, Antoine : Toitures existantes, énergie solaire et réhabilitation des villes.



---

## **Annexe 6**

### **Rapport « Relation entre morphologie et performance énergétique. La recherche d'indicateurs morpho-énergétiques »**





**Mémoire de master**

Janvier 2014

Directeurs de mémoire

Jean-François Blassel

Pascale Joffroy

Relation entre morphologie et performance énergétique

**La recherche d'indicateurs morpho-énergétiques**

Réda Oussennan



**Réda Oussennan**

Mémoire de master  
Matières à penser  
Janvier 2014

Directeurs de mémoire  
Jean-François Blassel  
Pascale Joffroy

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier, Madame Pascale Joffroy et Monsieur Jean-François Blassel, référents du mémoire, qui m'ont encadré et aidé dans mon travail.

Je souhaite également remercier la structure RFR éléments et Monsieur Benjamin Cimerman, directeur du bureau d'étude environnementale RFR éléments, de m'avoir accueilli dans le cadre d'un stage de recherche. J'ai pu ainsi profiter des connaissances très pointues de l'ensemble des protagonistes de RFR éléments en terme de conception bioclimatique. J'exprime notamment toute ma reconnaissance pour la disponibilité et la patience que m'ont accordées les membres du pôle « stratégie et conseil » avec qui j'ai pu échanger de manière privilégiée au cours de mon stage de deux mois.

Je tiens également à remercier Guillaume Menier et Marc Fouquet qui m'ont prodigué des conseils avisés tout au long de mon investigation.

Je remercie les acteurs du programme de recherche pluridisciplinaire *Ignis Mutat Res* qui m'ont soutenu au cours de cette démarche scientifique et tout particulièrement Laetitia Arantes qui m'a présenté la thèse qu'elle prépare actuellement au CSTB sur l'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Introduction</b>  | <b>1</b>   |
| <b>1 ` Morphogénèse énergétique</b>  | <b>5</b>   |
| 1`1 Problématique morpho-énergétique   | 5          |
| 1`2 Les enjeux de la recherche d'indicateurs morphologiques                  | 11         |
| 1`3 Le domaine d'application et les précautions d'emploi des indicateurs     | 15         |
| <b>2 ` Objets d'analyse</b>  | <b>23</b>  |
| 2`1 Cadre spatial : la Dorsale Est comme territoire périurbain représentatif | 23         |
| 2`2 Cadre programmatique : la prépondérance et la variété des logements      | 25         |
| 2`3 Objets d'étude : prolongement des travaux initiés par des étudiants      | 27         |
| <b>3 ` Hypothèses et outils d'analyse</b>                                    | <b>33</b>  |
| 3`1 La nécessité d'une démarche d'analyse rigoureuse                         | 33         |
| 3`2 Hypothèses d'analyse originales et corrigées                             | 35         |
| 3`3 Variabilité des paramètres morphologiques étudiés                        | 41         |
| 3`4 Outils d'analyse : simulation thermique réglementaire                    | 41         |
| <b>4 ` Recherche d'indicateurs morpho-énergétiques</b>                       | <b>47</b>  |
| 4`1 Extraction des données : caractéristiques du projet étudié               | 47         |
| 4`2 Exploitation et comparaison des résultats de performance énergétique     | 57         |
| 4`3 Création d'indicateurs morphologiques commentés                          | 85         |
| 4`4 Corrélation entre Forme et Énergie                                       | 117        |
| <b>Conclusion</b>  | <b>127</b> |
| <b>Résumé</b>  | <b>131</b> |
| <b>Annexe</b>  | <b>143</b> |
| <b>Bibliographie</b>   | <b>181</b> |

Cette réflexion fait partie intégrante du programme de recherche interdisciplinaire *Ignis Mutat Res*, mené conjointement par l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée et l'école des Ponts Paristech, et à l'initiative du Ministère de la Culture. Les ambitions du groupement scientifique que nous tenterons de prolonger sont les suivantes :

*« La « typomorphologie énergétique » ainsi construite constituera un outil de conception, de prévision et de repérage dans l'éventail des postures d'intervention possibles, à l'usage des urbanistes et des architectes : quel comportement énergétique peut-on associer à tel type de forme dans tel type d'environnement à telle période – qu'il soit ou non bâti ? »*

# Introduction

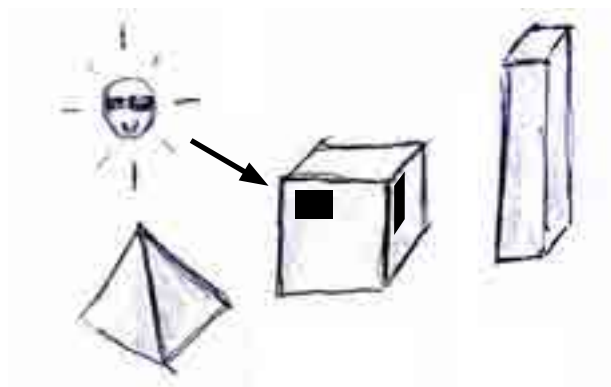
« *L'énergie va sérieusement bouleverser nos habitudes* », affirme Dennis Meadows<sup>1</sup>. L'énergie, comme nouveau paramètre, a profondément investi le domaine de l'architecture sans pour autant être fondée sur des bases conceptuelles solides. La plupart des architectes n'ont pas eu le temps d'appréhender pleinement cette notion, d'une part, car elle s'est imposée trop rapidement par le biais d'un cadre réglementaire souvent rébarbatif et, d'autre part, du fait qu'elle est intimement liée à des scénarios prospectivistes difficiles à établir. De fait, on parle d'énergie soit de manière instinctive en revendiquant des réflexes architecturaux ancestraux comme la bienfaisance de l'orientation vers le sud, soit par le biais de calculs complexes et fastidieux.

La finalité ultime de l'investigation qui va suivre est d'anticiper le comportement énergétique d'un bâtiment ou d'un projet uniquement par des considérations simples et intelligibles de nature typo-morphologique. Cette entreprise semble a priori complexe car la performance énergétique d'un bâtiment dépend de nombreux facteurs tels que la forme, la composition matérielle de l'enveloppe, la variabilité des conditions climatiques ou les habitudes d'occupation des usagers. Dans cette étude, cette complexité multicritère n'est pas éludée mais l'approche est focalisée sur le paramètre « Forme » dans le but de clarifier les analyses tout au long de la recherche. Pour cela, des hypothèses standards et constantes ont été formulées afin de pouvoir comparer clairement les performances énergétiques et les caractéristiques morphologiques de plusieurs bâtiments. Une fois ces précautions établies, il faut vérifier s'il est possible d'établir une relation directe entre forme et performance énergétique. L'influence de la géométrie sur les besoins ou l'incidence du vitrage et de l'orientation sur les apports solaires sont autant de postulats que nous tenterons de décrypter objectivement.

Pour cela, il faut se munir d'outils d'analyse comparative. La palette des experts en étude environnementale regorge de méthodes et de calculs précis mais fastidieux. Au cours de cette analyse, nous aurons recours à des outils calculables au coin d'une table par tous concepteurs : à savoir les **indicateurs morpho-énergétiques**. Ces indicateurs pullulent dans la littérature spécialisée et seront testés selon une procédure de recherche rigoureuse. L'incontournable compacité sera passée au crible pour vérifier ces propos :

---

<sup>1</sup> *Preparing cities for the age of declining oil*, Conf. à l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée.



I-01

L'architecture est désormais « *le jeu savant correct et magnifique des volumes assemblés* »<sup>1</sup> sous le soleil. Énergie et lumière sont des thématiques incontournables.

#### **I-01. Forme et énergie**

Croquis de volumes sous le soleil

*Document créé pour l'étude :*

*Réda Oussennan*

---

<sup>1</sup> Le Corbusier, *Vers une architecture*, éditions Crès et Cie, Paris, 1923.

Formulation inspirée de la fameuse définition établie par Le Corbusier :

« *L'architecture est le jeu, savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière.* »

« de nombreuses recherches ont montré l'influence de la compacité et de la volumétrie du bâtiment sur ses besoins de chauffage : plus un bâtiment est compact, plus ses besoins de chauffage sont réduits »<sup>2</sup>. Finalement, « La question est de savoir si la relation forme et énergie peut se quantifier par des outils simples », i.e. :

**Peut-on corréler indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique d'un projet afin de créer des outils d'aide à la conception bioclimatique ?**

Voulus les plus simples possibles, ces indicateurs morpho-énergétiques donneront l'occasion, une fois leur pertinence validée, de guider la conception en phase d'esquisse ou de corroborer rapidement des suppositions instinctives par des preuves fiables. Le pouvoir décisionnel de ces indicateurs aura plus valeur en tant qu'ordre de grandeur que comme résultat absolu. A l'instar des pré-dimensionnements structurels, ils permettront d'obtenir des informations rapides exploitables « sur la planche à dessin » avant d'effectuer des simulations thermiques plus fines. Seront ainsi renseignés le domaine d'application de l'indicateur, son sens physique et les interprétations architecturales possibles conformément aux préconisations proposées par Serge Salat<sup>3</sup>.

Pour tester les indicateurs, il est préférable de se doter d'un terrain de jeu pertinent. La Dorsale Est, définie par Yves Lion<sup>4</sup>, présente un potentiel démographique, économique, social et bâti indéniable et a été préalablement étudiée par les étudiants du Master « *Matières à penser* ». Parce que ce territoire est représentatif de l'habitat périurbain des grandes métropoles, les analyses porteront sur le logement dans toute sa diversité typologique. Des situations saisonnières (été et hiver) et scénarios prospectivistes<sup>5</sup> (actuel et 2050) seront considérés compte tenu de la nature irrémédiablement variable de l'énergie au cours du temps.

---

2 Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.

3 Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.

4 Définition créée pour le commissariat du Pavillon de la France à la Biennale de Venise, 2012.

5 Scénarios établis par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Quatrième rapport d'évaluation : *Changements climatiques 2007* ([www.ipcc.ch/report](http://www.ipcc.ch/report)).



# 1 Morphogénèse énergétique

## 1.1 Problématique morpho-énergétique

### 1.1.1 Intérêt de la recherche morpho-énergétique pour la réhabilitation de l'existant

*« Nous cherchons à corréler les formes bâties et non-bâties, existantes ou réhabilitées, avec leur performance énergétique. On sait qu'aujourd'hui, en France, plus de la moitié du parc bâti est antérieur à 1975, et que la réhabilitation de ce parc particulièrement énergivore constitue un enjeu majeur dans la réduction des dépenses énergétiques. Compte-tenu de l'importance quantitative de ce parc au regard des constructions neuves, c'est à ces tissus et bâtis existants, qui représentent à la fois un fort potentiel d'amélioration et un des programmes majeurs de réhabilitations énergétiques, que nous nous intéresserons. »<sup>6</sup>*

Ce mémoire faisant partie intégrante du programme de recherche *Ignis Mutat Res*, des enjeux communs se sont révélés. Dans le cas d'une étude énergétique, la réhabilitation de bâtiments prend tout son sens car le potentiel énergétique latent des bâtiments existants est inexploité ou exploité minoritairement dans la plupart des cas. La précarité énergétique du parc immobilier vieillissant, attendant à des raisons historiques, doit être combattue sous peine de voir le fossé entre logements anciens et habitations neuves, labellisées à foison, se creusait davantage. Ce mémoire a vocation à concentrer son énergie sur ce potentiel latent plutôt que d'imaginer des solutions neuves plus facilement viables d'un point de vue énergétique.

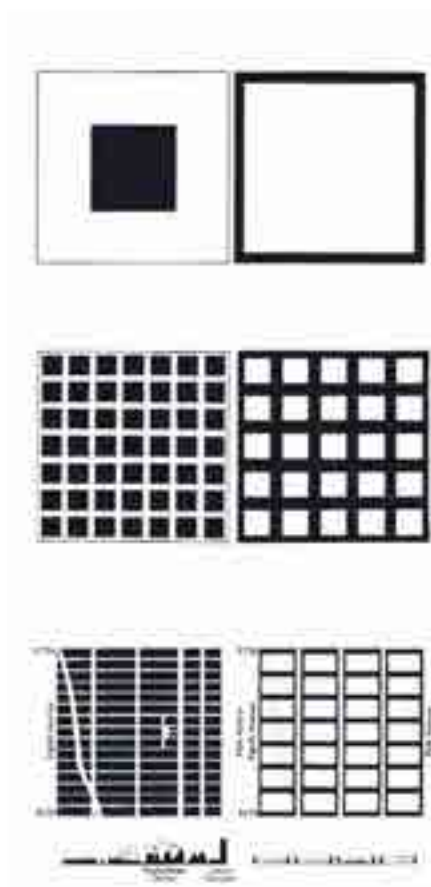
### 1.1.2 Lien entre forme et énergie par la corrélation entre indicateurs et besoins énergétiques

Du point de vue théorique, ce mémoire possède des affinités avec le travail de recherche effectué par Laetitia Arantes dans le cadre de sa thèse. Un des chapitres de son rapport *« cherche à analyser la relation potentielle entre "énergie" »*

---

6 Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, *Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res*, novembre 2013.





1-01



1-02

**1-01. Forme et potentiel à l'échelle urbaine**  
Carlo Ratti, Dana Raydan, Koen Steemers,  
« *Building form and environmental performance :  
archetypes, analysis and arid climate.* »

**1-02. Etude typo-morphologique**  
Depecker Patrick, « *Design of building shape  
and energetic consumption* », *Building and  
Environment*, n°36, 2001.

*et morphologie à l'échelle du bâtiment. Ces vingt dernières années, de nombreuses recherches ont montré l'influence de la compacité et de la volumétrie du bâtiment sur ses besoins de chauffage : plus un bâtiment est compact, plus ses besoins de chauffage sont réduits. La question est de savoir si la relation forme et énergie peut se quantifier par des outils simples. »<sup>7</sup>*

Comme le soulève Laetitia Arantes, de nombreux écrits ont vu le jour sur cette question d'une morphogénèse énergétique à l'échelle du bâtiment ou même de la ville. L'objectif de ce mémoire est donc de suivre le chemin tracé par des experts en la matière tels que Serge Salat, Carlo Ratti ou encore Patrick Depecker (*figure 1-01 et 1-02*). La question du lien entre forme et énergie semble pertinente car cette relation est corroborée par la pratique architecturale de tous les jours. Une serre orientée sud à 45° captera toujours plus d'apports solaires qu'une serre orientée au nord. Ce genre de considérations qui relève du bon sens commun présente cependant des limites quand la forme du bâtiment devient plus complexe. Ainsi, l'idéal du bâtiment énergétiquement performant n'est pas actuellement appuyé sur des bases conceptuelles solides et bien définies alors que la performance énergétique s'apprécie très objectivement par des paramètres physiques intelligibles et mesurables :

*« La variable énergétique est certes très réductrice mais elle présente l'avantage d'être une mesure quantitative facile à appréhender et interpréter. Nous rejoignons à ce titre les propos de Serge Salat selon qui « la consommation énergétique des villes obéit à des lois d'évolution simples issues de la physique et la thermodynamique » [Salat, 2007b, p.161]. »<sup>8</sup>*

La raison principale de ce paradoxe provient du fait que la relation entre énergie et forme est difficilement discernable. Cette relation est constamment soumise à préjugés car l'appréciation rapide et hâtive prévaut sur le calcul. En réalité, il est difficile d'anticiper le comportement énergétique d'un bâtiment puisque celui-ci est fonction des conditions climatiques changeantes sur le court et le long terme, de la morphologie du projet ou encore de son occupation future et des matériaux qui le composent.

En règle générale, la relation « Forme-Energie » est établie soit de manière rapide mais instinctive et donc peu fiable, soit vérifiée en aval du projet par des simulations thermiques dynamiques très chronophages. Il n'existe pas d'entre-deux, pas d'outils crédibles et démocratisés qui permettent aux architectes et ingénieurs de corroborer efficacement et rapidement des intuitions. De fait, les concepteurs n'ont pas la main mise sur la question énergétique qui possède désormais un fort pouvoir décisionnel. Se doter d'un outil permettrait d'orienter ou même d'infléchir certains choix architecturaux. Dans l'idéal, il faudrait trouver un moyen simple de lier forme et énergie pour combler ce manque.

---

<sup>7</sup> Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012, p.84.

<sup>8</sup> *ibid.*



D'où le premier questionnement sur le sujet :

**Est-il possible d'établir un lien simple entre forme et efficacité énergétique d'un bâtiment ?**

Pour l'instant, la question est monopolisée par les experts thermiciens qui légitiment leur exclusivité sur le sujet par des calculs certes pointus mais fastidieux. Comment les architectes, éternels manipulateurs de la forme des bâtiments, peuvent-ils s'emparer de la question ? L'indicateur morphologique semble un des outils simples d'utilisation qui pourrait s'imposer ultérieurement. Seul hic, sa fiabilité et son côté un peu mystérieusement miraculeux limite son exploitation. La fin ultime de cette investigation est de trouver des indicateurs qui soient, d'une part, les plus fiables possibles dans leur relation aux besoins énergétiques et, d'autres part, renseignés pour que leur utilisation ne soit pas détournée à tort. Pour atteindre ce but et donner un outil de démonstration à l'argumentaire qui va suivre, nous formulerons la question ainsi :

**Peut-on corrélérer indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique d'un projet afin de créer des outils d'aide à la conception bioclimatique ?**

**1<sup>er</sup> 3 Questionnements sous-jacents sur l'adaptation au changement climatique**

Cette recherche d'indicateurs sous-tend d'autres problématiques qu'il est nécessaire de considérer afin de nourrir la discussion et de donner un cadre concret et ancré dans la réalité à cette recherche. En effet, le contexte climatique actuel confère une légitimité et un grand intérêt à cette investigation morpho-énergétique car les importants changements climatiques à venir vont irrémédiablement conditionner nos réflexes architecturaux. Bouleversant ainsi nos habitudes, il est impératif de se questionner sur l'évolution des besoins.

Comment s'adapter aux conditions d'ensoleillement évoluant radicalement au gré des changements climatiques ? Peut-on amortir les crises environnementales et chocs énergétiques<sup>9</sup> futurs par des réhabilitations architecturales adéquates ?

---

9 Le concept de résilience permet d'imaginer la capacité de résistance de notre environnement à des chocs énergétiques brutaux ou crises climatiques subites. Les scénarios prospectivistes du GIEC corroborent la pertinence de ce paradigme car ils envisagent d'éventuelles crises énergétiques radicales sur les cinquante ans à venir.

Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res, novembre 2013 :  
« Le terme de résilience étant désormais employé de manière très large, il paraît utile de préciser ce que ce terme signifiera ici. Il désigne à l'origine une propriété mécanique, la capacité d'un matériau à résister aux chocs. Par extension à l'architecture, il s'agit de caractériser la capacité de nos bâtiments et de nos villes à résister à des chocs environnementaux et, plus particulièrement dans notre recherche, à la double contrainte de la raréfaction des ressources en énergie fossile et de l'incertitude climatique. »



1-03

### 1-03. La recherche de typologie énergétique

Schéma du protocole de recherche

Document issu du rapport intermédiaire du  
programme de recherche Ignis Mutat Res

Le recours à des données prospectivistes établies par le GIEC<sup>10</sup> nous permettra de tirer des conclusions sur le long terme (environ quarante ans de projection) car une intervention architecturale ne démontre pas forcément la même pertinence lorsque le climat est profondément modifié. Un bâtiment à Nice (température moyenne de 16°C) ne doit pas être conçu comme un bâtiment à Paris (température moyenne de 12°C). Qui dit que le Paris de 2050 ne deviendra pas le Nice actuel au gré du réchauffement climatique ? Les spécialistes du GIEC tablent sur des augmentations de températures non négligeables (+3,4 degrés en moyenne sur un siècle de temps pour la zone Europe dans le cas du scénario A2<sup>11</sup>), d'où la pertinence de cette remarque (cf partie 1-3-5).

## 1.2 Les enjeux de la recherche d'indicateurs morphologiques

### 1.2.1 Une relation complexe entre forme et énergie à décrypter

*« L'objectif est l'élaboration d'une sorte de grammaire des formes, à même d'établir des prévisions de performance énergétique en fonction de grandes familles géométriques d'objets bâtis, de leur position dans l'espace et de scénarios climatiques. La «typomorphologie énergétique» ainsi construite constituera un outil de conception, de prévision et de repérage dans l'éventail des postures d'intervention possibles, à l'usage des urbanistes et des architectes : quel comportement énergétique peut-on associer à tel type de forme dans tel type d'environnement à telle période – qu'il soit ou non bâti ? »<sup>12</sup> (figure 1-03)*

Conformément aux objectifs du programme IMR<sup>13</sup>, cette recherche d'indicateurs a tout d'abord vocation à trouver une relation simple, si elle existe, entre forme et énergie. Peut-être que la relation entre les deux notions est trop complexe ou fortement dépendante d'autres facteurs qui brouilleraient les pistes comme la composition matérielle de l'enveloppe ou l'occupation de l'usager. Dans la mesure du possible, nous nous évertuerons à établir des relations correctes et limpides.

### 1.2.2 Deux phases clés : la conception en amont, la vérification en aval

*« Actuellement, les professionnels de la construction disposent d'un large choix d'outils « métiers » destinés à les assister dans la conception et l'évaluation de*

---

10 GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), *Quatrième rapport d'évaluation : Changements climatiques 2007* ( rapport disponible sur [www.ipcc.ch/report/](http://www.ipcc.ch/report/)).

11 Ibid., « Ceux-ci [les scénarios] sont regroupés en quatre familles (A1, A2, B1 et B2) qui étudient différentes voies de développement en fonction d'un large éventail de facteurs démographiques, économiques et technologiques ainsi que des émissions de GES qui en résultent. [...] Enfin, le canevas A2 décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques. »

12 Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, *Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res*, novembre 2013.

13 abr. pour *Ignis Mutat Res*



*leurs projets, du point de vue de multiples aspects de confort et d'usage [...] Ces outils de (pré)dimensionnement et d'aide à la conception sont nombreux. Cependant, aucun ne permet pour le moment d'apprécier la performance globale d'un bâtiment, et ce, dès les phases d'esquisse. Qui plus est, ces méthodes d'aide à la conception brassent des savoirs que les spécialistes sont généralement les seuls à connaître ; de fait, ils sont peu utilisés par le commun des professionnels de la construction. L'enjeu réside ici dans le développement d'un outil qui permettrait de donner une appréciation « experte »<sup>209</sup> des choix de conception, une appréciation qui serait à la fois simple, rapide et éloquente pour l'utilisateur non spécialiste. »<sup>14</sup>*

La relation considérée comme existante, cette investigation aura deux motivations clés très proches de ceux édictées par Laetitia Arantes. Si les indicateurs morpho-énergétiques confèrent le pouvoir d'anticiper une performance énergétique globale, ceux-ci pourraient informer le projet quant à ses besoins énergétiques tout autant en conception qu'au cours d'étapes plus avancées (vérification et réalisation). Ils auraient ainsi valeur d'ordre de grandeur et pourraient ainsi étoffer la boîte à outils des architectes et ingénieurs à l'instar des outils simplifiés de pré-dimensionnement dont ils disposent en structure.

### **1`2`3 Identification rapide du potentiel de bâtiments existants**

Outres les applications directes, les indicateurs permettent aussi d'identifier rapidement des potentiels morpho-énergétiques lors de l'étude d'un bâtiment existant. Ce recours à des indicateurs pourrait ainsi orienter certaines décisions de réhabilitation en prenant en compte rapidement les potentiels formels du bâtiment existant.

Les bâtiments existants du corpus (*cf* partie 2-3-3) pourront aussi être passés au crible des indicateurs mis en évidence. Constituer une batterie de réponses architecturales à préconiser pour des situations types, fonction de l'échelle, de l'orientation et de la forme du projet deviendrait un projet très ambitieux mais hautement intéressant. Des catégories d'intervention<sup>15</sup> d'ampleur variable (changement de menuiseries, ajout de casquettes ou de réflecteurs, greffe de serres ou de double peau, création de loggias ou de balcons etc) seraient susceptibles d'être créées et soumises à des préconisations bioclimatiques corroborées par des indicateurs morpho-énergétiques. En poussant le vice, chaque intervention pourrait être affublée d'un indicateur particulier qui permette de quantifier l'efficacité énergétique de la modification du bâtiment. Ce travail est ouvert à quiconque s'y intéresse.

---

<sup>14</sup> Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012, p.84.

<sup>15</sup> En plus de leur efficacité énergétique, ces modifications morphologiques possèdent des avantages architecturaux en termes de confort, de lumière, d'espace, d'usage et de façade qui ne seront cependant pas renseignés dans l'étude qui va suivre.



| ENERGIE ET BIOCLIMATIQUE   |       |                 |   |
|--|-------|-----------------|---|
| Forme urbaine  |       | Environnemental |   |
| Complexité   | Forme | Intensité       |   |
| Intensité énergétique par habitant   |       | Q/V             | Quantité d'énergie consommée (kWh/h)<br>Nbr d'habitants   |
| Intensité énergétique surfacique   |       | Q/V             | Quantité d'énergie consommée (kWh/m²)<br>Surface de plancher (m²)   |
| Part de production locale  |       | Q/V             | Quantité d'énergie produite localement (kWh/h)<br>Quantité d'énergie consommée  |
| Taux d'énergie renouvelable utilisée   |       | VRE/Q           | Quantité d'énergie renouvelable utilisée (kWh/h)<br>Quantité d'énergie consommée (kWh/h)  |
| Taux de réutilisation de l'énergie   |       | VRE/Q           | Quantité d'énergie réutilisée (kWh/h)<br>Quantité d'énergie consommée (kWh/h)   |
| Compacité volumétrique   |       | I/B             | $C = \frac{\sum V_i}{\sum V_i}$   |
| Facteur de voile   |       | I/B             | $\frac{(\sum V_i)^2}{\sum V_i^2}$   |
| Facteur de forme   |       | I/B             | $C_{forme} = \frac{\sum V_i}{(\sum V_i)^2}$   |
| Taux de volume positif   |       | I/B             | $Taux\ vol\ positif = \frac{\sum V_i\ positif}{\sum V_i}$   |
| Energie consommée pour le chauffage  |       | Q/V             | Quantité d'énergie consommée (kWh/h)  |
| Energie consommée pour la climatisation                                      |       | Q/V             | Quantité d'énergie consommée (kWh/h)  |
| Complexité des bâtiments par rapport à l'énergie consommée par les bâtiments |       | Q/V             | $S = \frac{F_{ext} + F_{int}}{F_{ext}} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{A_i} \right]^2} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{A_i} \right]^2} \cdot \frac{1}{A_i}$ |
| Comparaison de la complexité du réseau urbain à l'énergie de transport       |       | VRE/Q           | $S = \frac{F_{ext} + F_{int}}{F_{ext}} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{A_i} \right]^2} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{A_i} \right]^2} \cdot \frac{1}{A_i}$ |

1-04

#### 1-04. Classification des indicateurs morphologiques

Tableau de catégorisation des indicateurs

Serge Salat, *Les villes et les formes sur l'urbanisme durable*,  
éd. Hermann, 2011, 543 p.

Par ailleurs, le prolongement logique de cette démarche serait de valoriser le potentiel énergétique des sites existants à l'échelle urbaine (forme, exposition, prospect favorable, toiture exploitable, gisement solaire important, vide interstitiel) grâce à d'autres indicateurs de morphologie urbaine.

### **1`3 Le domaine d'application et les précautions d'emploi des indicateurs** [cf annexe 01 : Précautions d'emploi sur les indicateurs]

#### **1`3`1 Deux procédés de création d'indicateurs**

Cette partie s'inspire fortement des écrits de Serge Salat<sup>16</sup> qui discute de la fiabilité des indicateurs et du cadre strict dans lequel ils peuvent s'appliquer sous peine d'être interprété peu judicieusement. L'utilisation des indicateurs nécessite beaucoup de rigueur et une détermination scrupuleuse du sens physique et des conclusions architecturales qu'on peut en tirer.

Dans notre étude, il a été nécessaire de créer des indicateurs morphologiques et de les tester au regard de leur performance énergétique pour déterminer les plus pertinents. Deux manières de procéder sont envisageables : l'une qui consiste à créer des indicateurs via des paramètres morphologiques de base (surfaces déperditives, volume, etc), l'autre qui consiste à combiner des indicateurs issus de la littérature sur le sujet (cf partie 4-3-2). Dans le cas de la création pure, il faut exploiter les données géométriques de base qui sont censées être correctes dans un premier temps (vérification logiciel) et qui doivent être manipulées en bonne conscience dans un second temps (vérification des unités, du sens physique et de la portée de l'indicateur). Toutes ces règles de bonne usage dépendent de l'indicateur concerné mais il est tout de même possible d'établir des précautions d'emploi générales. C'est ce que nous avons tenté d'explicitier dans cette partie.

#### **1`3`2 Classification des indicateurs selon leur domaine d'application**

Par la suite, les indicateurs seront classés selon leur domaine d'application en fonction de l'intervalle de temps<sup>17</sup> et de la typologie<sup>18</sup> pour lesquelles il reste valable. Comme nous le verrons, tous les indicateurs ne sont pas forcément applicables à des projets de toute taille, d'où cette disjonction des cas. En effet, Serge Salat indique l'importance que revêt la définition de l'échelle (bâtiment, îlot, quartier, ville) (figure 1-04) et du cadre temporel. Par extrapolation dans cette étude, le cadre temporel sera caractérisé par deux types de scénarios : été/hiver et 2013/2050.

---

16 Serge Salat, *Les villes et les formes sur l'urbanisme durable*, éd. Hermann, 2011, 543 p.

17 Par la suite, des situations saisonnières (été et hiver) et scénarios annuels (2013 et 2050) seront définis.

18 De la même manière, des catégories typologiques (barre, tour et pavillon) seront définies.



Afin d'organiser les indicateurs morphologiques, il propose de les classer par nature et par thème. Il est possible de s'inspirer de ce principe de classification pour trier et regrouper les indicateurs selon leur domaine d'application, leur contenu physique ou les paramètres qu'ils invoquent.

### **1`3`3 Sens physique des indicateurs et comportement énergétique des bâtiments**

La véritable force de l'indicateur réside dans ce qu'il peut nous raconter (ou ne pas nous raconter). Il est nécessaire de renseigner systématiquement la formule mathématique, la définition, le sens et les interprétations possibles de l'indicateur. En somme, comment l'utiliser à bon escient ?

L'indicateur s'utilise moins de manière absolue que relative. On porte plus attention à la concomitance entre ses variations et celles des performances énergétiques. Ainsi, il est possible d'étudier le comportement énergétique d'un bâtiment par l'évolution de l'indicateur lorsqu'on procède à une modification du projet en question. C'est donc dans la comparaison de l'avant et de l'après ou de plusieurs propositions de transformation que l'indicateur dévoile toute sa puissance. La méthode à utiliser est donc celle de la variation comparée des indicateurs et performances énergétiques. Les conclusions aboutiront donc à des relations qui auront plus une valeur comparative que prescriptive. Comprendre et accepter ce point constitue une nécessité impérieuse et une condition sine qua non à la validation des conclusions qui seront établies. La substantifique moelle qu'on pourra tirer des indicateurs morphologiques en dépend.

### **1`3`4 Evolution des besoins énergétiques dans l'année**

L'indicateur morpho-énergétique est lié à la forme et aussi à l'énergie. L'énergie se quantifie en besoins<sup>19</sup> si l'on étudie le comportement énergétique d'un bâtiment. Les besoins varient irrémédiablement avec le climat et a fortiori avec les saisons. C'est dans cette optique que nous prêterons une attention toute particulière à la fluctuation cyclique des besoins d'une saison à l'autre. Des situations saisonnières été / hiver se dégageront de l'analyse dans un souci d'affinement des résultats.

### **1`3`5 Notion de résilience et scénarios de crise énergétique**

Au cours des quarante années qui vont suivre, le climat va subir de profonds bouleversements que l'on ne peut négliger. Mis à part les variations saisonnières des besoins, la notion d'énergie se rapporte aussi au phénomène, plus étalé dans le temps, de changement climatique. En effet, qui dit changement climatique, dit modification des besoins sur le long terme. Les indicateurs morpho-énergétiques, pertinents dans leur relation aux besoins, doivent donc être testés sur des périodes plus longues pour confirmer la pérennité de leur sens.

---

<sup>19</sup> On privilégie la notion de confort et du besoin impliqué pour maintenir cet état de confort (Température de confort) plutôt que la notion de consommation énergétique.

Peut-être sera-t-il possible de trouver des indicateurs qui seront plus parlants en 2050 ou, encore mieux, des indicateurs corrélés à l'évolution du climat. Dans ce cas, l'outil donnerait la possibilité de quantifier la capacité d'un bâtiment à s'adapter aux aléas sur des intervalles de temps décennaux.

Dennis Meadows<sup>20</sup>, un des grands gourous du changement climatique, met en exergue l'importance de changer de paradigme dans cette quête d'un avenir énergétiquement plus viable. Il préfère le principe de « *résilience* »<sup>21</sup> à l'idéal du développement durable, considérant que nous avons passé le point de non retour sur la question de l'énergie. Cette image, définie par la capacité d'un organisme ou d'une entité à résister à des chocs virulents, sied parfaitement à notre étude car elle met en exergue le risque qu'encourt un bâtiment si sa conception ne tient pas compte des éventuelles modifications brutales de son comportement énergétique au gré des bouleversements climatiques.

Conformément à cette volonté de prendre en compte l'influence du réchauffement climatique sur le long terme, les bâtiments seront examinés thermiquement selon deux scénarios climatiques :

- scénario 2013 (relevé par le GIEC<sup>22</sup>)
- scénario 2050 A2 (établi par le GIEC<sup>23</sup>)

Ainsi, les différents bâtiments et projets analysés dans cette étude pourront être comparés entre eux à un « *instant t* » (2013 ou 2050) mais aussi dans leur réaction à l'évolution probable des conditions climatiques sur un intervalle de temps plus large. Les changements climatiques nous obligent donc à conjecturer des besoins énergétiques futurs (fonction des données météorologiques prospectivistes du GIEC) afin de statuer sur la nécessité et/ou la pertinence d'une réhabilitation sur le long terme.

En effet, les projets réagissent plus ou moins bien au changement climatique et leur performance énergétique peut varier fortement pour des intervalles de temps décennaux. Une réhabilitation peut être perçue comme nécessaire dans l'immédiat mais peut se révéler aberrante dans quarante ans.

---

20 *Preparing cities for the age of declining oil*, Conf. à l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée.

21 Le mot *résilience* désigne de manière générale la capacité d'un organisme, un groupe ou une structure à s'adapter à un environnement changeant brutalement. Dennis Meadows utilise cette image pour la substituer au paradigme du développement durable, devenu obsolète à ses yeux.

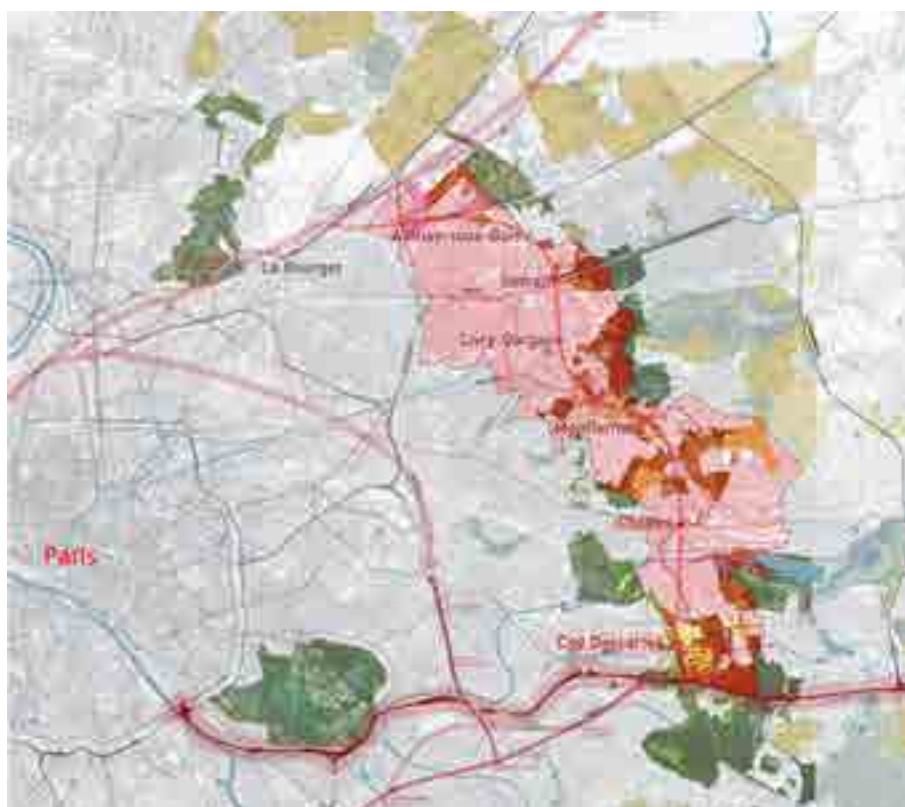
*Preparing cities for the age of declining oil*, Conf. à l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée :  
« Instead of sustainable development I will use the term *resilience*. It's a much more concrete and scientifically based term, it can be applied at any level of scale, from the individual up to the country. [...] I'll tell you generically the ways that you increase resilience, to be useful you will have to convert those ways over into concrete ideas about architecture. [...] I could illustrate this talk with many different areas : climate change, loss of agricultural soils, declining water availability, both groundwater and crouch, or social areas, like the rising gap between rich and poor, the fact that the debts which have been accumulated by countries and many people and never will be paid back. I could use those illustrations but I don't have much time, and I will use energy instead, the connection between energy in the city. »

22 GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Quatrième rapport d'évaluation : *Changements climatiques 2007* ( rapport disponible sur [www.ipcc.ch/report/](http://www.ipcc.ch/report/)).

23 *Ibid.*

Les indicateurs ont ainsi une autre opportunité de dévoiler leur potentiel dans cette étude désormais prospectiviste.

Les enjeux et règles de bonne conduite de la recherche d'indicateurs morphologiques dorénavant édictés, il est désormais possible de procéder à l'étude des indicateurs et de leur mode de fonctionnement. L'entreprise étant ambitieuse, il a fallu trouver un corpus d'étude qui soit à la mesure des intentions de recherche. Ce corpus a été déterminé spatialement, programmatiquement et pragmatiquement selon plusieurs leitmotiv qui seront argumentés dans la partie suivante.



2-01



2-02

## 2-01. En périphérie métropolitaine de Paris

Carte de localisation de la Dorsale Est

Document créé à partir des travaux de DSA  
d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

## 2-02. Entre des pôles de fortes activités

Carte de localisation de la Dorsale Est

Document créé à partir des travaux de DSA  
d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

## 2` Objets d'analyse

### 2`1 Cadre spatial : la Dorsale Est comme territoire périurbain représentatif

#### 2`1`1 Un terrain stratégique et représentatif des milieux en périphérie métropolitaine

Le programme de recherche *IMR* a choisi de centrer sa réflexion sur un territoire spécifique dont les particularités ont été énoncées par l'architecte urbaniste Yves Lion<sup>24</sup>. Le rapport intermédiaire du programme de recherche remis au Ministère de la Culture et du Développement reprend la définition de l'urbaniste :

*« Dans la suite des réflexions du Groupe Descartes constitué pour la consultation internationale du Grand Pari(s) [...] l'architecte urbaniste Yves Lion, a délimité pour la manifestation de Venise un espace de travail privilégié, nommé « Dorsale Est ». Il s'agit d'une fictive « ville de 300 000 habitants, française, européenne, inconnue de la cartographie administrative. Elle prend naissance au Cluster Descartes à Marne-la-Vallée, franchit la Marne, l'important réseau ferré de Chelles, monte vers le plateau de Montfermeil, traverse Clichy-sous-Bois en longeant la forêt de Bondy et plus loin le somptueux canal de l'Ourcq à Sevran puis rejoint Aulnay-sous-Bois et son artère urbaine majeure. [...] La Dorsale Est se trouve au nord-est de la capitale, à cheval sur deux départements : la Seine-Saint-Denis (93) et la Seine-et-Marne (77). Sa superficie – 64 kilomètres carrés – est comparable à celles de Lyon, Strasbourg ou Nice. »<sup>25</sup>*

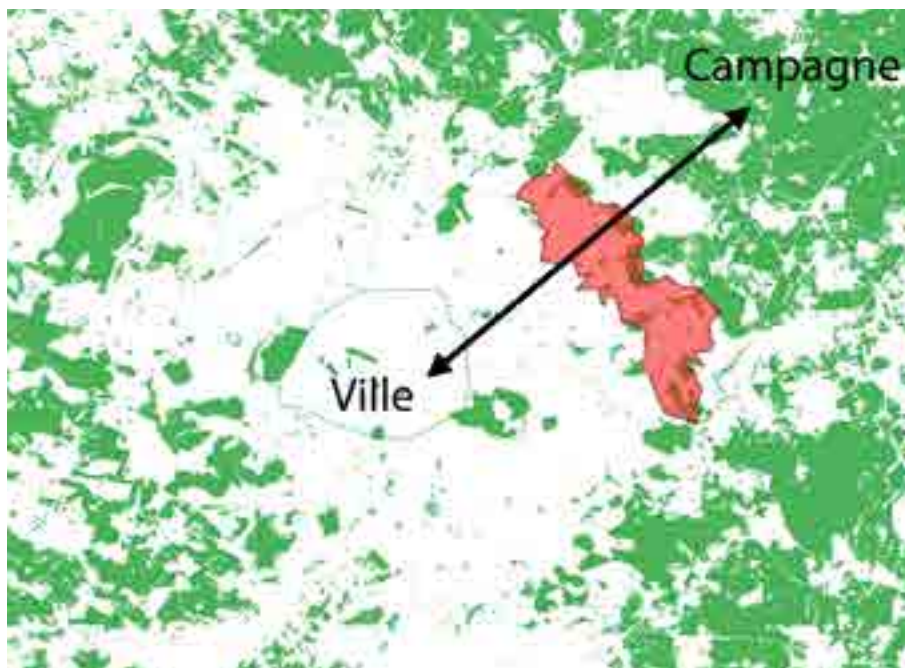
En terme de localisation géographique, l'étude portera donc sur **la Dorsale Est** (figure 2-01) pour plusieurs raisons. Avant toute chose, la Dorsale Est est un terrain d'observation représentatif des territoires périurbains. Située à la périphérie d'une grande ville, elle bénéficie d'une situation stratégique à proximité de grands pôles dynamiques tels que le Bourget, l'aéroport Charles-de-Gaulle ou le cluster Descartes, futur pôle d'excellence du développement durable (figure 2-02).

---

24 Définition fixée dans le cadre du commissariat du Pavillon de la France à la Biennale de Venise par Yves Lion, fondateur de l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée.

25 Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, *Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res*, novembre 2013.





2-03



2-04

### 2-03. Transition entre ville et campagne

Localisation du territoire de la Dorsale Est  
Document créé à partir des travaux de DSA  
d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

### 2-04. Territoire au coeur du « Grand Paris »

Carte des futurs réseaux de transport périurbain  
Document créé à partir des travaux de DSA  
d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

Ce territoire, situé en frange de campagne (*figure 2-03*), bénéficie tout autant du cadre naturel offert par ce positionnement que du rayonnement de la capitale française en termes d'activités et de développement. En effet, la Dorsale Est s'inscrit parfaitement dans le projet du Grand Paris et devrait tirer pleinement parti du futur réseau de transport qui irriguera ce territoire sur toute sa longueur (*figure 2-04*).

## **2`1`2 Un territoire aux forts potentiels démographique, économique, social et énergétique**

Cette lisière métropolitaine possède un fort potentiel tant démographique, qu'économique ou patrimonial. La Dorsale Est regroupe 300 000 habitants, des activités éparpillées du commerce de proximité au grand centre commercial, des paysages naturels et un patrimoine à sauvegarder. Par ailleurs, les tensions et enjeux sociaux en font aussi un lieu complexe à comprendre de par sa grande mixité culturelle, sociale et intergénérationnelle (*figure 2-05*). Des mutations qui seront accompagnées de la qualification d'espaces délaissés ou socialement défavorisés sont à envisager en conséquence (*figure 2-06*). Cependant, ce territoire dispose d'un large panel de grandes infrastructures scolaires conforme à la population assez jeune qui la caractérise et la rend dynamique.

D'un point de vue énergétique, la précarité énergétique touche un bon nombre de foyers et se révèle être un enjeu majeur du développement de ce terrain qui n'est pas considéré à sa juste valeur à l'heure actuelle.

## **2`2 Cadre programmatique : la prépondérance et la variété des logements**

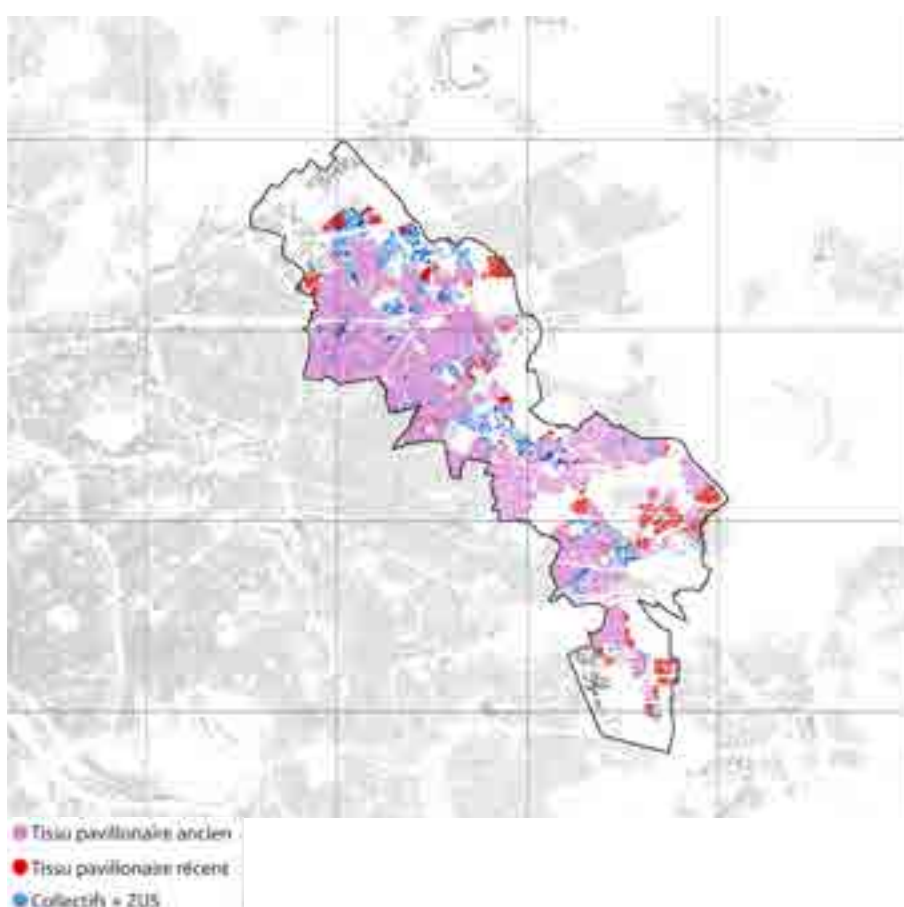
### **2`2`1 Diversité typo-morphologique du logement au sein de la Dorsale Est**

L'analyse qui va suivre est concentrée sur le logement car il représente une bonne part du potentiel bâti de la Dorsale Est. De surcroît, le parc immobilier vieillissant de la Dorsale Est nécessite un programme de réhabilitation d'envergure qui ne peut être développé qu'après avoir identifié les potentiels énergétiques et architecturaux des différentes habitations.

Au-delà des critères de représentativité et potentialité, la Dorsale Est est constituée de bâtiments très variés comme le démontrent les analyses menées par les étudiants du DSA d'architecte-urbaniste de l'école d'Architecture de Marne-la-vallée (*figure 2-07*). L'étude morphologique peut ainsi se nourrir de cette diversité de formes bâties car la comparaison de typologies diverses (par leurs dimensions, leur échelle et leur orientation) est nécessaire à cette investigation. C'est dans la comparaison d'un grand nombre de bâtiments qu'émergeront des tendances qui permettront in fine de corréliser indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique.



2-05 2-06



2-07

#### 2-05. Mixité sociale, potentiel démographique

Photographie prise dans la Dorsale Est  
 Document tiré des travaux de DSA d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

#### 2-06. Des espaces délaissés à requalifier

Photographie prise dans la Dorsale Est  
 Document tiré des travaux de DSA d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

#### 2-07. Variété typomorphologique de l'habitat

Carte de la répartition typologique du logement  
 Document créé à partir des travaux de DSA d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

Pour cause, l'histoire de ce territoire a abouti à l'entremêlement de tissus très hétérogènes. En témoignent les Grands ensembles et petits lotissements pavillonnaires qui cohabitent à la lisière des campagnes. Ainsi, la grande diversité des formes et échelles du bâti implique une classification préalable et a fortiori l'identification, certes arbitraire mais essentielle, de familles typologiques : **les « barres », les « tours » et les « pavillons »**. La valeur représentative de ce classement permettra l'extrapolation à des situations similaires caractéristiques des milieux périurbains.

## **2' 2' 2 Quatre sites sélectionnés selon leur représentativité et leur variété**

L'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée a mis à contribution les étudiants pour sonder, analyser et décrypter la Dorsale Est dans le cadre de la Biennale de Venise puis par l'intermédiaire des ateliers de projet de 4ème année du Master « *Matières à penser* ». Des espaces représentatifs de ce vaste territoire ont été sélectionnés au cours du semestre de studio architectural de l'année universitaire 2012-2013.

Quatre sites d'analyse ont ainsi émergé : Champs-sur-Marne, Montfermeil, Clichy-sous-bois et Sevrans (figure 2-08). En plus d'être des terrains d'expérimentation caractéristiques, ces sites révèlent des potentiels bâtis qui pourront être appréciés au cours des analyses morpho-énergétiques.

## **2'3 Objets d'étude : prolongement des travaux initiés par des étudiants**

### **2' 3' 1 Une démarche conjointe entre étudiants en architecture et ingénierie**

Le programme *Ignis Mutat Res* a vocation à faire participer les étudiants à ce projet de recherche de grande ampleur. C'est pourquoi l'intérêt mutuel des chercheurs, membres du regroupement scientifique, pour la participation active d'étudiants et des enseignants de Master pour la Dorsale Est a abouti à la mise en place d'un semestre dédié à l'étude énergétique de ce territoire.

Dans ce cadre, les étudiants en architecture ont pu travailler au côté d'étudiants en ingénierie, ce qui leur a permis d'en apprendre plus sur les enjeux environnementaux et les outils de simulation de phénomène physique dont ils disposent pour vérifier mais aussi concevoir des constructions énergétiquement viables et conformes aux impératifs de performance énergétique.

Le corpus d'étude est donc l'ensemble des projets étudiés dans le cadre du projet de Master « *Matières à penser* ». Les sites ont été retenus seulement s'ils concentraient les trois typologies définies pour cette étude : Barre, Tour et Pavillon.



2-08



2-09

**2-08. Quatre sites répartis sur la Dorsale Est**  
 Carte de localisation de la Dorsale Est  
 Document créé à partir des travaux de DSA  
 d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

**2-09. Une barre, une tour et un pavillon**  
 Photographies des bâtiments étudiés  
 Documents tirés des travaux étudiants du master  
 « Matières à penser » de l'ENSA Marne-la-Vallée

Les situations existantes sont au nombre de trente et sont réparties sur les quatre sites suivants (*figure 2-08*) :

- Champs-sur-Marne (Quartier bois de Grâce, quartier du Champy) ;
- Montfermeil (Boulevard Hardy) ;
- Clichy-sous-Bois (Quartier Orly Parc, quartier des Bosquets) ;
- Sevran (Quartier Montceaux, quartier Pont-Blanc).

Au sein de chaque site, les situations sont classées par typologie morphologique :

- dix bâtiments de type « Barre » ;
- dix bâtiments de type « Tour » ;
- dix bâtiments de type « Pavillon ».

## **2` 3` 2 De l'analyse des quatre sites aux propositions d'intervention**

### **• De l'analyse des quatre sites...**

Dans un premier temps, chaque groupe a identifié trois cas caractéristiques des catégories typologiques retenues, à savoir une barre, une tour et un pavillon (*figure 2-09*). Pour chacun de ces bâtiments, une carte d'identité a été dressée résumant les principales qualités morphologiques, constructives et énergétiques de chaque édifice (*figure 2-10*). L'analyse comparée d'un grand nombre de projets a permis aux étudiants de relier forme et énergie de manière instinctive car les résultats étaient plus de nature graphique que calculatoire. En effet, par l'utilisation de deux logiciels de simulation thermique<sup>26</sup>, les étudiants ont pu élaborés des documents visuels (axonométries, plans et élévations) apportant des renseignements sur certains facteurs liés au comportement énergétique des bâtiments en question :

- la part de ciel vu défini comme la mesure de l'accès des façades concernées à la lumière naturelle ;
- l'irradiation solaire caractéristique du potentiel de captage de l'énergie solaire par les bâtiments ;
- le coefficient de forme comme indicateur morphologique phare attaché à la notion d'échange thermique entre le bâtiment et son environnement ;
- le pourcentage de vitrage représentatif de la répartition des surfaces vitrées sur l'enveloppe totale

Ces analyses synthétiques ont débouché sur des conclusions et des prescriptions en étroite correspondance avec les objectifs d'efficacité énergétique. In fine, des scénarios de réhabilitation ont été imaginés pour chaque situation de bâtiments.

### **• ... aux propositions d'intervention**

Pour chacune des situations, trois projets ont été proposés par les étudiants, soit une batterie de neuf interventions.

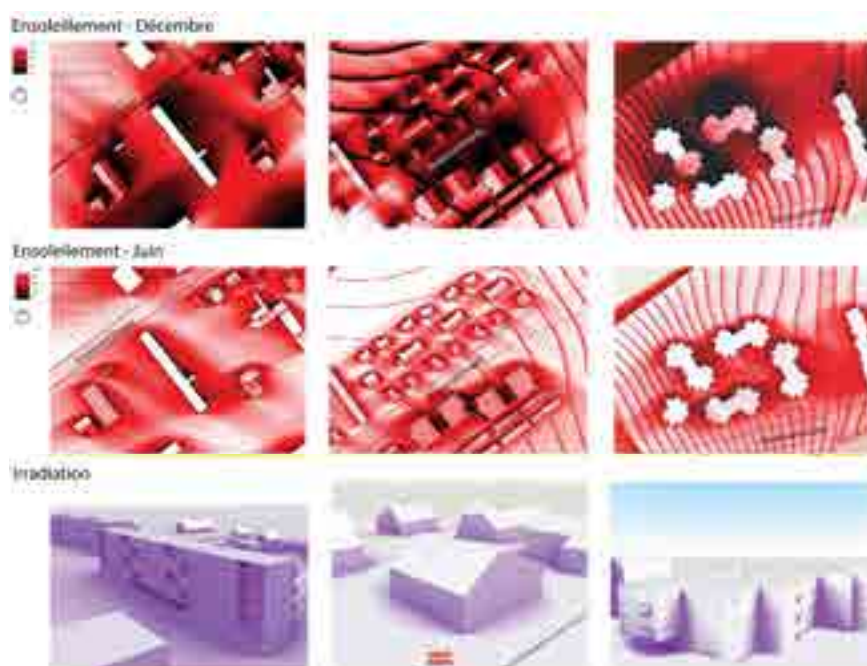
---

<sup>26</sup> Archiwizard pour la visualisation de l'irradiation solaire et de la lumière naturelle.  
Autodesk Ecotect Analysis pour le calcul du Facteur Lumière Jour.





2-10



2-11



2-12

## 2-10. Des sites représentatifs sélectionnés

Axonométrie et coupe générales du site

Documents tirés des travaux étudiants du master

« Matières à penser » de l'ENSA Marne-la-Vallée

## 2-11. Des analyses énergétiques de site...

Simulation thermique réglementaire Archiwizard

Documents tirés des travaux étudiants du master

« Matières à penser » de l'ENSA Marne-la-Vallée

## 2-12. ... aux propositions d'intervention

Modélisations 3D des réhabilitations projetées

Modélisations effectuées dans le cadre de l'étude :

Réda Oussennan

Chaque projet est caractérisé par l'ampleur (la lourdeur) de l'intervention :

- « A minima » qui consiste à modifier les baies en qualité et dimensions sans intervention sur la morphologie générale de l'existant ;
- « Plug » qui se résume à l'adjonction localisée d'un ou plusieurs volumes au bâtiment tels qu'une serre ou un espace tampon ;
- « Enveloppe » qui correspond à la transformation globale de l'enveloppe selon une stratégie moins économique mais plus efficace en toute logique.

Une classification a été mise en place pour organiser l'intégralité des projets.<sup>27</sup>

L'ensemble de ces interventions se voulait plus architectural que technique et affecte, en ce sens, moins la performance brute des matériaux constitutifs que l'épure et l'optimisation de l'espace par le projet considéré. Somme toute, chacun des dix groupes d'étudiants a travaillé sur une barre, une tour et un pavillon pour aboutir à trois propositions de réhabilitation de lourdeur croissante, soient 120 projets au total.

### 2.3.3 Un corpus d'étude de 120 projets pré-analysés par les étudiants

A la clé, s'est constitué un corpus très varié de 120 projets qui a été analysé urbanistiquement et climatiquement (*figure 2-11*). Sous le prisme de l'énergie, des potentiels se sont dévoilés et ont conduit les étudiants à imaginer des projets performants qui auront une pertinence pour notre étude.

Néanmoins, les diagnostics énergétiques présentaient des résultats assez sommaires et incomplets. Le but de la présente recherche est d'approfondir et d'affiner ces évaluations, d'une part, par des comparaisons de performance énergétique pour vérifier la pertinence des réponses et, d'autre part, de tirer parti du grand nombre de projets par la conduite d'une recherche statistique.

L'objectif primordial est de se concentrer sur les caractéristiques morpho-énergétiques des bâtiments pour en tirer des tendances statistiques à partir de ce large corpus de 120 projets (*figure 2-13*). L'idéal serait de corrélérer des indicateurs morphologiques tels que la compacité ou le pourcentage de vitrage avec des résultats de performance énergétique comme les besoins en chaud et en froid. Cette finalité sous-tend la mise en place d'hypothèses rigoureuses de recherche et aussi le recours à des logiciels fiables de simulation thermique.

---

27 Dans le dossier regroupant l'ensemble des données, on retrouve la division typologique :

Dossiers : « 01 Barres » pour l'ensemble des Barres

Dossiers : « 02 Tours » pour l'ensemble des Tours

Dossiers : « 03 Pavillons » pour l'ensemble des Pavillons

Au sein de chaque dossier 01, 02 et 03, chaque projet est associé à son propre dossier.

Ce dossier est nommé de la sorte : XXX - YZ - site avec :

- XXX compris entre 000 et 120 pour le numéro du projet

- Y pouvant être remplacé par B, T ou P selon la typologie concernée

(B = Barre, T = Tour, P = Pavillon)

- Z compris entre 0 et 3 selon le degré d'intervention

(0 = Etat initial, 1 = A minima, 2 = Plug, 3 = Enveloppe)

- Site pouvant être remplacé par csm, mf, csb, sv

(csm = Champs-sur-Marne, mf = Montfermeil, csb = Clichy-sous-Bois, sv = Sevran)

Par exemple, 019 - B2 - mf signifie 19ème projet situé à Montfermeil de type Barre dont l'intervention est un plug.





## 3` Hypothèses et outils d'analyse

### 3`1 La nécessité d'une démarche d'analyse rigoureuse

#### 3`1`1 Méthodologie générale d'un projet de recherche sur l'énergie

Conformément à tout projet de recherche, un mode opératoire a été établi. Il est divisé en plusieurs étapes que l'on ne peut éluder :

- questionnement préalable et problématique ciblée ;
- rédaction d'une feuille de route définissant les objectifs ;
- établissement d'un plan de travail précisant les échéances ;
- choix d'outils de simulation pertinents et maîtrisés ;
- restitution compréhensible des résultats ;
- interprétation intelligible des résultats ;
- critique des résultats par des experts habilités<sup>28</sup>.

Des tâches méthodiques et itératives ont été effectuées en parallèle :

- nomination stricte des fichiers, des données et des calculs ;
- ordonnancement des données au travers de l'arborescence de fichiers (*figure 3-01*) ;
- hypothèses d'analyse fixées et rédigées pour conserver une trace ;
- lecture bibliographique pour étayer le propos sur les indicateurs morpho-énergétiques.

#### 3`1`2 Un protocole strict et systématisé : le détails des étapes

Dans le cas de notre étude, cette méthodologie a pris une tournure spécifique adapté aux tenants et aboutissants du problème. Le protocole est défini par plusieurs étapes successives :

- modéliser l'échantillon représentatif des logements existants sur la Dorsale Est selon des règles précises et uniformes ;
- modéliser l'ensemble des scénarios de transformations architecturales, à paramètres matériels constants et ambition architecturale croissante ;

---

<sup>28</sup> Le bureau d'étude environnement RFR éléments a supervisé mon mémoire au cours d'un stage de deux mois. Par leurs connaissances pointues sur le sujet de l'énergie, ils ont pu critiquer les premiers résultats de la recherche.

|          |                | Groupe    | Typologie | Site             | Zone tampon |
|----------|----------------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| Barre    | 001 - B0 - csm | Groupe 1  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|          | 002 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 003 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 004 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 005 - B0 - csm | Groupe 2  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|          | 006 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 007 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 008 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 009 - B0 - csm | Groupe 3  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|          | 010 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 011 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 012 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 013 - B0 - mf  | Groupe 4  | Barre     | Montfermeil      |             |
|          | 014 - B1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 015 - B2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 016 - B3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 017 - B0 - mf  | Groupe 5  | Barre     | Montfermeil      |             |
|          | 018 - B1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 019 - B2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 020 - B3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 021 - B0 - csb | Groupe 6  | Barre     | Clichy sous Bois |             |
|          | 022 - B1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 023 - B2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 024 - B3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 025 - B0 - csb | Groupe 7  | Barre     | Clichy sous Bois |             |
|          | 026 - B1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 027 - B2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 028 - B3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 037 - B0 - sv  | Groupe 10 | Barre     | Sevran           |             |
|          | 038 - B1 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 039 - B2 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 040 - B3 - sv  |           |           |                  |             |
| Tour     | 041 - T0 - csm | Groupe 1  | Tour      | Champs sur Marne |             |
|          | 042 - T1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 043 - T2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 044 - T3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 045 - T0 - csm | Groupe 2  | Tour      | Champs sur Marne |             |
|          | 046 - T1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 047 - T2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 048 - T3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 049 - T0 - csm | Groupe 3  | Tour      | Champs sur Marne |             |
|          | 050 - T1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 051 - T2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 052 - T3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 053 - T0 - mf  | Groupe 4  | Tour      | Montfermeil      |             |
|          | 054 - T1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 055 - T2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 056 - T3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 057 - T0 - mf  | Groupe 5  | Tour      | Montfermeil      |             |
|          | 058 - T1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 059 - T2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 060 - T3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 061 - T0 - csb | Groupe 6  | Tour      | Clichy sous Bois |             |
|          | 062 - T1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 063 - T2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 064 - T3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 065 - T0 - csb | Groupe 7  | Tour      | Clichy sous Bois |             |
|          | 066 - T1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 067 - T2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 068 - T3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 077 - T0 - sv  | Groupe 10 | Tour      | Sevran           |             |
|          | 078 - T1 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 079 - T2 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 080 - T3 - sv  |           |           |                  |             |
| Pavillon | 081 - P0 - csm | Groupe 1  | Pavillon  | Champs sur Marne |             |
|          | 082 - P1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 083 - P2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 084 - P3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 085 - P0 - csm | Groupe 2  | Pavillon  | Champs sur Marne |             |
|          | 086 - P1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 087 - P2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 088 - P3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 089 - P0 - csm | Groupe 3  | Pavillon  | Champs sur Marne |             |
|          | 090 - P1 - csm |           |           |                  |             |
|          | 091 - P2 - csm |           |           |                  |             |
|          | 092 - P3 - csm |           |           |                  |             |
|          | 093 - P0 - mf  | Groupe 4  | Pavillon  | Montfermeil      |             |
|          | 094 - P1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 095 - P2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 096 - P3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 097 - P0 - mf  | Groupe 5  | Pavillon  | Montfermeil      |             |
|          | 098 - P1 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 099 - P2 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 100 - P3 - mf  |           |           |                  |             |
|          | 101 - P0 - csb | Groupe 6  | Pavillon  | Clichy sous Bois |             |
|          | 102 - P1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 103 - P2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 104 - P3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 105 - P0 - csb | Groupe 7  | Pavillon  | Clichy sous Bois |             |
|          | 106 - P1 - csb |           |           |                  |             |
|          | 107 - P2 - csb |           |           |                  |             |
|          | 108 - P3 - csb |           |           |                  |             |
|          | 117 - P0 - sv  | Groupe 10 | Pavillon  | Sevran           |             |
|          | 118 - P1 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 119 - P2 - sv  |           |           |                  |             |
|          | 120 - P3 - sv  |           |           |                  |             |



3-02 3-03

### 3-02. Liste exhaustive des projets par site

Tableau des projets modélisés et étudiés

Document créé dans le cadre du stage au sein de la structure RFR éléments : Réda Oussennan

### 3-03. Modélisations des projets et des abords

Modélisations 3D des situations existantes

Modélisations effectuées dans le cadre de l'étude : Réda Oussennan

- opter pour un logiciel de simulation thermique adapté à l'analyse massive ;
- quantifier l'effet relatif des transformations sur les besoins énergétiques des logements à partir de ce logiciel. Ces simulations thermiques prendront en compte deux situations climatiques distinctes et représentatives de l'évolution des conditions climatiques ;
- corrélérer l'effet des formes – initiales et modifiées – avec les besoins instantanés du bâtiment à un instant t et si possible avec l'évolution relative de ces besoins ;
- classer les typologies présentes sur le terrain d'observation en catégories pertinentes à l'aide de ces mêmes indicateurs de forme.

Le suivi strict de ces étapes apporte plusieurs avantages :

- la systématisation de certaines tâches peut être économe en temps (*figure 3-02*);
- la précision des hypothèses contribue à l'intelligibilité des résultats ;
- la focalisation sur la finalité ultime évite les digressions sur le sujet.

Il a été nécessaire d'uniformiser la nature, les conventions et modes de représentation des modèles, mais aussi les hypothèses constructives et climatiques de simulation pour obtenir des résultats comparables et donc exploitables (*figure 3-03*). La bonne définition des hypothèses de travail est une étape fondamentale qui prend tout son sens lorsqu'on connaît la dangerosité de la manipulation des indicateurs (*cf partie 1-3*). Dans notre cas, les hypothèses portent sur **les données climato-météorologiques, la composition matérielle de l'enveloppe et les scénarios d'occupation**.

### 3`2 Hypothèses d'analyse originales et corrigées

[*cf annexe 02 : Hypothèses d'analyse originales*]

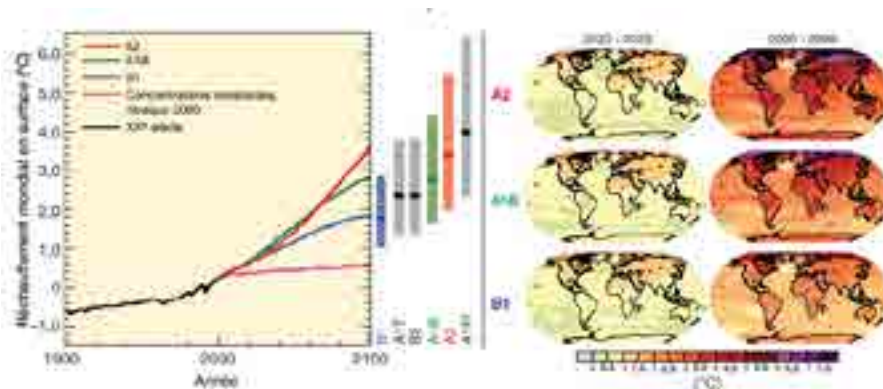
L'architecture recèle de nombreux paramètres notamment quand il s'agit d'étudier le comportement énergétique d'un bâtiment. Forme, composition, localisation et usage conditionnent la réaction de l'objet vis-à-vis de son environnement et empêchent d'établir des relations simples entre Forme et Énergie. En ce qui nous concerne, l'étude consiste en une réflexion purement morpho-énergétique. Pour éviter de brouiller les pistes par l'influence parasitaire d'autres variables, il faut fixer des hypothèses d'analyse.

#### 3`2`1 Hypothèses fixes de situation géographique et conditions météorologiques

Les coordonnées géographiques permettent de fixer des conditions climatiques localement. La localisation géographique pour cette étude est la région parisienne qui a pour coordonnées : Latitude : 48°48' N et Longitude 2°19' E .



3-04



3-05

#### 3-04. Station météorologique Paris-Montsouris

Carte de localisation de la station météo

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

#### 3-05. Réchauffement climatique prospectif

Graphiques de l'évolution des températures

Documents tirés du GIEC, Quatrième rapport d'évaluation : Changements climatiques 2007

Les données météorologiques sont celles associées à **la station Paris-Montsouris** (altitude de 75m) (*figure 3-04*). Les fichiers météorologiques ont été obtenus à partir du logiciel Météonorm<sup>29</sup>.

Les données couvrent les périodes climatologiques de 1961-1990 et 2000-2009 pour les paramètres suivants : température, humidité, vitesse du vent et précipitation. Elles couvrent les périodes climatologiques 1981-1990 et 1986-2005 pour les autres paramètres : irradiation solaire, durée d'ensoleillement.

### **3`2`2 Hypothèses fixes d'évolution climatique et scénarios prospectivistes du GIEC**

Nous avons vu plus haut que nous envisageons la résilience comme l'adaptation des bâtiments aux changements radicaux de climat. Les calculs sont donc effectués selon deux situations météorologiques distinctes. Cette méthode permet d'apprécier l'évolution des besoins énergétiques, en été et en hiver, et de discerner les morphologies peu impactées.

Pour ce faire, les données météorologiques proviennent des scénarios climatiques inspirés des **observations 2013 et rapports prospectivistes 2050 du GIEC**<sup>30</sup>. Pour 2050, les informations extraites du logiciel Meteonorm correspondent à l'extrapolation des statistiques météorologiques de la station Paris-Montsouris suivant le scénario A2 (*figure 3-05*). Le choix d'utiliser le scénario le plus défavorable s'est fait dans le but d'accentuer la perception du changement climatique.

### **3`2`3 Hypothèses fixes de composition constructive : des matériaux aux propriétés standards**

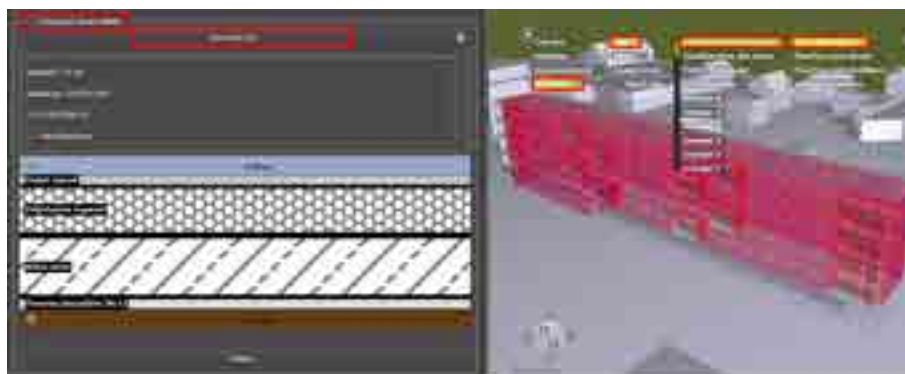
La composition des parois et la qualité des baies sont basées sur le postulat d'une réhabilitation préalable de tous les bâtiments. **L'ensemble des caractéristiques matérielles sont ainsi alignées sur les standards actuels.** Ces hypothèses ont été validées par des experts en construction environnementale.<sup>31</sup>

---

29 Version 7 du logiciel édité par la société Meteotest. Le programme exploite trois bases de données météorologiques :  
- GEBA - Global Energy Balance Archive ;  
- WMO - World Meteorological Organization ;  
- Swiss database - Meteoswiss.

30 GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Quatrième rapport d'évaluation : *Changements climatiques 2007* ( rapport disponible sur [www.ipcc.ch/report/](http://www.ipcc.ch/report/)) :  
Le GIEC a dressé plusieurs rapports disponibles :  
1990 - Premier rapport d'évaluation :  
1995 - Deuxième rapport d'évaluation : «Changements climatiques 1995»  
2001 - Troisième rapport d'évaluation : «Bilan 2001 des changements climatiques»  
2007 - Quatrième rapport d'évaluation : «Changements climatiques 2007»  
Les scénarios climatiques issus du quatrième rapports sont classés en quatre familles selon les hypothèses de développement économique formulées :  
Scénario A1 - Croissance économique rapide (monde homogène)  
Scénario A2 - Développement économique avec une orientation régionale (monde hétérogène)  
Scénario B1 - Durabilité environnementale globale (monde homogène)  
Scénario B2 - Durabilité environnementale locale (monde hétérogène)  
La base de données établies par le GIEC est disponible sur le site du Data Distribution Centre.

31 Le bureau d'étude environnement RFR éléments.



3-06

#### Extérieur

|                     |          |               |
|---------------------|----------|---------------|
| Enduit ciment       | 1,00 cm  | 0,950 W/(m.K) |
| Polystyrène expansé | 15,00 cm | 0,035 W/(m.K) |
| Béton armé          | 20,00 cm | 2,300 W/(m.K) |
| Placoplâtre BA 13   | 1,30 cm  | 0,325 W/(m.K) |

#### Murs déperditifs

Composition : Mur bois ITE  
 Epaisseur : 37 cm  
 Résistance : 4,42 m².K/W  
 U : 0,226 W/(m².K)

#### Intérieur



3-07

#### Vitrage : Double vitrage isolation élevée (Argon) Opaque : Sandwich isolant en PVC

Transmission lumineuse : 80%  
 Réflexion lumineuse : 12%

Réflexion lumineuse : 70%

Transmission solaire : 53%  
 Réflexion solaire : 24%

Réflexion solaire : 70%

Facteur solaire : 58%  
 Ug : 1,10 W/(m².K)

Up : 0,60 W/(m².K)

#### 3-06. Composition standard des parois

Hypothèses fixées sur le logiciel Archiwizard  
 Document créé pour l'étude :  
 Réda Oussennan

#### 3-07. Composition standard des baies

Hypothèses fixées sur le logiciel Archiwizard  
 Document créé pour l'étude :  
 Réda Oussennan

**Les hypothèses relatives aux éléments constitutifs de l'enveloppe ne sont pas définitives** (figure 3-06 et 3-07). Elles seront affinées au cours de l'analyse critique des résultats afin de minimiser les aberrations sporadiques liées au traitement des modélisations 3D par Archiwizard. Trois jeux de calcul seront définis selon les hypothèses et cas particulier (cf partie 4-1-1).

### **3`2`4 Hypothèses fixes d'usage : scénario d'occupation**

Les scénarios d'occupation sont souvent désavantageux car l'influence des occupants est soit sous évaluée soit inadéquate. Les scénarios simulés automatiquement par le logiciel Archiwizard permettent de se dédouaner de la nature aléatoire de l'usage fait par l'occupant pour se concentrer sur les paramètres morphologiques qui sont l'objet de l'étude.

### **3`2`5 Particularité exceptionnelle et correction des hypothèses : l'espace tampon** [cf annexe 03 : *Hypothèses d'analyse corrigées*]

Les projets pourvus d'un espace tampon (loggia, serre, etc) ont été traités différemment suite à des aberrations observées lors des calculs de performance énergétique (besoins en chaud, besoins en froid). En effet, le logiciel Archiwizard considère ce type d'espace comme une pièce autonome et chauffée si aucune précision n'est apportée lors de l'analyse thermique du projet. De ce fait, le grand pourcentage de surface vitrée, caractéristique de ces espaces tampons, entraîne une augmentation exponentielle des besoins en froid et une altération, certes moindre mais non négligeable, des besoins en chaud. Ce phénomène est dû à la non considération par défaut de stores sur le logiciel Archiwizard. Les apports solaires ne sont donc pas régulés par des protections solaires adéquates et, a fortiori, les besoins en froid explosent en période estivale. Nonobstant leur aberrance, ces résultats nous avertissent tout de même d'un éventuel risque de surchauffe.

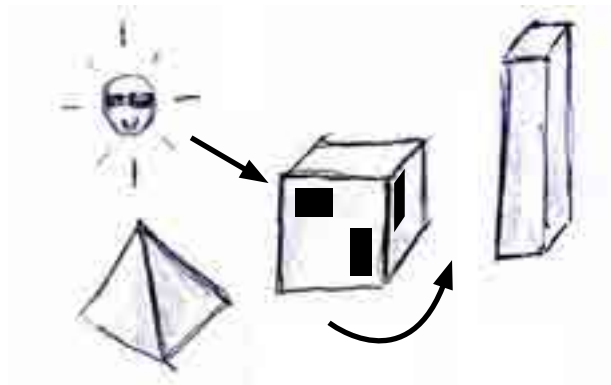
Les hypothèses de base quant à la constitution des parois et des baies ne suffisaient donc plus à la définition de ce genre de projet assez particulier.

**Un paramétrage correctif** a donc été élaboré pour limiter ces anomalies. Il a tout de même été appliqué sur l'ensemble des projets toujours conformément au souci d'uniformisation des résultats à comparer.

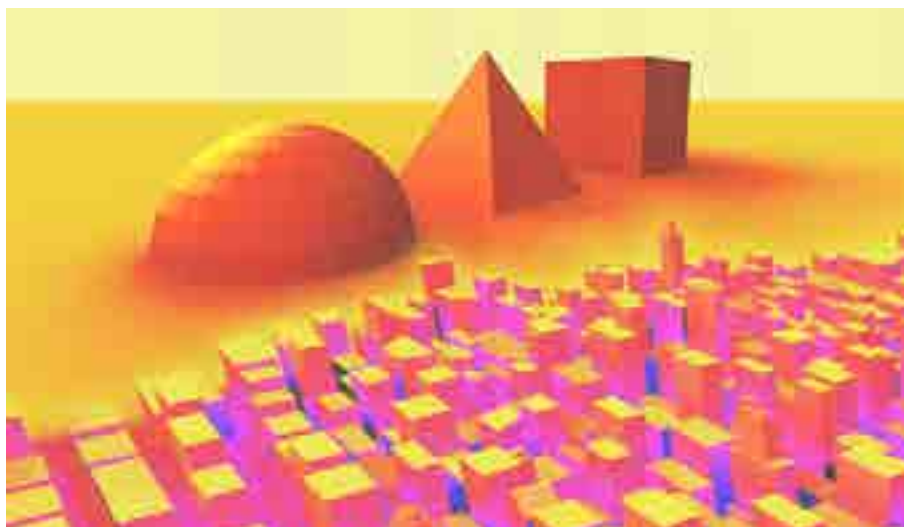
Ainsi, deux modifications d'hypothèses ont été effectuées en cours d'analyse thermique (via la configuration de paramètres sur Archiwizard) et répercutées sur l'ensemble du corpus d'étude :

- **changement de protections solaires**
- **création et configuration d'un espace tampon**





3-08



3-09

**3-08. Morphologie, porosité et orientation**  
 Croquis des trois paramètres morphologiques  
 Document créé pour l'étude :  
 Réda Oussennan

**3-09. Imagerie solaire obtenue sur le logiciel**  
 Montage d'images extraites sur Archiwizard  
 Document créé pour l'étude :  
 Réda Oussennan

### 3`3 Variabilité des paramètres morphologiques étudiés

#### 3`3`1 Paramètres morphologiques variables : géométrie, ratio plein/vide et orientation

Trois paramètres de nature différente influencent à la fois différemment et conjointement le comportement énergétique d'un bâtiment (*figure 3-08*) :

- La géométrie pure<sup>32</sup> ;
- Le rapport plein / vide entre surfaces opaques et surfaces vitrées ;
- L'orientation et le contexte urbain (masque).

#### 3`4 Outils d'analyse : simulation thermique réglementaire

[cf annexe 8-4 : outils d'analyse]

##### 3`4`1 Le choix des logiciels selon deux impératifs : rapidité et exhaustivité

Le rapport intermédiaire du programme *IMR* explicite parfaitement le choix des outils de simulation thermique (*figure 3-09*):

« Quel logiciel adopter pour effectuer ces tâches ? En ce qui concerne les études énergétiques, les logiciels à notre disposition relèvent de deux catégories : les logiciels de thermique dynamique et les logiciels thermiques utilisant des calculs simplifiés en régime continu. Les premiers nécessitent beaucoup de manipulations et des temps de calcul longs mais leurs résultats intègrent une représentation physique fine, notamment de l'inertie thermique. Les seconds, à l'inverse, sont simples et rapides mais leurs moteurs de calcul sont souvent hermétiques et les résultats résultent d'hypothèses implicites.

Nous avons retenu le logiciel Archiwizard, simple d'utilisation et d'apprentissage, qui donne des résultats dans un délai très court, de l'ordre de la seconde. En effet, Archiwizard n'opère pas des calculs dynamiques par heure mais des calculs simplifiés à partir de moyennes sur une journée contrairement à des logiciels de thermique dynamique comme Pleiades+Comfie, et ce pour trois raisons. »

Les arguments avancés sont les suivants :

- les délais de calcul sont considérablement amoindris sur les logiciels de simulation thermique réglementaire. L'obtention de 120 calculs thermiques dynamiques occuperait une part disproportionnée de la durée totale de la recherche s'ils étaient effectués par des STD<sup>33</sup> ;
- les modalités de travail s'inscrivent davantage dans la comparaison que dans la recherche de résultats absolus de performance énergétique. La corrélation sera obtenue par la confrontation des variations et non des résultats eux-mêmes.

---

32 On appelle géométrie pure : l'ensemble des surfaces définies uniquement par leurs dimensions sans différenciation entre les parties opaques et les parties vitrées.

33 Abr. reconnue pour Simulation Thermique Dynamique

Situation existante



3-10

Intervention a minima



Greffe de volumes



Transformation de l'enveloppe



3-11

### 3-10. Modélisation de la situation existante

Modèles 3D du site et du bâtiment existant

*Documents créés pour l'étude :*

*Réda Oussennan*

### 3-11. Modélisation des trois interventions

Modèles 3D du site et du bâtiment modifié

*Documents créés pour l'étude :*

*Réda Oussennan*

- la flexibilité des calculs prime sur leur exactitude. En cas d'erreur sur une hypothèse, il est essentiel de pouvoir répercuter cette modification rapidement sur l'ensemble des cas étudiés. Le paramétrage d'Archiwizard est assez intuitif et rapide dans son exécution.

Cette méthode d'analyse en masse possède une légitimité pour deux raisons principales qui sont sa valeur comparative et la crédibilité d'une approche statistique sur un large échantillon représentatif. Cependant, cette démarche exhaustive et statistique devra être corroborée par des études plus fines menées en parallèle sur des logiciels « plus fiables » en prenant plus de paramètres en compte. Un des étudiants ingénieurs de l'Ecole des Ponts Paristech<sup>34</sup> a travaillé dans cette optique en analysant sous un autre angle la performance énergétique de certains des 120 cas.

### **3`4`2 Les outils de constitution de la base de données : Sketchup et Meteonorm**

Préalablement, il a fallu utiliser un logiciel de conception 3D simplifié pour constituer la base de données. Cet outil, à savoir Sketchup, est compatible avec le logiciel de simulation thermique Archiwizard. Ce logiciel permet de construire des modèles 3D rapidement selon une charte graphique uniforme et adaptée à Archiwizard (*figure 3-10 et 3-11*), i.e. seuls l'enveloppe, les planchers et les baies (surface vitrée et menuiseries incluses) sont représentés. La composition matérielle des parois et des baies, ainsi que les conditions climatiques, seront définies sur le logiciel de simulation thermique. Conformément à la méthode du lancer de rayon, la détection des « pièces » par le logiciel Archiwizard exige impérativement de clore l'ensemble des volumes chauffés sous peine de ne pas être pris en compte lors des calculs.

Les projets ont été modélisés à partir des données récupérées auprès des étudiants de 4ème année du Master « *Matières à penser* » (deuxième semestre de l'année universitaire 2012-2013). Chaque modélisation est contextualisée : les abords du projet sont présents afin que l'impact de l'environnement bâti soit pris en compte au cours des analyses thermiques<sup>35</sup>.

Comme précisé précédemment, la base de données météorologiques est issue de Meteonorm 7 (*cf partie 3-2-2*) qui s'inspire du quatrième rapport d'évaluation remis par le GIEC : « *Changements climatiques 2007* ».

---

34 Malaussène, Sébastien, *Bilan énergétique et réhabilitation d'un groupe de bâtiment*, stage réalisé au sein du laboratoire Navier (dir. Olivier Baverel et Jean-François Caron), avril-juillet 2013.

35 L'importation des fichiers est effectuée en deux étapes : tout d'abord, le bâtiment étudié (001 - B0 - csm - Typologie par exemple) et ensuite ses abords (001 - B0 - csm - Abords). L'orientation et l'état existant des projets sont conformes à la réalité.



3-12

### 3-12. Certification RT 2012 du logiciel

Document officiel de Réglementation Thermique

Document issu du logiciel Archiwizard

### **3` 4` 3 L'outil de simulation thermique réglementaire pour les 120 projets : Archiwizard**

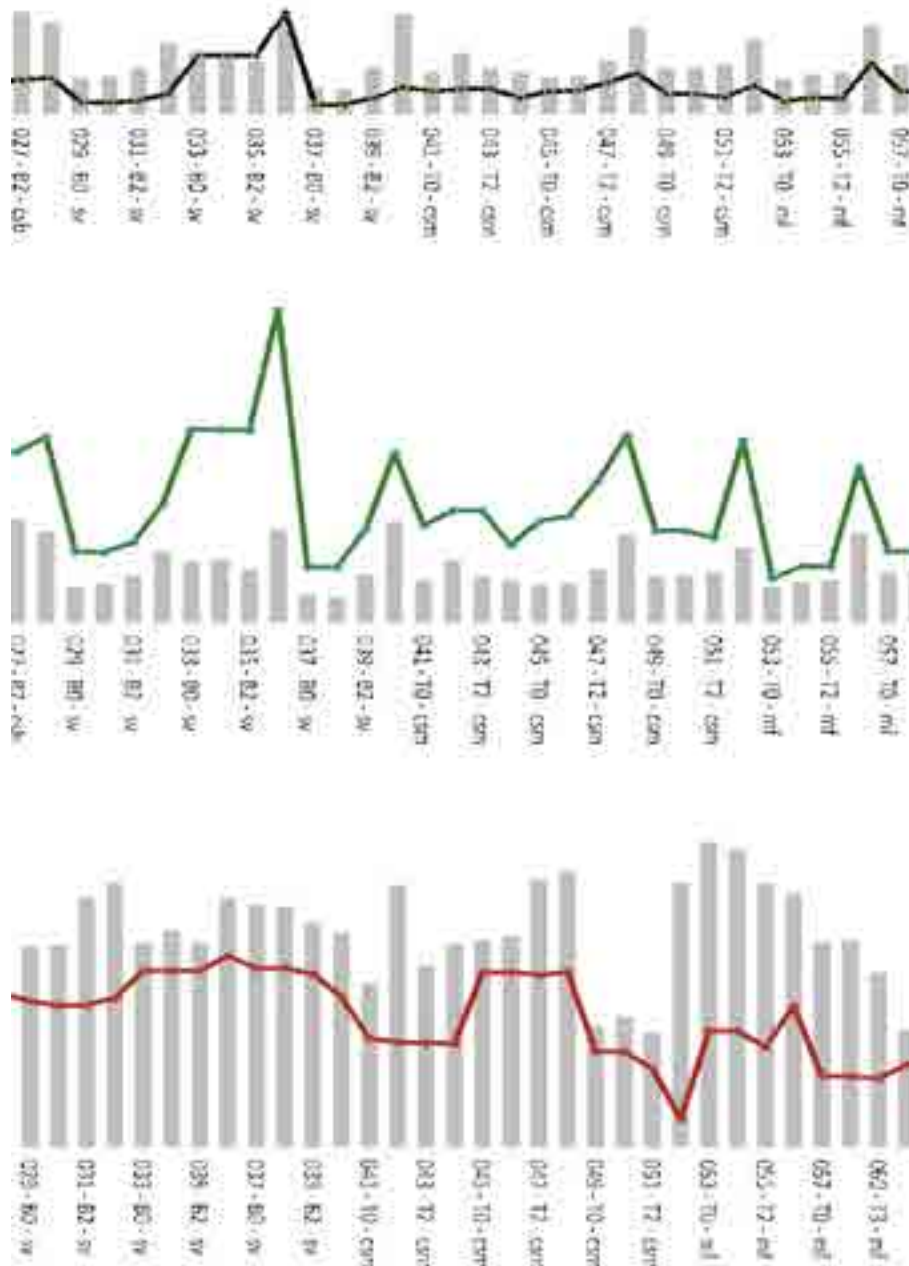
L'extraction des données morphologiques et énergétiques a été effectuée sur le logiciel Archiwizard conformément aux avantages qu'ils procurent.

*« La rapidité du logiciel Archiwizard résulte de sa base réglementaire. Archiwizard ne propose ainsi que deux types de configuration : l'usage et la date de construction. Il applique alors aux bâtiments les hypothèses découlant de ces deux choix. Celles-ci sont en grande partie issues des réglementations thermiques françaises : la RT2005 (pour les ponts thermiques par exemple) et la RT2012 pour les scénarios d'occupation. La date de construction permet d'attribuer automatiquement des propriétés physiques aux éléments dessinés comme les parois, vitrages et toitures. Dans ces conditions, mettre en place un projet prend seulement quelques secondes et ne nécessite pas d'apprentissage complexe. »<sup>36</sup> (figure 3-12)*

Les hypothèses étant fixées, les logiciels ayant été choisis judicieusement, on peut désormais procéder à l'analyse du corpus. Dans un premier temps, le processus de récupération des données exploitées sera explicité. Ensuite, les projets seront étudiés d'un point de vue purement énergétique et les indicateurs seront recensés et définis scrupuleusement. Finalement, résultats de performance énergétique et indicateurs morphologiques seront corrélés.

---

<sup>36</sup> Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, *Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res*, novembre 2013.



4-01

**4-01. Arraché des graphiques de corrélation**  
Graphes indicateurs - performance énergétique  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-01. Indicateurs de Morphologie globale, Porosité volumique et Coefficient de forme**  
Graphes de haut en bas  
Document créé pour l'étude : Réda Oussennan

## 4` Recherche d'indicateurs morpho-énergétiques

### 4`1 Extraction des données : caractéristiques du projet étudié

#### 4`1`1 Evolution des hypothèses de calcul : définition de trois cas d'étude

- **Trois calculs pour trois jeux d'hypothèses**

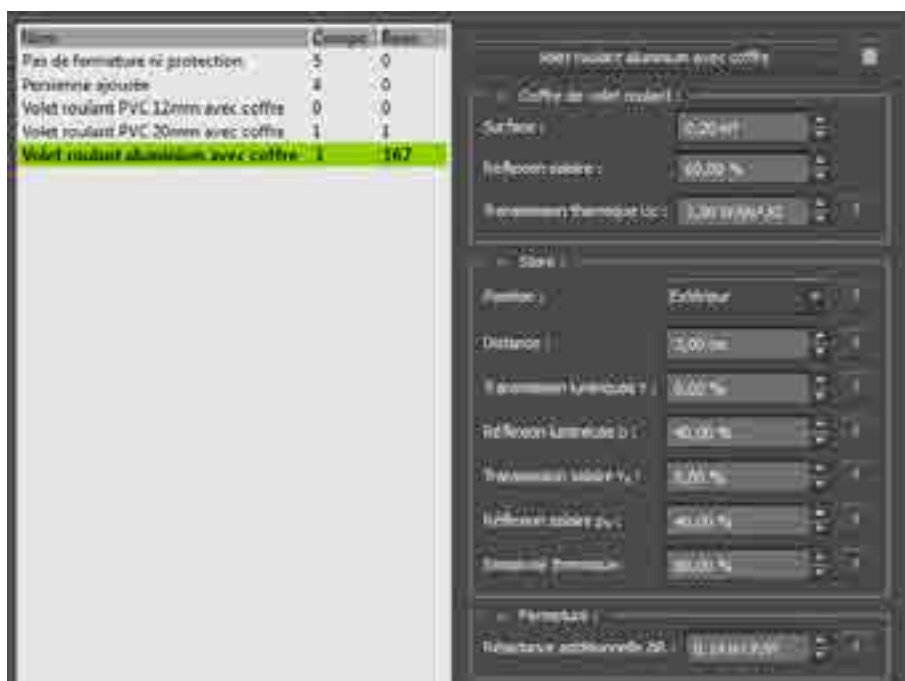
Au cours de l'investigation, plusieurs biais ont été constatés. Pour résoudre ces problèmes, il a fallu modifier les hypothèses de calcul en cours de route et les répercuter sur l'intégralité des projets, d'où l'existence de trois calculs, témoins de ces modifications successives. Ces modifications ont toujours été appliquées à l'ensemble du corpus, conformément au souci d'uniformisation des résultats à comparer.

Lors du jeu de calcul original mené sur le corpus durant l'été 2013, un biais important a été observé. Les bâtiments devenaient extrêmement peu performants lors de l'ajout d'un espace tampon vitré – une loggia par exemple.

Pour le calcul corrigé, les zones tampons ne sont plus intégrées dans le calcul des performances énergétiques de manière à faire réagir l'ensemble du calcul plus logiquement par rapport à la réalité physique.

Les besoins étant tout de même assez inégaux, un paramétrage correctif a été élaboré hors Archiwizard. Les hypothèses de base pour la constitution des parois et des baies ne suffisant plus à la définition d'un scénario idéal, nous avons eu recours à une combinaison des deux jeux d'hypothèses précédents pour en définir un dernier : le calcul combiné.





4-02

Besoins mensuels et bilan annuel selon le calcul original

|                 |       |       |      |    |      |       |       |       |       |    |      |      |        |
|-----------------|-------|-------|------|----|------|-------|-------|-------|-------|----|------|------|--------|
| Besoin de chaud | 15354 | 10767 | 5073 | 57 | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0  | 4688 | 9276 | 45215  |
| Besoin de froid | 0     | 0     | 0    | 0  | -378 | -3737 | -5774 | -3196 | -1284 | 0  | 0    | 0    | -14369 |
| Besoin de chaud | 15267 | 10238 | 5470 | 43 | 91   | 0     | 0     | 0     | 0     | 12 | 6664 | 8383 | 46167  |
| Besoin de froid | 0     | 0     | 0    | 0  | -357 | -2882 | -7664 | -6815 | -2137 | 0  | 0    | 0    | -19855 |



Besoins mensuels et bilan annuel selon le calcul corrigé

|                 |       |       |      |     |     |       |       |       |       |     |      |      |        |
|-----------------|-------|-------|------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|--------|
| Besoin de chaud | 16100 | 11730 | 5936 | 164 | 0   | 0     | 0     | 0     | 0     | 102 | 5942 | 9968 | 49942  |
| Besoin de froid | 0     | 0     | 0    | 0   | -87 | -2546 | -3995 | -2328 | -957  | 0   | 0    | 0    | -9913  |
| Besoin de chaud | 16312 | 11166 | 6300 | 440 | 137 | 0     | 0     | 0     | 0     | 81  | 7888 | 8956 | 51280  |
| Besoin de froid | 0     | 0     | 0    | 0   | -76 | -2004 | -5769 | -5596 | -1614 | 0   | 0    | 0    | -15059 |

4-03

#### 4-02. Modification des hypothèses de baies

Image issue du logiciel Archiwizard

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

#### 4-03. Evolution des besoins après modification

Tableau issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm

Documents créés pour l'étude :

Réda Oussennan

#### • Calcul original

Hypothèses particulières pour ce calcul :

- ***avant modification de protection solaire : volet roulant PVC 20mm sans store ;***
- ***avec considération de la zone tampon pour les projets à adjonction de serre.***

Pour ce premier calcul caractérisé par la formulation des hypothèses fondamentales, on prend aisément conscience de certaines aberrations en besoin froid. Les besoins en froid explosent pour certains projets à cause de la création d'une grande surface vitrée. C'est le cas pour la plupart des projets où une serre vient se greffer au bâtiment existant. Les espaces tampons ne sont en général pas bien traités par le moteur de calcul du logiciel Archiwizard du fait qu'il considère ce type d'espace comme une pièce autonome et chauffée si aucune précision n'est apportée lors de l'analyse thermique du projet. De ce fait, le pourcentage important de surface vitrée, caractéristique de ces espaces, entraîne une augmentation exponentielle des besoins en froid et une altération, certes moindre mais non négligeable, des besoins en chaud. Nonobstant leur aberrance, ces résultats nous avertissent tout de même d'un éventuel risque de surchauffe même si la comparaison relative des besoins est profondément mise à mal.

Pour palier ce phénomène inopportun de surchauffe, nous avons décidé de séparer la serre dans les calculs pour dissocier son impact considéré comme trop important sur les apports dans le bilan global. Pour amoindrir davantage ces aberrations, il convient de refaire les calculs avec une gestion automatisée du système de protection solaire des baies (stores) (figure 4-02). Cette fonction est en effet désactivée par défaut dans Archiwizard, ce qui pénalise excessivement les grandes baies vitrées en générant d'importants besoins en refroidissement. D'où le calcul corrigé (figure 4-03).

#### • Calcul corrigé

Hypothèses particulières pour ce calcul :

- ***après modification de protection solaire : volet roulant alu 12mm avec store ;***
- ***sans considération de la zone tampon pour les projets à adjonction de serre.***

Pour ce second calcul créé suite à la modification des hypothèses, les aberrations ont été majoritairement éliminées. Cependant les besoins en chaud et en froid restent assez déséquilibrés : les besoins en chaud dominant significativement. Cette observation semble cohérente mais ne facilite pas la corrélation avec les indicateurs morphologiques car les variations sont très prononcées. Ce calcul servira uniquement pour la comparaison des résultats de performance énergétique car il est le plus proche de la réalité physique. Cependant, un dernier calcul a été créé pour lisser les résultats et faciliter la corrélation avec les indicateurs morphologiques. D'où la création du calcul combiné.

4-04

4-05

**4-05. Paramètres morphologiques de base**  
Tableau issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm  
*Document créé pour l'étude :*  
*Réda Oussennan*

- **Calcul combiné**

Hypothèses particulières pour ce calcul :

**- avec injection de la contribution solaire et des apports internes du calcul original dans le calcul corrigé tout en conservant les autres hypothèses.**

Pour rééquilibrer les besoins et favoriser les besoins en froid devenu trop infimes, les contributions solaires et apports internes ont été injectés artificiellement du calcul original (sans protection solaire) vers le calcul corrigé. Le résultat est probant car les besoins sont lissés mais c'est au détriment d'une certaine véracité physique. En effet, on recense des besoins en froid en Octobre pour certains projets par exemple. Pire encore, les besoins d'autres projets sont intégralement des besoins en froid (*figure 4-04*). Néanmoins, ce calcul n'est pas dépourvu d'intérêt lorsqu'on corrèle les résultats avec les indicateurs morphologiques.

#### **4`1`2 Organisation graphique du fichier d'analyse et provenance des données** [cf annexe 06 : *Provenance des informations extraites sur Archiwizard*]

Pour corrélérer des indicateurs morphologiques à des résultats de performance énergétique, il a fallu extraire une liste exhaustive de données caractéristiques du projet étudié (*figure 4-05*).

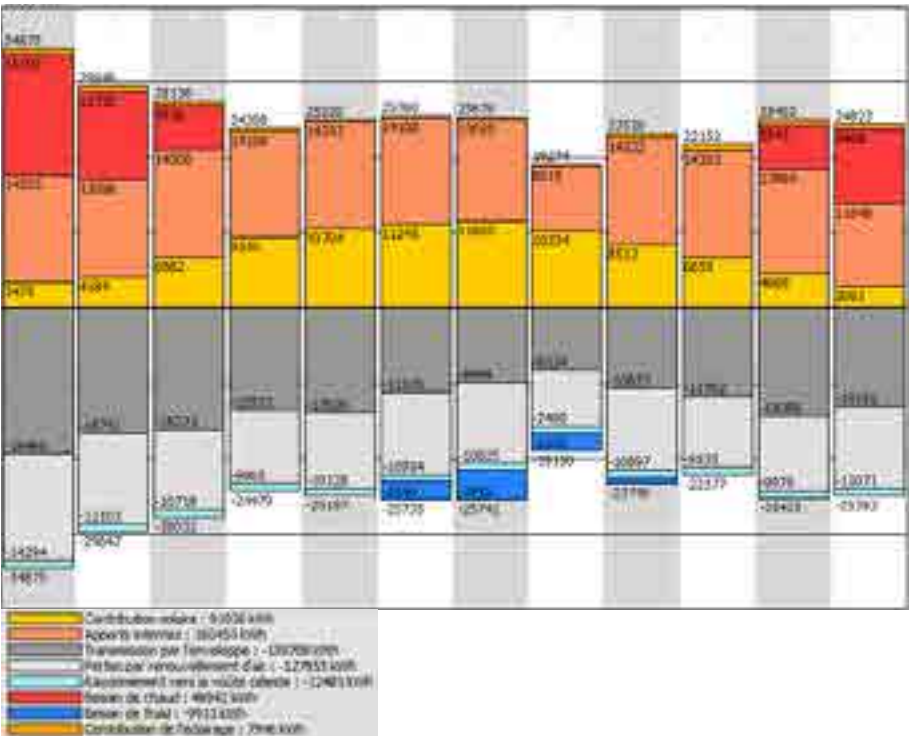
- **Données géométriques exploitées :**

- Surface SHON, surface SHAB (m<sup>2</sup>)
- Surface d'échange (m<sup>2</sup>)
- Surface déperditive hors plancher (m<sup>2</sup>)
- Surface déperditive totale (m<sup>2</sup>)
  
- Volume chauffé (m<sup>3</sup>)
- Compacité (coefficient de forme adimensionnel calculé par Archiwizard)
  
- Ratio surface de baies (%)
- Pourcentage de vitrage par orientation (%)

L'ensemble des données géométriques ont été récupérées via le logiciel Archiwizard. Elles ont été vérifiées par la confrontation à des résultats calculés à la main pour un projet témoin. (*cf partie 4-1-3*).

|                                 |                       |                            |         |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------|
| Cumuls (kWh)                    | S<br>O<br>M<br>M<br>E | Apports et pertes mensuels | Annuel  |
| Contribution solaire            |                       |                            | 109723  |
| Apports internes                |                       |                            | 160453  |
| Transmission par l'enveloppe    |                       |                            | -163352 |
| Pertes par renouvellement d'air |                       |                            | -133989 |
| Rayonnement vers la voûte       |                       |                            | -12143  |
| Contribution de l'éclairage     | S<br>O<br>M<br>M<br>E | Besoins mensuels           | 7897    |
| Besoin de chaud                 |                       |                            | 45215   |
| Besoin de froid                 |                       |                            | -14369  |

4-06



4-07

**4-06. Calcul des besoins par  $\Sigma$  Apports+Pertes**  
Tableau issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm  
Document créé pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-07. Equilibre entre besoins et  $\Sigma$  Apports+Pertes**  
Histogramme d'Archiwizard - projet 001-B0-csm  
Document créé pour l'étude :  
Réda Oussennan

- **Données performantielles calculées :**

Pour comparer les différentes typologies entre elles d'un point de vue énergétique, le confort semblait un paramètre idéal même si difficilement quantifiable. C'est pourquoi les besoins sont devenus la mesure phare de l'évaluation de la performance énergétique car ils présentent l'avantage d'être liés à la notion de confort tout en étant facilement calculables et manipulables. Le projet est décrit moins par sa consommation énergétique que par les besoins générés par l'altération des conditions de confort<sup>37</sup>.

Les deux mesures effectuées seront les suivantes<sup>38</sup> (figure 4-06 et 4-07) :

- Besoins en chaud (somme des apports et pertes calculée positivement en kWh)
- Besoins en froid (somme des apports et pertes calculée négativement en kWh)

Par ailleurs, pour certains cas, le détail des besoins sera passé au crible<sup>39</sup> :

- Les apports (contribution solaire, apports internes, contribution de l'éclairage) ;
- Les pertes (transmission par l'enveloppe, renouvellement d'air, rayonnement vers voûte céleste).

Les besoins en chaud et en froid seront analysés systématiquement tandis que le détail des apports/pertes sera étudié pour des cas bien précis. Les résultats de performance énergétique, leur sens physique et leur cohérence sont à vérifier par un regard critique. En effet, un travail perpétuel de vérification des résultats de performance énergétique doit être effectué en parallèle car le logiciel donne peu d'informations sur leur calcul alors que ceux-ci relèvent de formules plus complexes que pour les indicateurs morphologiques.

Cependant, la comparaison de résultats sur un large corpus d'étude permet d'identifier des tendances et de faire fi de certaines aberrations dues à des erreurs de modélisation, à une mauvaise reconnaissance du logiciel ou à des hypothèses mal définies.

- **Comparatif des données performantielles générées par la macro excel**

Les données brutes de performance énergétique sont difficilement exploitables si on ne les manipule pas quelque peu pour en tirer des conclusions prospectivistes sur le comportement énergétique. C'est pourquoi d'autres informations ont été générées par la mise en relation des données brutes (figure 4-08).

---

37 définis par Archiwizard par des températures préconisées

38 Archiwizard calcule les besoins en chaud et en froid selon le modèle de la Th-C-E 2005, la norme EN ISO 13790 et un calcul hybride à base de lancer de rayon (kW.h/an).

39 Ces calculs sont détaillés dans le bilan énergétique global calculé par Archiwizard. La somme des apports et pertes aboutit aux besoins en chaud si elle est négative et aux besoins en froid si la somme est positive. En effet, les besoins compensent le bilan apports-pertes dans le but de stabiliser l'équilibre thermique autour de conditions de confort adéquates.

| Informations extraites du Calcul Corrigé |             |             |                      |                   |                   |                            |                       |                                  |                                  |                           |  |
|--|-------------|-------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--|
| Nom                                      | Valeur 2013 | Valeur 2050 | Différence 2013-2050 | Valeur 2013 au m² | Valeur 2050 au m² | Différence 2013-2050 au m² | Augmentation relative | % Besoin / Besoin total 2013     | % Besoin / Besoin total 2050     | Différence 2013-2050 en % |  |
| Besoin Chaud Annuel                      | 49942       | 51280       | 1338                 | 14,74             | 15,14             | 0,39                       | 2,68%                 | 83,44%                           | 77,30%                           | -6,14%                    |  |
| Besoin Froid Annuel                      | 9913        | 15059       | 5146                 | 2,93              | 4,44              | 1,52                       | 51,91%                | 16,56%                           | 22,70%                           | 6,14%                     |  |
| Besoin Total Annuel                      | 59855       | 66339       | 6484                 | 17,67             | 19,58             | 1,91                       | 10,83%                |                                  |                                  |                           |  |
| Besoin Moyen Saisonnier                  | 14963,75    | 16584,75    | 1621                 | 4,42              | 4,90              | 0,48                       | 10,83%                |                                  |                                  |                           |  |
| Besoin Total été                         | 8869        | 13369       | 4500                 | 2,62              | 3,95              | 1,33                       | 50,74%                | 14,82%                           | 20,15%                           | 5,34%                     |  |
| Besoin Total Hiver                       | 37798       | 36434       | -1364                | 11,16             | 10,75             | -0,40                      | -3,61%                | 63,15%                           | 54,92%                           | -8,23%                    |  |
|  |             |             |                      |                   |                   |                            |                       | % Apport / Apports totaux / 2013 | % Apport / Apports totaux / 2050 | Différence                |  |
| Contribution solaire annuelle            | 91050       | 90478       | -572                 | 26,87             | 26,71             | -0,17                      | -0,63%                | 35,09%                           | 34,95%                           | -0,15%                    |  |
| Contribution solaire saisonnière         | 22762,5     | 22619,5     | -143                 | 6,72              | 6,68              | -0,04                      | -0,63%                | 35,09%                           | 34,95%                           | -0,15%                    |  |
| Contribution solaire été                 | 33174       | 34069       | 895                  | 9,79              | 10,06             | 0,26                       | 2,70%                 | 46,92%                           | 47,61%                           | 0,70%                     |  |
| Contribution solaire Hiver               | 10720       | 11440       | 720                  | 3,16              | 3,38              | 0,21                       | 6,72%                 | 20,72%                           | 21,78%                           | 1,07%                     |  |
| Apports internes annuels                 | 160453      | 160453      | 0                    | 47,36             | 47,36             | 0,00                       | 0,00%                 | 61,84%                           | 61,97%                           | 0,13%                     |  |
| Apports internes saisonniers             | 40113,25    | 40113,25    | 0                    | 11,84             | 11,84             | 0,00                       | 0,00%                 | 61,84%                           | 61,97%                           | 0,13%                     |  |
| Apports internes été                     | 36418       | 36418       | 0                    | 10,75             | 10,75             | 0,00                       | 0,00%                 | 51,50%                           | 50,90%                           | -0,61%                    |  |
| Apports internes Hiver                   | 38499       | 38499       | 0                    | 11,36             | 11,36             | 0,00                       | 0,00%                 | 74,40%                           | 73,30%                           | -1,10%                    |  |
| Contribution éclairage annuelle          | 7946        | 7969        | 23                   | 2,35              | 2,35              | 0,01                       | 0,29%                 | 3,06%                            | 3,08%                            | 0,02%                     |  |
| Contribution éclairage saisonnière       | 1986,5      | 1992,25     | 5,75                 | 0,59              | 0,59              | 0,00                       | 0,29%                 | 3,06%                            | 3,08%                            | 0,02%                     |  |
| Contribution éclairage été               | 1118        | 1067        | -51                  | 0,33              | 0,31              | -0,02                      | -4,56%                | 1,58%                            | 1,49%                            | -0,09%                    |  |
| Contribution éclairage Hiver             | 2528        | 2582        | 54                   | 0,75              | 0,76              | 0,02                       | 2,14%                 | 4,89%                            | 4,92%                            | 0,03%                     |  |
|  |             |             |                      |                   |                   |                            |                       | % Apports totaux / 2013          | % Apports totaux / 2050          | Différence                |  |
| APPORTS annuels                          | 259449      | 258900      | -549                 | 76,58             | 76,42             | -0,16                      | -0,21%                | 46,37%                           | 46,69%                           | 0,32%                     |  |
| APPORTS saisonniers                      | 64862,25    | 64725       | -137,25              | 19,14             | 19,10             | -0,04                      | -0,21%                | 46,37%                           | 46,69%                           | 0,32%                     |  |
| APPORTS été                              | 70710       | 71554       | 844                  | 20,87             | 21,12             | 0,25                       | 1,19%                 | 53,38%                           | 55,19%                           | 1,81%                     |  |
| APPORTS Hiver                            | 51747       | 52521       | 774                  | 15,27             | 15,50             | 0,23                       | 1,50%                 | 36,48%                           | 37,01%                           | 0,53%                     |  |

4-08

#### 4-08. Données performantielles à exploiter

Tableau issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

Chaque apport/perte et besoin est balayé. Dans tous les cas, sont calculés<sup>40</sup> :

- la différence des besoins 2013-2050 en valeur absolu (kWh)
- la différence des besoins 2013-2050 ramené au m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup>)
- l'augmentation relative des besoins de 2013 à 2050 (%)
- la part de chaque contribution sur le bilan énergétique total (%)
- la différence de cette part 2013-2050 (%)

Le temps passé à manipuler l'ensemble de ces chiffres est directement proportionnel au nombre de cas étudiés, soient 120 fois plus long. Pour palier ce problème, une procédure automatisée a été créée via un code de programmation. Ce petit programme est très simple d'utilisation.

#### • Démarche à suivre pour lancer l'analyse automatique par macro

Cette démarche est assez simple et revêt un intérêt tout particulier pour les études de nombreux bâtiments et projets.

Les étapes se résument à ces quelques manipulations successives :

- récupérer les données sur Archiwizard (informations générales relatives au projet global et au projet après déduction de la zone tampon, bilan énergétique 2013 et 2050, orientation des baies) ;
- copier ces informations dans un feuillet de calcul ;
- rassembler l'ensemble des feuillets de calcul renseignés dans un répertoire ;
- lancer le fichier lié à la macro pourvu du code permettant de générer les informations complémentaires de performance énergétique ;
- ouvrir le fichier récapitulatif des informations relatives aux 120 cas et rafraichir le calcul du fichier.

#### • Vérification des données morphologiques extraites par un exemple archétypal

Avant de procéder à l'analyse exhaustive des 120 projets, il semblait judicieux de vérifier la justesse des données morphologiques obtenues sur le logiciel Archiwizard. Un exemple archétypal simple a été créé et a permis de valider les informations extraites via le logiciel.

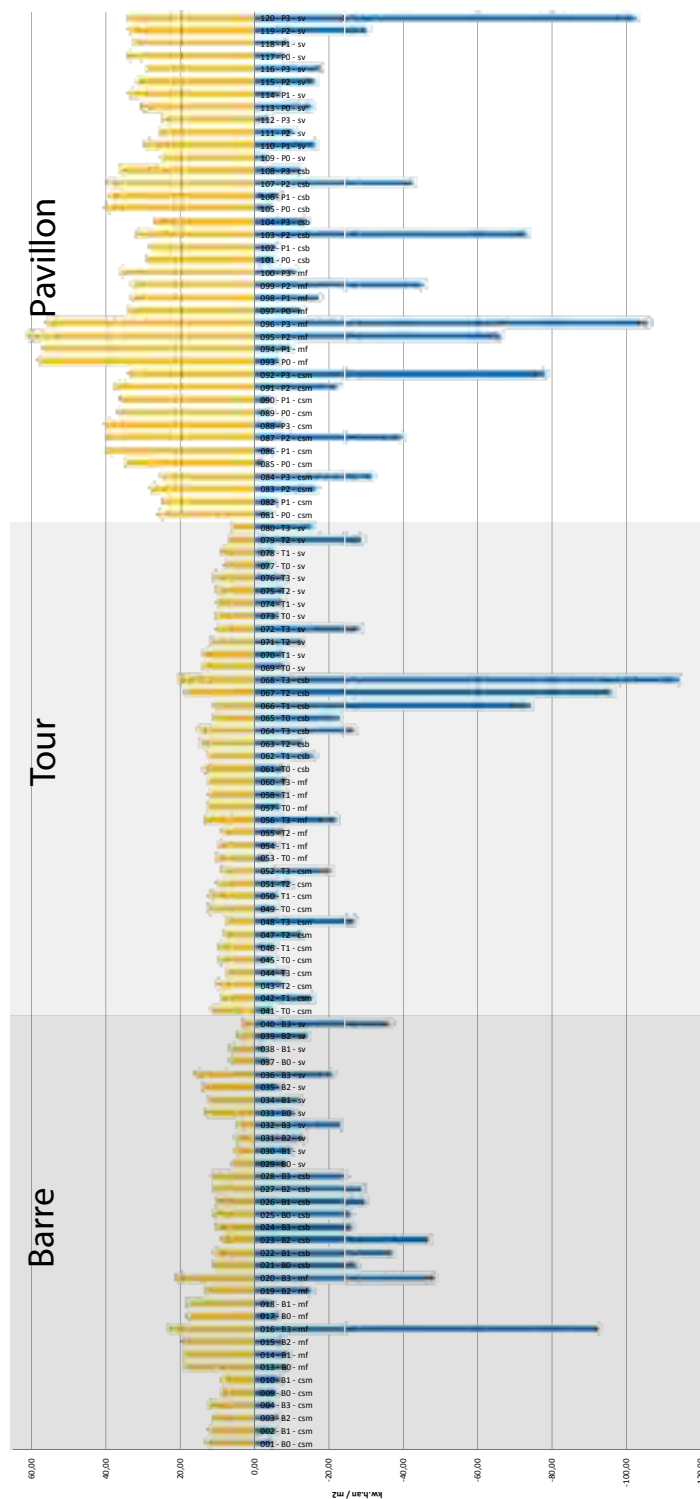
Cet exemple présente les caractéristiques morphologiques suivantes :

- volume parallélépipédique de deux étages égaux aux dimensions inégales ( longueur = 10 mètres, largeur = 8 mètres, hauteur = 6 mètres) ;
- volume orienté plein sud dans sa longueur et percé de fenêtre tel que  $S_{baies\ Sud} = 25\text{ m}^2$ ,  $S_{baies\ Nord} = 5\text{ m}^2$ ,  $S_{baies\ Est} = 10\text{ m}^2$ ,  $S_{baies\ Ouest} = 10\text{ m}^2$ .

---

40 Toutes ces données seront comparées dans la partie 4-2.





4-09

#### 4-09. Besoins en chaud et froid 2013

Graphe issu du tableau Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

■ Besoin Chaud  
Annuel 2013  
au m²

■ Besoin Froid  
Annuel 2013  
au m²

Les précaution suivantes ont été prises pour la vérification des données :

- deux étages pour avoir un calcul de SHAB<sup>41</sup> un peu plus sophistiqué avec un plancher intermédiaire ;
- des étages de 3 mètres pour que Archiwizard les détecte comme pièces ;
- des dimensions inégales pour différencier les orientations.

## 4`2 Exploitation et comparaison des résultats de performance énergétique

### 4`2`1 Enjeu d'une analyse comparative du bilan énergétique et de son évolution

- **Réchauffement climatique, questionnements impliqués**

**- - Les deux critères de performance énergétique :  
besoin en chaud et besoin en froid**

Pour comprendre les répercussions du changement climatique sur les bâtiments existants et projets à venir, il est judicieux de choisir des critères de performance énergétique sensibles à l'augmentation de température. C'est le cas des besoins en chaud et en froid (figure 4-09).

Contrairement à une approche multicritère de performance énergétique comme celle de Laetitia Arantes, celle-ci est voulue simple car la multiplicité des résultats intervient dans la comparaison des situations.

*« D'une part, nous affirmons que, pour appréhender justement la performance énergétique des bâtiments, il est nécessaire de considérer le bilan énergétique total des bâtiments. Il ne s'agit plus seulement de maîtriser l'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments, mais de tenir compte de l'ensemble du contexte énergétique qui les entoure. Par bilan énergétique total, nous entendons l'ensemble des usages mis en jeu lors de la construction, le fonctionnement et l'exploitation du bâtiment. »<sup>42</sup>*

Par ailleurs, nous considérerons uniquement les besoins en chaud et les besoins en froid dans l'idée de s'approcher plus d'un idéal de confort que d'une consommation énergétique réelle et précise. Le détail mensuel des besoins, obtenu sur le logiciel Archiwizard, est fortement appréciable car il permet de créer les deux situations saisonnières été/hiver explicités ci-après.

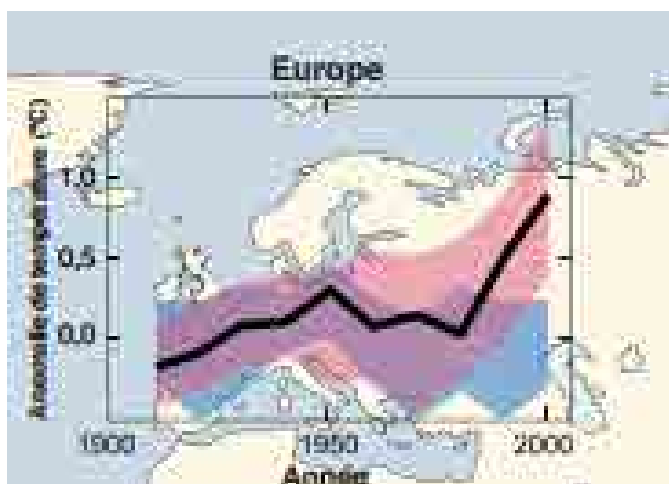
---

41 Surface habitable sans prise en compte de l'épaisseur des murs.

42 Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012, p. 76.

| Csi                                     | Variation de température<br>(°C) pour 2000-2099 par rapport à 1980-1999 + s |                     |
|---|---|---------------------|
|   | Valeur la plus<br>probable  | Intervalle probable |
| Concentration constante,<br>niveau 2000 | 0,6   | 0,3-0,9             |
| Scénario B1                             | 1,8   | 1,1-2,5             |
| Scénario A1T                            | 2,4   | 1,6-3,8             |
| Scénario IS92a                          | 2,4   | 1,4-3,9             |
| Scénario A1B                            | 2,8   | 1,7-4,4             |
| <b>Scénario A2</b>                      | <b>3,4</b>  | <b>2,0-5,4</b>      |
| Scénario A1FI                           | 4,0   | 2,4-6,6             |

4-10



4-11



4-12

#### 4-10. Hausse des températures : scénario A2

Tableau issu du rapport du GIEC de 2007

GIEC, Quatrième rapport d'évaluation :

Changements climatiques 2007

#### 4-11. Tendances prospectives sur le siècle futur

Graphique issu du rapport du GIEC de 2007

GIEC, Quatrième rapport d'évaluation :

Changements climatiques 2007

#### Hausse des températures de 2013 à 2050

Graphique issu du rapport de recherche IMR

ENSA Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, Rapport intermédiaire du programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res, novembre 2013.

### **- - Réchauffement climatique et questionnements impliqués**

En analysant les données météorologiques proposées par le GIEC, on remarque que le phénomène de réchauffement climatique est sans équivoque. En effet, la température moyenne à Paris risque de croître de 3,4 degrés en un siècle selon le scénario A2<sup>43</sup> (figure 4-10, 4-11 et 4-12) (cf partie 3-2-2).

Ce fait accepté, on peut se demander quelles seront les répercussions du réchauffement climatique sur les besoins des logements parsemant la Dorsale Est.

Est-il possible qu'une typologie réagisse mieux qu'une autre au changement climatique? Les réhabilitations auront-elles le même impact sur le court et le long terme? Certains bâtiments existants pourraient se révéler plus efficaces dans quarante ans que les projets de transformation que l'on propose pour les améliorer instantanément.

Faut-il privilégier les grandes opérations de réhabilitation sur le long terme ou les opérations chirurgicales sur des périodes de temps plus régulières? Une transformation lourde est-elle tout aussi pertinente dans l'immédiat que dans les prochaines décennies? On a tendance à privilégier les petites opérations car il est difficile de se projeter dans l'avenir ou que la période de l'investissement ne dépasse pas les 5 ans. Des conclusions prospectivistes pourraient corroborer des choix certes plus conséquents (et coûteux) mais plus économes (et rentables) sur le long terme.

Est-ce que les hivers seront moins rudes et les étés plus difficiles à affronter? Si oui, les risques estivaux de surchauffe seront-ils prépondérants vis-à-vis de l'adoucissement des hivers? Actuellement, la précarité énergétique touche davantage les foyers en hiver qu'en été car les bâtiments anciens ne bénéficient pas d'une isolation performante. Cependant, l'été pourrait devenir la période la plus problématique si la multiplication des apports solaires ne se voit pas être contrecarrée par un système de ventilation efficace ou des protections solaires adéquates.

### **- - Définition des situations extrêmes été / hiver**

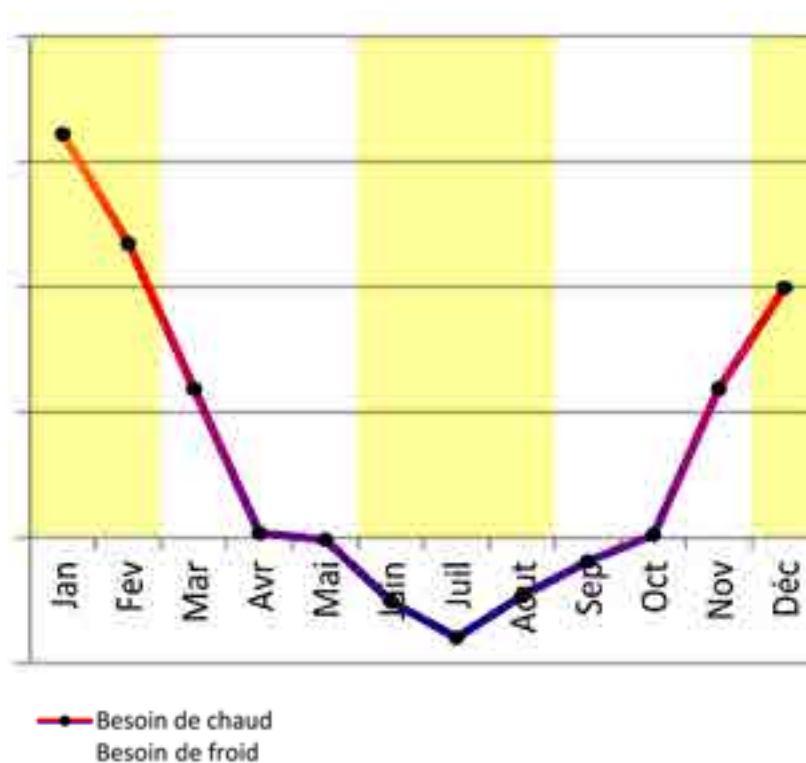
Par conséquent, les réflexions portent essentiellement sur l'évolution des besoins entre 2013 et 2050. Les scénarios prospectivistes du GIEC nous offrent la possibilité de quantifier l'évolution des besoins en été, en hiver et durant l'année.

---

43 GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Quatrième rapport d'évaluation : *Changements climatiques 2007* ( rapport disponible sur [www.ipcc.ch/report/](http://www.ipcc.ch/report/)) : Les scénarios climatiques issus du quatrième rapports sont classés en quatre familles selon les hypothèses de développement économique formulées :  
Scénario A1 - Croissance économique rapide (monde homogène)  
Scénario A2 - Développement économique avec une orientation régionale (monde hétérogène)  
Scénario B1 - Durabilité environnementale globale (monde homogène)  
Scénario B2 - Durabilité environnementale locale (monde hétérogène)  
La base de données établies par le GIEC est disponible sur le site du Data Distribution Centre.

|                                 | Situation Hiver |        |        |        |        | Situation Été |        |       |        |        |        |        |         |
|---------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Cumuls (kWh)                    | Jan             | Fev    | Mar    | Avr    | Mai    | Jun           | Juil   | Aout  | Sep    | Oct    | Nov    | Déc    | Annuel  |
| Contribution solaire            | 3475            | 4184   | 6882   | 9530   | 10704  | 11245         | 11605  | 10324 | 8512   | 6859   | 4669   | 3061   | 91050   |
| Apports internes                | 14353           | 13098  | 14506  | 14108  | 14353  | 14108         | 13695  | 8615  | 14322  | 14353  | 13894  | 11048  | 160453  |
| Transmission par l'enveloppe    | -19466          | -16751 | -16223 | -13571 | -13926 | -11276        | -9949  | -8324 | -10873 | -11762 | -14395 | -13192 | -159708 |
| Pertes par renouvellement d'air | -14294          | -12103 | -10719 | -9865  | -10128 | -10954        | -10825 | -7490 | -10897 | -9535  | -9975  | -11071 | -127855 |
| Rayonnement vers la voûte       | -1115           | -993   | -1090  | -1044  | -1017  | -958          | -972   | -1005 | -1022  | -1080  | -1055  | -1130  | -12485  |
| Contribution de l'éclairage     | 947             | 835    | 814    | 596    | 463    | 407           | 376    | 335   | 692    | 838    | 897    | 746    | 7946    |
| Besoin de chaud                 | 16100           | 11730  | 5936   | 164    | 0      | 0             | 0      | 0     | 0      | 102    | 5942   | 9968   | 49942   |
| Besoin de froid                 | 0               | 0      | 0      | 0      | -87    | -2546         | -3995  | -2328 | -957   | 0      | 0      | 0      | -9913   |

4-13



4-14

#### 4-13. Besoins pour les situations Été et Hiver

Tableau issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

#### 4-14 - Evolution des besoins Été et Hiver

Graphique issu du tableur Excel - projet 001-B0-csm

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

Les besoins fluctuent fortement sur des intervalles de temps plus réduits . Ces variations sont cycliques sur une année et atteignent leur valeur extrême en été et en hiver. De ce fait, le bilan annuel peut être trompeur car en sommant les besoins en chaud et en froid sur l'année, on pourrait croire à la hâte qu'ils se compensent. La réalité physique du phénomène est toute autre : les besoins sont déphasés et non compensables.

D'où le recours à **une disjonction des cas été-hiver** (figure 4-13) pour lesquels les besoins sont intégralement chauds ou froids et donc additionnables car de même nature (figure 4-14). Par ailleurs, l'objectif était de concentrer l'analyse sur des situations extrêmes d'inconfort. En appelant au bon sens commun, on prend comme postulat que les situations extrêmes ont lieu en été et en hiver. En portant une attention particulière aux résultats obtenus sur les 120 cas, on remarque que les besoins les plus prononcés s'étendent la plupart du temps sur trois mois. Les plages de temps choisies pour définir les deux situations saisonnières extrêmes sont donc :

**- situation été : Juin-Juillet-Aout**

**-situation hiver : Décembre-Janvier-Février**

Ces besoins extrêmes seront comparés à un besoin saisonnier moyen qui est calculé à partir des besoins totaux annuels (divisés par quatre pour ramener à la saison de trois mois). De cette façon, il sera possible de prendre la mesure de l'étendue des valeurs extrêmes par rapport aux moyennes établies sur l'année.

**- - Pertinence des réhabilitations : les trois scénarios d'intervention passés au crible selon deux critères**

L'investigation porte aussi sur la pertinence des interventions possibles sur le court et le long terme. Pour ce faire, deux critères temporels seront considérés :

- la variation instantanée des besoins 2013 provoquée par chaque intervention ;
- l'évolution relative des besoins pour cette intervention de 2013 à 2050.

**• Quelles informations et pourquoi ?**

**- - Unités d'énergie et comparaison croisée des besoins de 2013 à 2050 / entre propositions d'intervention**

Les besoins sont calculés en : **kWh** sur le logiciel Archiwizard. C'est une unité d'énergie. La différence des besoins calculés en valeur absolue est symptomatique des fortes variations de taille entre bâtiments et ne présente guère de sens d'un point de vue comparatif. La différence des besoins entre 2013 et 2050 informe simplement sur l'augmentation ou la diminution des besoins.

Afin de comparer les besoins entre projets de dimensions très variables, tous les résultats seront divisés par la surface habitable et donc ramené au m<sup>2</sup>.



La forte dispersion des valeurs porte toujours préjudice à leur représentativité mais l'étendue statistique extra-typologique<sup>44</sup> est tout de même conséquemment réduite.

L'évolution des besoins dans le temps sera calculée de manière relative par rapport aux besoins initiaux de 2013. L'augmentation relative donne une idée de l'impact du réchauffement climatique sur le confort.

La contribution des différents types d'énergie (apports, pertes et besoins en chaud ou froid) sera elle aussi évaluée dans son rapport au bilan énergétique global. Le pourcentage des besoins en chaud / froid et des apports / pertes sur le bilan total permet de déterminer les paramètres prépondérants sur lesquels il serait préférable d'agir. Les besoins en froid et besoins en chaud obtenus sont intimement liés aux situations été et hiver et ne seront pas retenus dans la suite de l'étude.

### **- - Approche statistique et représentativité des échantillons**

*« Le but de la statistique est d'extraire des informations pertinentes d'une liste de nombres difficile à interpréter par une simple lecture. [...] L'inférence statistique consiste à induire les caractéristiques inconnues d'une population à partir d'un échantillon issu de cette population. Les caractéristiques de l'échantillon, une fois connues, reflètent avec une certaine marge d'erreur possible celles de la population. [...] L'inférence statistique est donc un ensemble de méthodes permettant de tirer des conclusions fiables à partir de données d'échantillons statistiques. L'interprétation de données statistiques est, pour une large part, le point clé de l'inférence statistique. »<sup>45</sup>*

Les calculs statistiques sont nécessaires dans le cas d'un grand échantillonnage de données. Les quelques indicateurs statistiques de base (étendue, moyenne et écart-type) donne la possibilité de décrire la distribution des données et d'évaluer la valeur descriptive que peut arborer une moyenne vis-à-vis de l'échantillon concerné.

Pour calculer des valeurs représentatives (ou du moins le plus possible), les moyennes de tous les résultats de performance énergétique seront calculées pour chaque typologie (barre, tour et pavillon) et chaque degré d'intervention (existant, a minima, greffe et transformation globale de l'enveloppe). Chaque moyenne est associée à un écart-type qui illustre la dispersion de l'échantillon autour de la valeur moyenne. Grâce à cette valeur, on prend la mesure de la variabilité intra-typologique<sup>46</sup> des besoins.

A partir de ces moyennes, seront sélectionnés des cas représentatifs pour chaque typologie.

---

<sup>44</sup> Relatif à toutes les typologies. Par opposition à intra-typologique pour les considérations n'ayant valeur que dans un groupe typologique bien délimité.

<sup>45</sup> Wikipedia encyclopédie : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Statistique>

<sup>46</sup> Par opp. à extra-typologique.





4-15

#### 4-15. Carte d'identité du cas représentatif des barres

Images issues du « catalogue de projet » regroupant les fiches d'identité  
 ENSA Marne-la-Vallée, laboratoire OCS, UMR AUSser, Rapport intermédiaire du  
 programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res, novembre 2013.

Ces cas de figure - bâtiments existants et interventions comprises - serviront à l'étude approfondie des facteurs influant sur les besoins énergétiques, à savoir les six types d'apports et de pertes définis précédemment dans *la partie 4-1-2*.

#### **4`2`2 Choix des cas représentatifs de chaque typologie pour l'étude approfondie**

- **Critères de sélection**

La sélection s'est faite par confrontation entre la moyenne par typologie et les valeurs de chaque cas. Plus l'écart est faible, plus le cas de figure est représentatif de sa catégorie typologique<sup>47</sup>.

- **Trois cas de figures représentatifs et leurs propositions d'intervention**

Au vu des données recensées, les cas les plus représentatifs sont (*figure 4-15*):

- 017 à 020 pour la barre ;
- 069 à 072 pour les tours ;
- 105 à 108 pour les pavillons.

#### **4`2`3 Méthodologie de comparaison multiparamétrique intra et extra-typologique**

- **Définition des paramètres de situation**

Les innombrables données (150 000 au total) relatives aux 120 projets analysés sont toutes caractérisées par plusieurs paramètres dits de situation<sup>48</sup>. Les résultats seront critiqués par comparaison corrélée des besoins et des situations suivantes :

- hypothèses de calcul (calcul original, corrigé et combiné<sup>49</sup>) ;
- situations saisonnières (été, hiver, annuel) ;
- scénarios prévisionnels (2013, 2050) ;
- typologies (barre, tour, pavillon) ;
- degrés d'intervention (a minima, greffe et enveloppe).<sup>50</sup>

---

47 Les critères de sélection par ordre d'importance croissant sont les suivants :

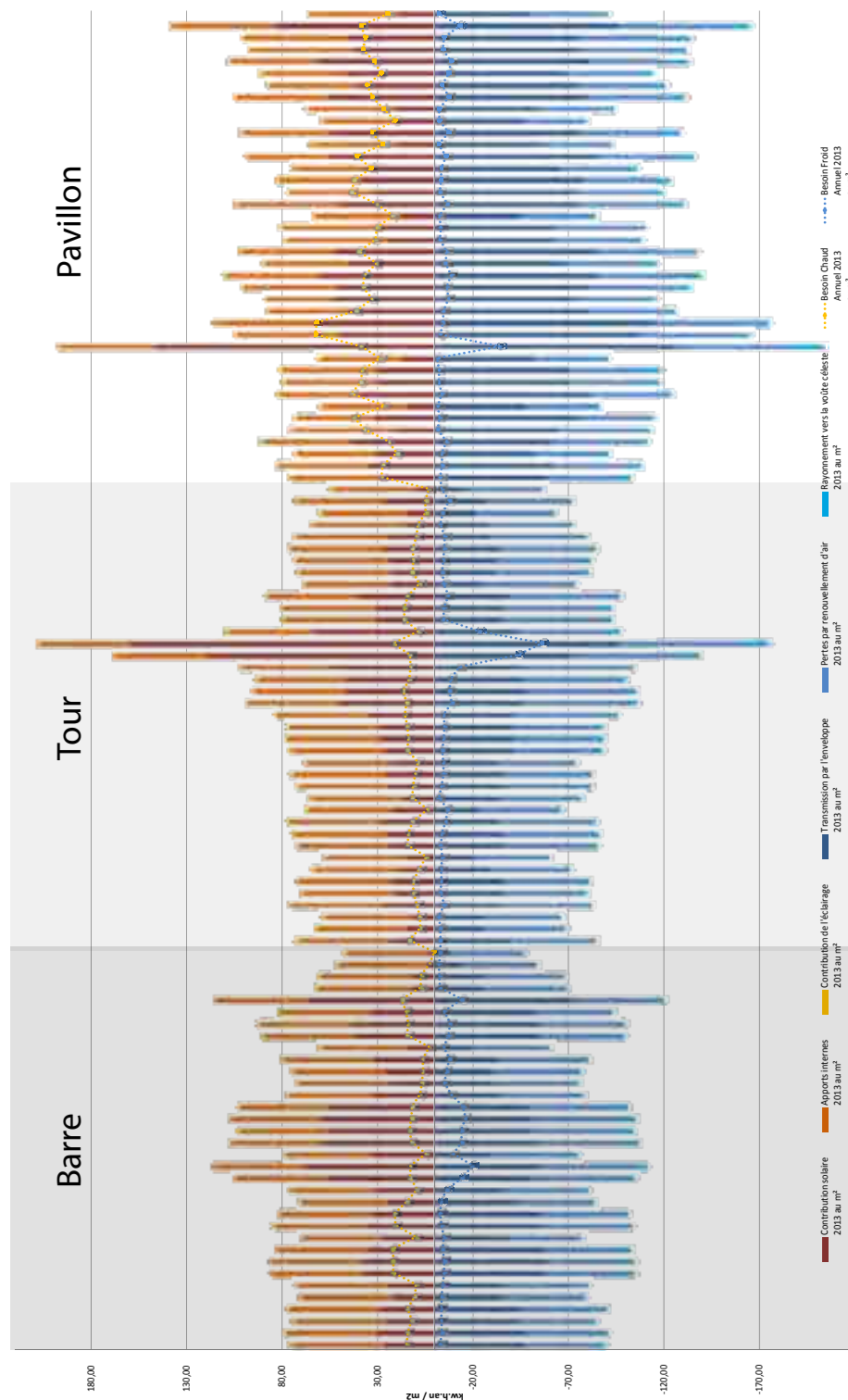
- Besoin total annuel 2013 par m<sup>2</sup> : caractéristique de l'efficacité énergétique ;
- Augmentation relative des besoins de 2013 à 2050 : propre à la capacité d'adaptation du projet ;
- Facteur de forme : indicateur morphologique caractéristique de la géométrie ;
- Porosité volumique : indicateur morphologique propre à la proportion de surface vitrée/opaque.

48 Par opposition aux paramètres morphologiques ou énergétiques qui varient pour une même situation.

49 Définis en partie 4-1-1

50 Et peut-être :

- des différents échanges énergétiques (apports, pertes) pour les cas représentatifs ;
- des orientations privilégiées ;
- de groupes de compacité similaire ;
- de catégories de proportion vitrée comparable.



4-16

#### 4-16. Contribution de chaque apport et perte

Graphe issu du tableur Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

Les situations à comparer sont de nature différente (parfois temporelle, parfois typo-morphologique etc) et implique une étude de type multicritère. La variation simultanée de plusieurs conditions circonstancielles de calcul complique l'obtention de résultats car aucune tendance claire ne peut s'en dégager. Dans un souci de comparaison, il est nécessaire d'employer une démarche spécifique décomposée en deux étapes :

- figer des paramètres de situation qui serviront de constantes comparatives ;
- faire varier un de ces paramètres pour en déduire une loi d'évolution ou une tendance.<sup>51</sup>

#### • Procédure de comparaison

##### **Préalable : Comparaison des trois hypothèses de calcul** (cf partie 4-1-1)

De prime abord, les analyses thermiques ont été effectuées avec et sans considération des besoins propres à l'espace tampon afin de comparer l'impact de celui-ci.

Les trois hypothèses de calcul ont été définies pour tendre vers des résultats parasités au minimum par des aberrations. Néanmoins, ils fournissent tous des informations complémentaires qui décrivent le bâtiment étudié. Le calcul original a été conservé car il tient compte de la surface totale, serre comprise, malgré les aberrations constatées pour plusieurs cas. Quant au calcul corrigé, il présente l'avantage de limiter les anomalies tout en préservant une certaine authenticité physique. Le calcul combiné permet d'avoir une meilleure visibilité globale sur l'évolution des besoins mais reste un calcul artificiel, à la croisée des deux premières hypothèses.

Dans un souci de véridicité, nous procéderons à l'analyse des résultats de performance énergétique obtenu par **le calcul corrigé** (figure 4-16). Les hypothèses de calcul ainsi figées limiteront significativement le nombre de paramètres.

Au vu des graphiques, on remarque que les besoins du calcul original<sup>52</sup> explosent pour certains projets. Pour le calcul corrigé<sup>53</sup>, les besoins sont certes lissés et souvent équilibrés mais ne reflètent aucunement la réalité. En effet, on observe souvent l'apparition de besoins en froid en Octobre par exemple. Le calcul corrigé semble donc le plus à même de nous donner des résultats cohérents afin de tisser la relation entre performance et indicateurs.

---

51 Par exemple, il est possible de comparer l'évolution des besoins en hiver de 2013 à 2050 pour les bâtiments existants de la typologie barre. Dans ce cas, les paramètres constants sont :

- la situation : Hiver ;
- la typologie : Barre ;
- le degré d'intervention : Bâtiment existant.

Le paramètre variable est :

- le scénario prévisionnel : 2013 - 2050.

52 Sans protection solaire adéquat et avec considération de la serre.

53 Avec protection solaire et sans considération de la serre.



De plus, la surface de l'espace tampon pour les projets avec greffe de serre n'est pas considérée dans le calcul des performances énergétiques de manière à pouvoir confronter les résultats avec ceux obtenus dans le cas de l'état existant du bâtiment étudié.

### ***Comparaison intra-typologique des prévisions et situations***

La comparaison des prévisions 2013-2050 et des situations été/hiver se fera au sein de chaque typologie pour vérifier si les projets de chaque typologie se comportent un peu près de la même façon. Seront ainsi comparés les barres existantes (B0<sup>54</sup>), les barres a minima (B1) et ainsi de suite<sup>55</sup>.

Seront ensuite comparés les prévisions et situations saisonnières entre degrés d'intervention : l'évolution de B0 à B1 sera comparée à l'évolution de B0 à B2 et de B0 à B3 et ce, pour les trois typologies.

Procédure détaillée de comparaison<sup>56</sup> :

**1)** Pour une typologie et un degré d'intervention constants (entre les B0, etc):

- comparaison des scénarios prévisionnels pour chaque scénario saisonnier ;
- comparaison des situations saisonnières pour la période actuelle de 2013.

**2)** Pour un projet et ses évolutions possibles (Entre B0,B1,B2 et B3 etc) :

- comparaison de l'évolution des prévisions entre interventions pour chaque situation saisonnière ;
- comparaison de l'évolution des situations saisonnières entre interventions pour la période 2013.

**3)** Les deux premiers points sont complémentaires pour évaluer la pertinence d'une proposition d'intervention. En corrélant les deux observations, on a une visibilité sur le court et long terme :

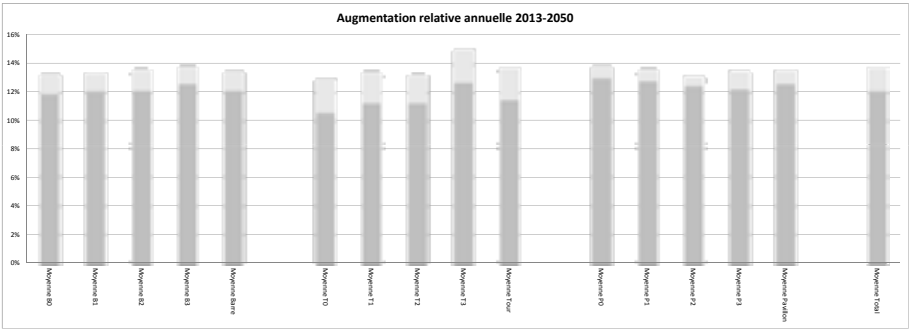
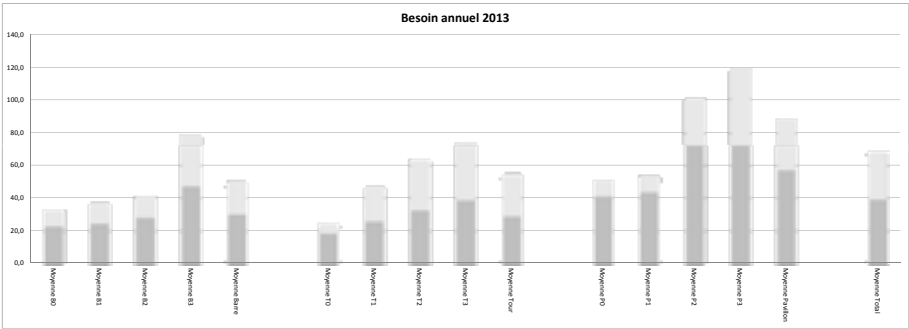
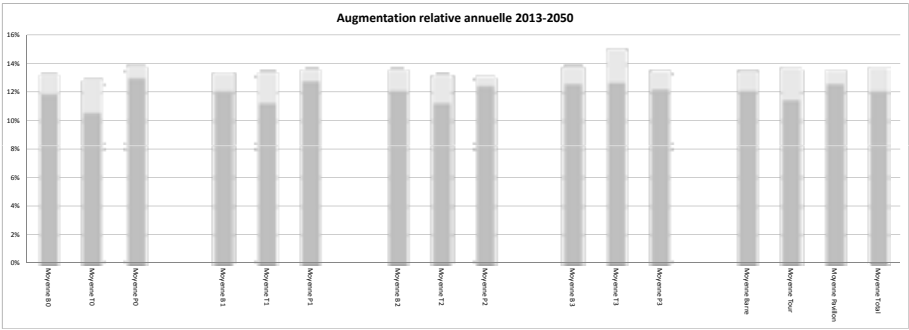
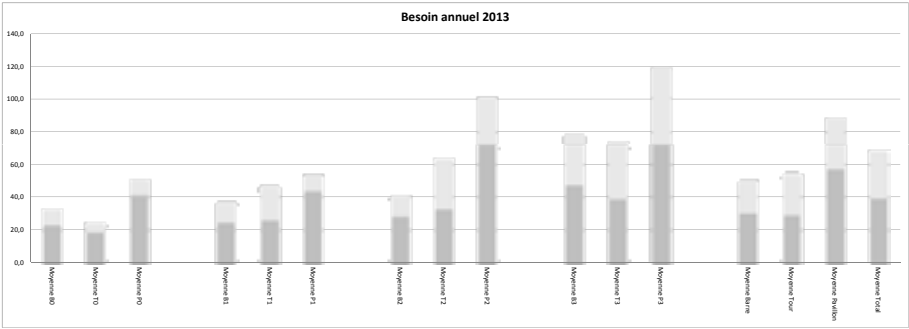
- le premier point permet de statuer sur l'adaptabilité de chaque catégorie typologique aux évolutions 2013 à 2050 :  
quelle intervention se comportera mieux sur le long terme ?
- le deuxième point permet de conclure sur la pertinence d'un projet sur le court terme :  
quelle est l'intervention qui réagira le plus adéquatement aux conditions climatiques dans l'immédiat ?

---

<sup>54</sup> cf la classification des projets mise en place en partie 2-3-3.

<sup>55</sup> Si ce n'est pas le cas, il faudra faire des sous-catégories typologiques (des catégories de morphologie comparable) pour lesquelles les besoins et les évolutions entre 2013-2050 de ces besoins sont un peu près similaires.

<sup>56</sup> Pour le cas Barre puis pour le cas Tour puis pour le cas Pavillon.



4-17

**4-17. Comparaison intra-typologique annuelle**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
*Documents créés pour l'étude :*  
Réda Oussennan

**4-17. Besoin annuel et augmentation relative entre typologies puis entre interventions**  
*Documents créés pour l'étude :*  
Réda Oussennan

### **Comparaison extra-typologique des prévisions et situations été / hiver**

Les typologies et les interventions seront comparées entre elles à partir des tendances et lois d'évolution établies lors des comparaisons intra-typologiques.

*Procédure détaillée de comparaison :*

**1)** Pour une typologie et un degré d'intervention constants :

- comparaison des tendances entre B0, T0 et P0 et ainsi de suite.

**2)** Pour un projet et ses évolutions possibles :

- comparaison des lois d'évolution entre B0-B1, T0-T1 et P0-P1 et ainsi de suite.

### **Comparaison détaillée des apports / pertes (et des besoins résultants)**

L'analyse se fera un peu de la même façon mais sera extrapolée aux détails des contributions de chaque type d'apports ou des déperditions causées par les types de pertes. On choisira un cas représentatif pour chaque typologie parmi les exemples retenus dans la *partie 4-2-2*. L'influence et l'évolution de chaque apport et perte seront passées au crible. Les apports et pertes seront étudiés en situations été et hiver car sur l'année ils n'ont pas la même influence et, d'autre part, ils fluctuent fortement sur des intervalles de courte durée.

## **4` 2` 4 Comparaison des résultats et conclusions**

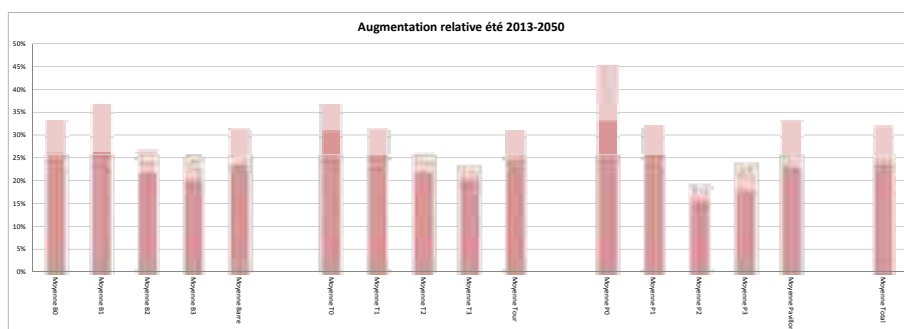
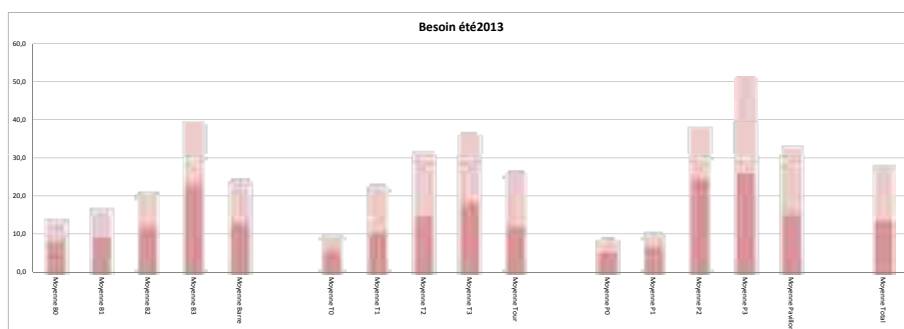
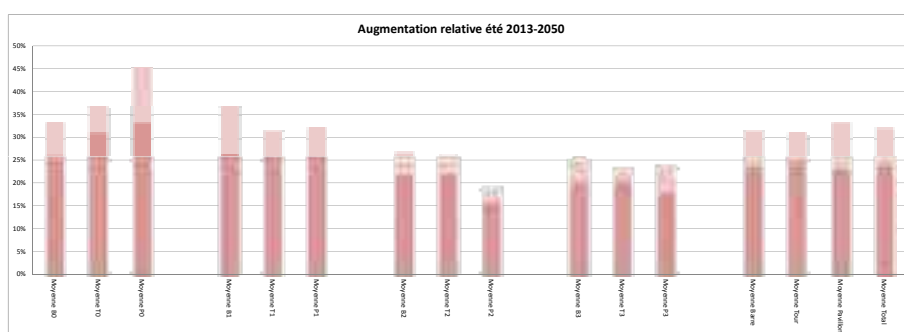
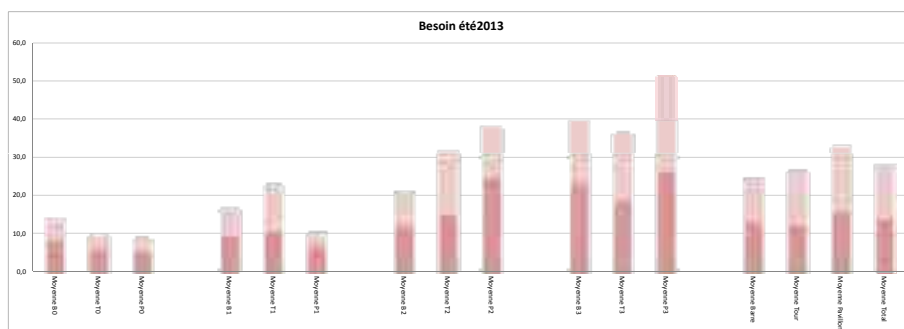
### **• Comparaison intra-typologique des prévisions et situations été / hiver**

*(figure 4-17, 4-18 et 4-19)*

**Sur l'année entre typologies :** les maisons individuelles sont deux fois moins efficaces que les logements collectifs. De surcroît, leur comportement énergétique est très variable d'une situation de projet à l'autre (écart-type élevé). De plus, les tours fonctionnent mieux et de manière plus homogène (l'écart-type est deux fois moindre) pour le bâtiment existant. La tendance s'inverse concernant tous les modes d'intervention. Après réhabilitation, l'efficacité énergétique des tours devient très hétérogène.

**Sur l'année entre interventions :** Après intervention, les écarts de comportement diminuent pour le cas de la greffe. Les autres interventions révèlent le même fossé entre pavillons et les logements collectifs.





4-18

**4-18. Comparaison intra-typologique Été**  
 Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
 Documents créés pour l'étude :  
 Réda Oussennan

**4-18. Besoin annuel et augmentation relative  
 entre typologies puis entre interventions**  
 Documents créés pour l'étude :  
 Réda Oussennan

L'incidence des interventions sur la performance énergétique dépend fortement de la typologie i.e. barres, tours et pavillons ne réagissent pas de la même façon aux différentes réhabilitations.

Les modifications de la barre ont toujours un effet positif, celles de la tour sont préjudiciables, sauf dans le cas extrême de la transformation complète de l'enveloppe, et celles des pavillons présentent une neutralité étonnante sauf dans le cas de la serre qui améliore le bilan énergétique annuel de la plupart des maisons.

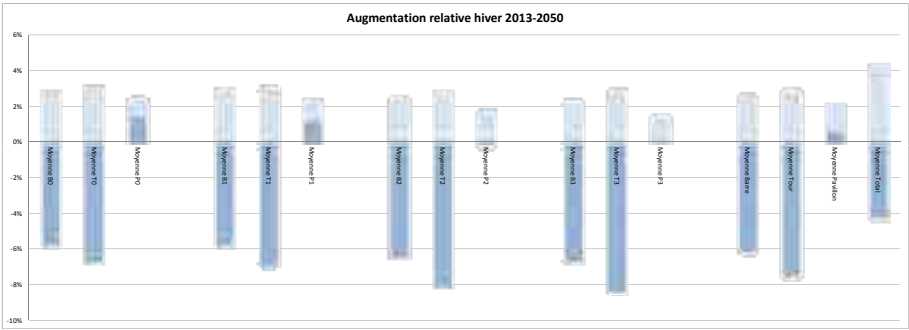
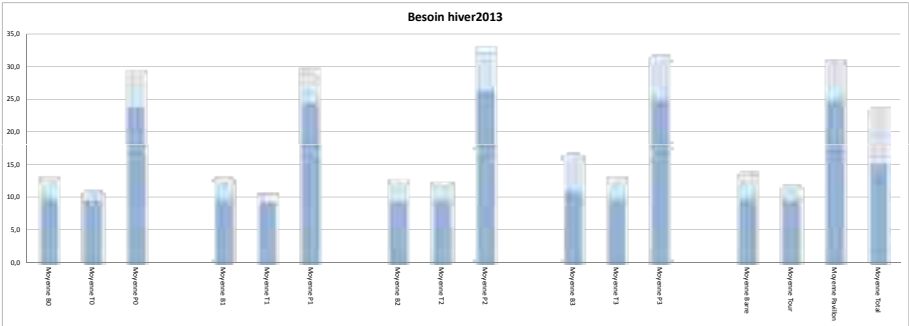
**Sur l'année en évolution des besoins :** les tours sont encore les plus aptes à s'adapter au changement climatique même si les disparités entre typologies ne sont pas énormes. Les interventions n'ont pas d'influence sur l'évolution du bilan annuel.

**Conclusions sur l'année :** En considérant les performances énergétiques sur le court et le long terme, on remarque qu'on peut tirer des conclusions uniquement en comparant la variation instantanée des besoins car l'augmentation relative de 2013 à 2050 est quasiment la même pour tous les cas. Il faut donc se référer aux résultats énoncés ci-dessus. Seule nuance, la barre s'adapte moins bien à la transformation globale alors que ce type de réhabilitation fournit les meilleures résultats sur le court terme.

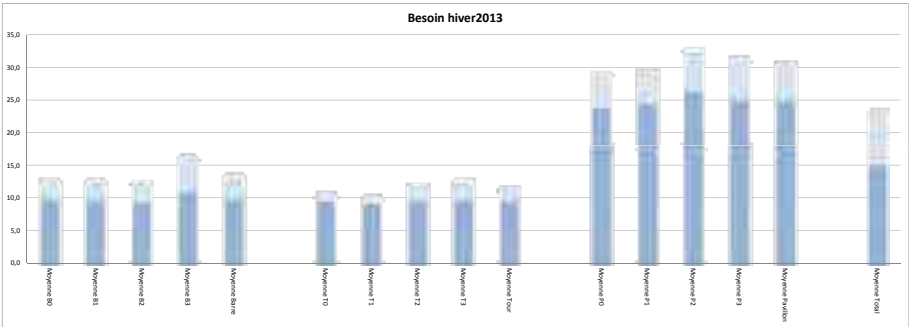
**En été entre typologies :** En moyenne et en écart-type, ce sont les pavillons qui tirent leur épingle du jeu quelle que soit l'intervention. Seule la transformation globale de l'enveloppe entache les bons résultats des maisons individuelles. Pour l'état existant, la tour est assez performante comparée à la barre. Son efficacité se dégrade fortement avec les propositions de réhabilitation architecturale (les besoins sont doublés en moyenne). En effet, la performance énergétique de certaines tours explose littéralement et génère de grands écarts entre projets : les écarts excèdent même la moyenne pour les interventions a minima et pour les greffes de loggias.

**En été entre interventions :** Même si le pavillon réagit mieux en été, les modifications de sa morphologie altèrent ces bons résultats proportionnellement à la lourdeur de l'intervention. Les barres semblent insensibles aux réhabilitations contrairement aux tours qui se dégradent de la même manière que les maisons individuelles. Unique point positif, l'enveloppe porte moins préjudice à la performance énergétique que les autres modifications.

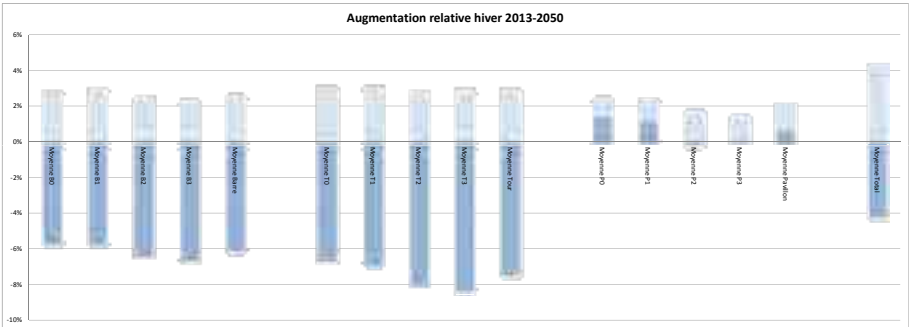
**En été en évolution des besoins :** l'évolution des besoins est faramineuse comparée à celle des besoins annuels. La situation tend à s'hétérogénéiser sur l'année même si le bilan global est moins alarmant. On constate que les projets qui s'adaptent le mieux au réchauffement climatique sont ceux qui sont les moins performants sur le court terme. Les pavillons sont médiocres même si les résultats tendent à se rapprocher avec l'ampleur des transformations proposées. Dans cette exercice, c'est la barre qui peut se targuer d'être le meilleur élève de la classe.



1



2



4-19

**4-19. Comparaison intra-typologique Hiver**  
Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-19. Besoin annuel et augmentation relative  
entre typologies puis entre interventions**  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**Conclusions pour l'été :** En règle générale, les interventions sur les tours sont peu fructueuses, celles sur les pavillons sont intéressantes mais uniquement sur le court terme et celles sur les barres restent assez neutres en 2013 et 2050. Le choix de l'intervention se fera en fonction de la primauté ou non d'un investissement sur les années à venir. Sans ça, les typologies sont assez équilibrées même si différenciées.

**En hiver entre typologies :** les projets réagissent un peu près uniformément à la période hivernale (écart-type faible pour tous les cas). Cependant, le pavillon est deux fois plus énergivore que les habitations collectives en hiver. Les barres et les tours possèdent approximativement les mêmes besoins pour la situation existante mais se différencient pour chaque type d'intervention. La barre est plus efficace pour la greffe et la tour plus efficiente a minima et pour la modification générale de l'enveloppe.

**En hiver entre interventions :** Tous les types de transformation architecturale améliorent la situation de l'existant pour les bâtiments collectifs. Leur amélioration croît en relation avec le degré d'intervention. L'enveloppe recèle ainsi un bon potentiel tant pour les tours que pour les barres. Pour les pavillons, la situation critique d'origine est partiellement soulagée dans le cas de l'adjonction de serre.

**En hiver en évolution des besoins :** les grands types d'habitation bénéficient abondamment du réchauffement climatique et voient leur besoin en chaud décliner significativement. A contrario, les pavillons dissipent trop d'énergie pour pouvoir obtenir un bilan positif. On aboutit aux mêmes ordres de grandeur entre niveaux d'intervention.

**Conclusions pour l'hiver :** Il paraît pertinent de proposer des réhabilitations conséquentes car elles sont très économes en besoins et s'adaptent, tout aussi bien que les interventions minimales, aux aléas du temps sur des périodes décennales.

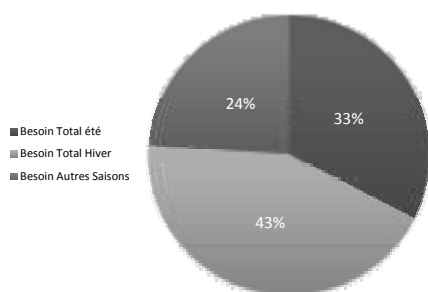
#### • Comparaison extra-typologique des prévisions et scénarios

**Besoins instantanés après intervention :** en général, les besoins en chaud durant la période hivernale représentent une part majoritaire du bilan total bien devant les besoins en froid d'été<sup>57</sup> (figure 4-20). Ce phénomène est d'autant plus observable si on considère l'ensemble des besoins en chaud et en froid sur l'année. Il vaut donc mieux se concentrer sur le cas « hiver » et ses besoins en chaud contre lesquels il est plus difficile de lutter que sur le cas « été » pour lequel une stratégie de ventilation adéquat est moins complexe à mettre en œuvre.

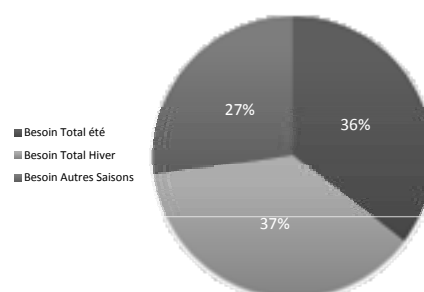
---

<sup>57</sup> Les variations en besoin de chaud sont relativement faibles entre les différentes propositions comparés aux besoins en froid qui fluctuent fortement. La difficulté de prendre en compte l'utilisation des équipements de ventilation et des protections solaires représente un défi pour la simulation thermique.

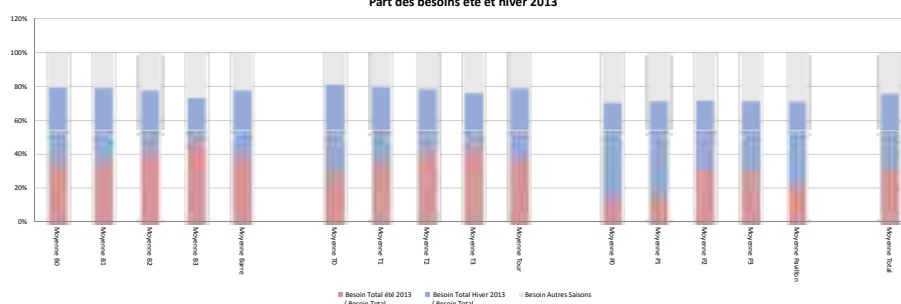
**Besoin été VS Besoin hiver 2013**  
Bilan saisonnier



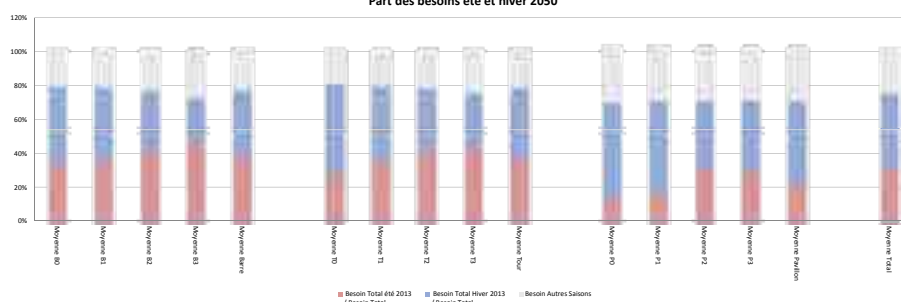
**Besoin été VS Besoin hiver 2050**  
Bilan saisonnier



**Part des besoins été et hiver 2013**

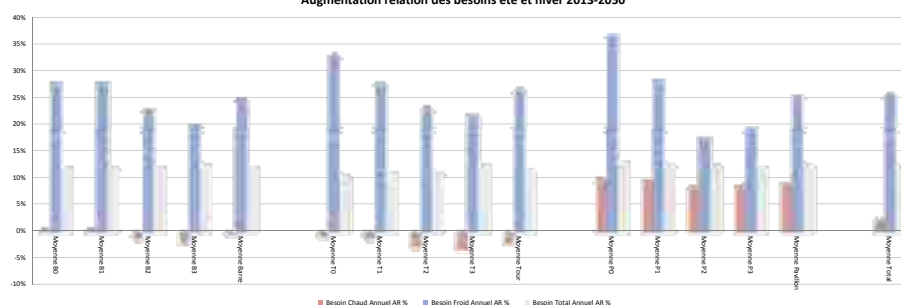


**Part des besoins été et hiver 2050**



4-20

**Augmentation relation des besoins été et hiver 2013-2050**



4-21

**4-20. Répartition des besoins entre Été et Hiver**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-21. Evolution relative des besoins en situation Été, Hiver et Annuelle**  
Document créé pour l'étude :  
Réda Oussennan

Dans le détail, les pavillons n'ont pas beaucoup de gains à récupérer en été car les besoins représentent une faible part du bilan énergétique annuel. Pour les barres et les tours, la situation en été se dégrade en concomitance avec l'ampleur des transformations architecturales. La différenciation entre projets de réhabilitation apparaît moins nette pendant la saison hivernale.

**Besoins différés après intervention :** en moyenne, l'augmentation des besoins de 2013 à 2050 est non négligeable et quasi-constante pour l'ensemble des projets: autour de 11% (figure 4-21). On peut donc affirmer que le réchauffement climatique sera préjudiciable au secteur de l'habitation si on n'adapte pas les bâtiments et projets. Les tours sont légèrement plus efficaces que les barres et pavillons si on se réfère aux résultats annuels.

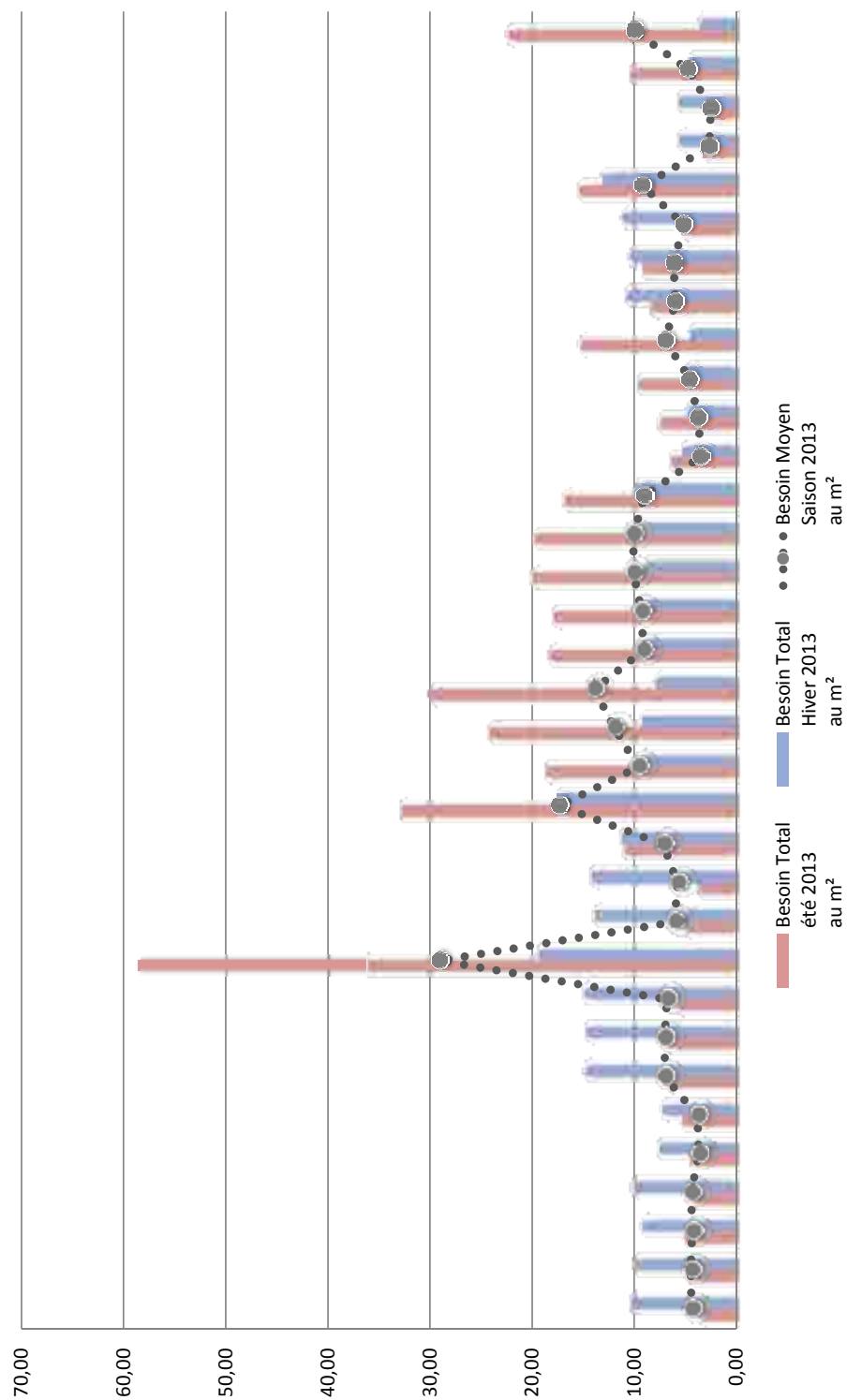
En général, de 2013 à 2050, les besoins en refroidissement vont augmenter significativement comparés aux besoins en chaleur qui vont faiblement croître pour les pavillons et stagner pour les autres groupes typologiques. On peut donc se concentrer tout autant sur le confort d'été que sur celui d'hiver puisque les besoins tendent à s'équilibrer entre saisons (même s'ils augmentent en cumul). Pour les projets qui se comportent les mieux face à l'augmentation des températures, on peut citer les réhabilitations de type enveloppe même si leur influence varie fortement entre été et hiver. En ce sens, on pourrait préconiser des décisions de réhabilitation plus osées si l'on se projette.

On remarque également que les tours se comportent légèrement mieux que les barres car la réaction des barres à l'évolution du climat dépend fortement de leur orientation (les tours n'ont pas d'orientation privilégiée par leur définition géométrique). En effet, on remarque que les barres qui réagissent les mieux sont celles orientées Est-Ouest. Quant aux maisons individuelles, le constat est, en moyenne, pire que les barres et les tours. La taille intervient sûrement dans l'équation.

Par ailleurs, on se rend compte que les besoins en froid augmentent encore davantage en été ; résultat qui paraît logique a priori. Les besoins en chaud en hiver présentent une amélioration comparativement au bilan annuel. En définitive, les besoins en chaud et froid vont augmenter globalement mais vont être catalysés en été et compensés en hiver.

In fine, on économise moins en hiver que l'on ne perd en été : ce qui corrobore encore la nécessité d'une intervention adaptée sur le long terme. Ce phénomène est plus dépendant des variations en pertes que des variations en apports comme nous le verrons plus tard dans la décomposition détaillée des besoins en apports et pertes.

Les barres et tours suivent pratiquement la même évolution de besoins entre 2013 et 2050. Les pavillons sont sensibles aux situations extrêmes « été » et « hiver » car leurs besoins en été augmentent fortement et ceux en hiver diminuent faiblement.



4-22

#### 4-22. Irrégularité des besoins selon les saisons

Graphe issu du tableur Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

- **Conclusions sur apports / pertes totaux**<sup>58</sup>

**Première indication :** calculer la somme des apports ou des pertes sur l'année est moins pertinent que de procéder par disjonction des cas été et hiver comme nous l'avions suggéré. En effet, en considérant une année entière, un phénomène de compensation non réaliste intervient (*figure 4-22*). De plus, les apports ou les pertes n'ont pas la même valeur au cours de l'année. En été, par exemple, les apports solaires sont préjudiciables et augmentent les besoins en froid tandis qu'en hiver, ils sont bénéfiques et amoindrissent les besoins en chaud. A partir du bilan global annuel, on pourrait conclure que sur l'année, il faut baisser les apports pour palier le réchauffement climatique alors qu'en réalité, ces apports sont toujours nécessaires localement en hiver. Il est donc préférable de comparer des situations définies sur des périodes au cours desquelles les besoins en chaud et froid ne sont pas déphasés. C'est le cas des situations extrêmes été et hiver. Par la suite, on associera donc les besoins en froid à la situation été et les besoins en chaud à la situation hiver.

**Deuxième indication :** les apports et les pertes n'ont pas la même influence en été et en hiver. En été, les deux sont équivalents dans le bilan mais en hiver, ce sont les pertes qui dominent. En règle générale, de 2013 à 2050, les besoins diminuent en hiver<sup>59</sup> mais explosent en été<sup>60</sup>.

#### 4`2`5 Discussion critique sur les conclusions

- **Conclusions sur les scénarios de Calcul**

En ajoutant des protections solaires, les besoins cumulés sur l'année sont quasiment les mêmes mais deviennent très variables entre saisons. En toute logique, on observe un contrebalancement en faveur des besoins en chaud qui prennent le pas sur les besoins en froid en Calcul corrigé.

Les protections solaires sont les bienvenues car elles diminuent plus les besoins en froid en été qu'elles n'augmentent les besoins en chaud en hiver. Des protections solaires adaptables, associées à des scénarios d'utilisation saisonniers seraient idéales et élimineraient l'effet, certes négligeable mais néfaste des protections solaires en hiver.

---

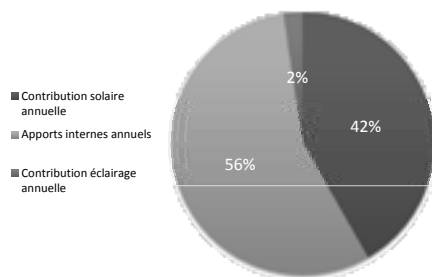
58 Attention à toujours pondérer les apports et pertes sur le bilan total car les augmentations relatives de 2013 à 2050 peuvent parfois apparaître comme fortement variables alors qu'elles représentent une faible part du bilan global. Par exemple, on observe souvent une augmentation relative des besoins en froid en été par la mise en place de protections solaires ; ce résultat étant totalement paradoxal. En réalité, les besoins en froid globaux diminuent en valeur absolue et l'augmentation relative signifie simplement que l'installation de protections solaires rend le bâtiment plus sensible aux fluctuations de 2013 à 2050 relativement aux faibles besoins initiaux.

59 Augmentation légère des apports (1 à 2%) et diminution des pertes (2 à 3%) : double atout.

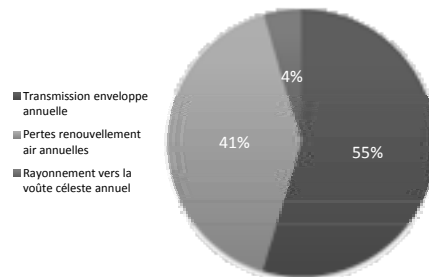
60 Augmentation des apports (2 à 3%) et diminution forte des pertes (5 à 6%) : double peine.



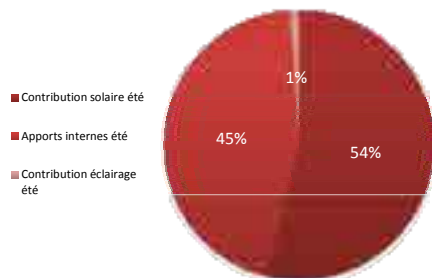
**% Apport / Apports totaux 2013**  
Bilan annuel



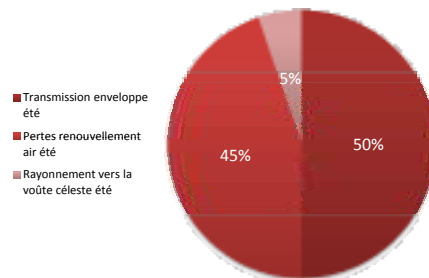
**% Perte / Pertes totales 2013**  
Bilan annuel



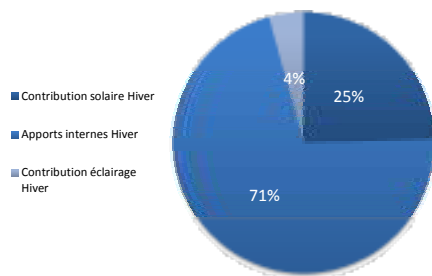
**% Apport / Apports totaux 2013**  
Bilan été



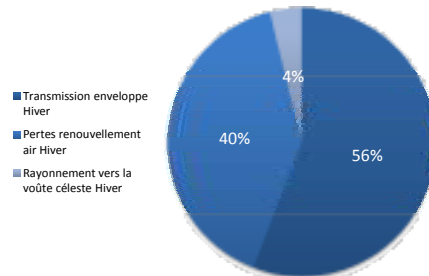
**% Perte / Pertes totales 2013**  
Bilan été



**% Apport / Apports totaux 2013**  
Bilan hiver

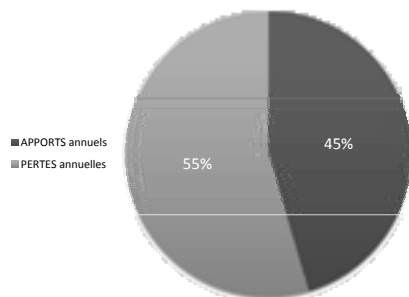


**% Perte / Pertes totales 2013**  
Bilan hiver

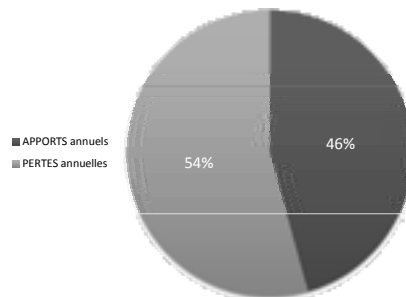


4-23

**Apports VS Pertes 2013**  
Bilan annuel



**Apports VS Pertes 2050**  
Bilan annuel



4-24

**4-23. Part de chaque apport et perte en 2013**  
Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-24. Evolution de la part des Apports et Pertes**  
Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

### • Conclusions sur apports / pertes détaillés pour donner une idée

Il est bon de rappeler que les apports sont bénéfiques en hiver et défavorables en été et inversement pour les pertes.

**Evolution des apports de 2013 à 2050 :** les apports internes représentent la plus grande part, suivis de la contribution solaire et de la contribution de l'éclairage.

(figure 4-23)

Les observations sont les suivantes (figure 4-24 et 4-25) :

- les apports internes ne varient pas car les scénarios d'occupation sont considérés comme immuables ;
- la contribution solaire augmente fortement en hiver et moyennement en été ;
- la contribution de l'éclairage diminue en été (car plus de lumière en 2050) et augmente moyennement en hiver.

**Evolution des pertes de 2013 à 2050 :** la transmission par l'enveloppe prévaut sur les pertes par renouvellement d'air. Le rayonnement vers la voûte céleste est négligeable (figure 4-23).

Les observations sont les suivantes (figure 4-24 et 4-25) :

- la transmission par l'enveloppe diminue fortement en été et moyennement en hiver. En été, on a donc plus de risque de surchauffe car le bâtiment évacue moins efficacement les gains qu'il emmagasine. En hiver, c'est avantageux.
- Les pertes par renouvellement d'air diminuent moyennement en été et augmentent moyennement en hiver, ce qui est doublement préjudiciable ;
- Le rayonnement vers la voûte céleste diminue fortement en été et en hiver.

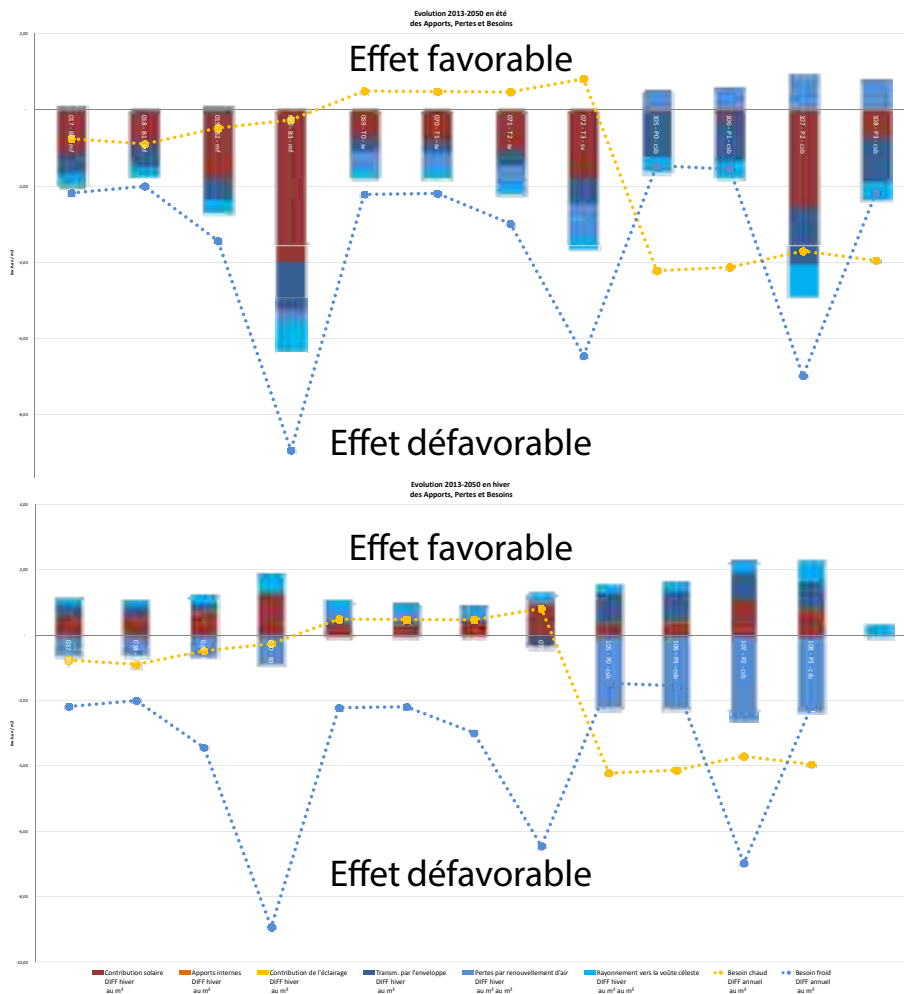
### • Conclusions générales sur le comportement énergétique instantané et différé

Les premiers résultats sur les performances énergétiques confirment le fait que le réchauffement climatique va davantage augmenter les besoins en froid en été qu'améliorer la situation en hiver à Paris. La situation sans s'inverser pourrait tout de même s'équilibrer. Actuellement, la précarité énergétique touche davantage les foyers en hiver qu'en été car les bâtiments ne bénéficient pas d'une isolation performante. Cependant, l'été pourrait devenir la période la plus problématique si la multiplication des apports solaires ne se voit pas contrecarrée par une bonne stratégie de réhabilitation.

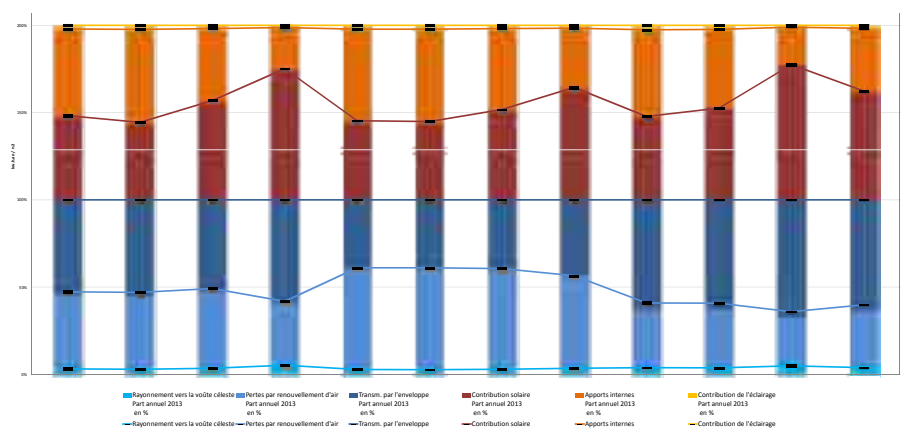
Certaines typologies réagissent légèrement mieux aux changements climatiques<sup>61</sup>. Ainsi, les tours se comportent mieux que les barres et les pavillons car la réaction de ces deux typologies à l'évolution du climat dépend fortement de leur orientation.

---

<sup>61</sup> 11% d'augmentation des besoins pour la tour et respectivement 12% et 13% pour les barres et pavillons.



4-25



4-26

**4-25. Evolution bénéfique ou préjudiciable des apports et pertes sur le confort Été et Hiver**  
Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-26. Evolution de la part de chaque apport et perte de 2013 à 2050**  
Graphe issu du tableur Excel récapitulatif  
Document créé pour l'étude : Réda Oussennan

La différenciation des performances énergétiques se ressent lorsqu'on étudie les situations été et hiver séparément. Le phénomène inverse est observable en période estivale au cours de laquelle les maisons individuelles résistent mieux au réchauffement climatique. Néanmoins, les pavillons ne bénéficient pas de l'amélioration des conditions de confort en hiver contrairement aux autres typologies<sup>62</sup> car l'énergie emmagasinée se dissipe beaucoup plus rapidement dans ces petits volumes ouverts sur plusieurs orientations. Grâce aux résultats obtenus via l'étude détaillée des cas représentatifs, on remarque qu'il faut intervenir sur la diminution des pertes par transmission de l'enveloppe tout en régulant les apports solaires en hiver.

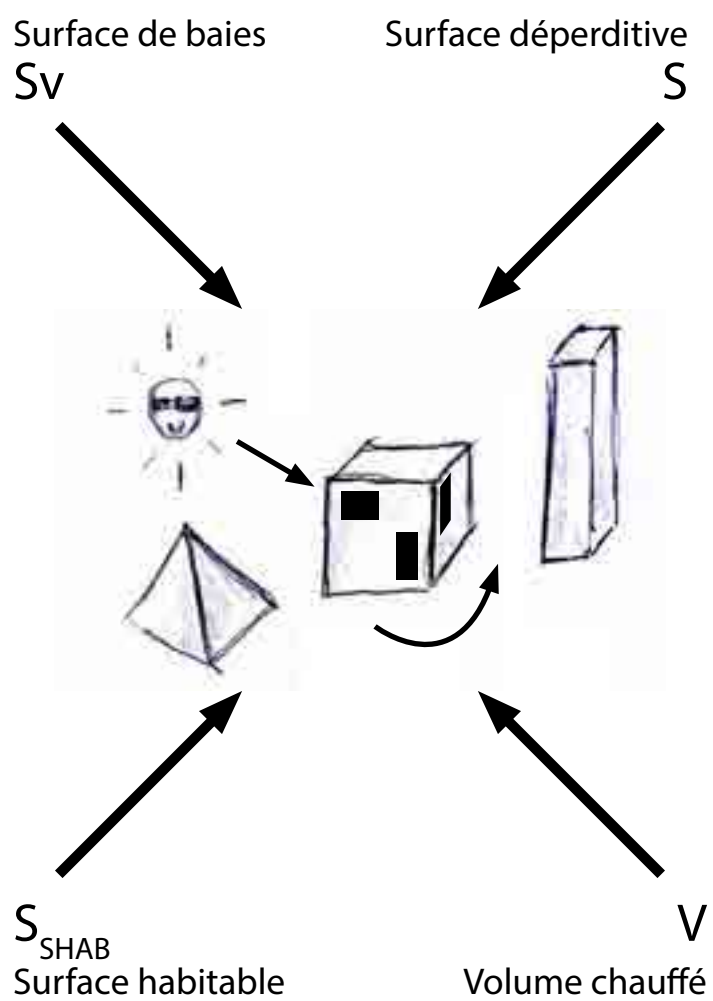
Par ailleurs, au sein de ses typologies, on remarque que la plupart des projets voient leurs besoins augmentés drastiquement à cause de la détérioration brutale des conditions de confort en été. En général, c'est la transformation globale de l'enveloppe qui provoque des risques de surchauffe non négligeables. Quant aux autres interventions, elles dépendent des typologies mais restent essentiellement préjudiciables. En prenant du recul, l'adaptation au climat semble révéler plus de résultats favorables que le bilan instantané des performances énergétiques. La disparité intra-typologique de la réaction des bâtiments en été (écart-type doublé) nous porte à croire que des projets types doivent pouvoir se dégager. Le relevé de ces interventions pourrait devenir une piste d'investigation fort intéressante pour des recherches à venir.

Par comparaison typologique, on remarque que les pavillons sont tous et toujours moins intéressants que les barres ou que les tours, et ce, de façon significative. Les logements individuels représentent une part importante du parc bâti de la Dorsale Est et doivent donc être traités prioritairement. Dans l'ensemble, les tours proposent des résultats assez homogènes mais sont fortement sujettes à la variation des proportions de vitrage. Enfin, le comportement énergétique des barres est fortement conditionné par leur taille (différences de développement importantes) et leur orientation (meilleurs résultats pour l'orientation Est-Ouest).

Somme toute, les barres, tours et pavillons possèdent des performances énergétiques très disparates qui évoluent très différemment sur le long terme. L'extrême variété des comportements énergétiques semble révélatrice de la disparité typo-morphologique, elle-même propre à l'habitat périurbain dominant sur la Dorsale Est.

---

62 1% d'augmentation des besoins contre une diminution de 6% pour les logements collectifs.



**4-27. Influence des quatre paramètres morphologiques de base**  
 Croquis de trois volumes lambda  
 Document créé pour l'étude : Réda Oussennan

**4-27. Surface des baies  $S_v$ , surface déperditive  $S$ , surface habitable  $S_{SHAB}$ , Volume chauffé  $V$**   
 Croquis de trois volumes lambda  
 Document créé pour l'étude : Réda Oussennan

## 4`3 Création d'indicateurs morphologiques commentés

### 4`3`1 Paramètres morphologiques de base

#### • Paramètres morphologiques et leur notion associée

Les paramètres sélectionnés ont été extraits sur le logiciel Archiwizard. La morphologie d'un bâtiment est caractérisée par plusieurs paramètres qui informent sur trois notions distinctes :

- les dimensions géométriques de l'enveloppe ;
- sa composition en surfaces opaque et transparente.
- son orientation.

Chaque paramètre est ainsi lié à un ou plusieurs concepts physiques qui permettent de mieux comprendre leur influence morphologique sur le comportement énergétique du bâtiment (*figure 4-27*).

#### **Notion d'efficacité, d'efficience en ramenant les calculs au $m^2$ :**

- Surface SHON, surface SHAB ( $m^2$ ).

Le ratio au  $m^2$  permet de comparer des projets de taille et typologie très différentes.

#### **Notion d'échange thermique (Gains ou déperditions) :**

- Surface d'échange ( $m^2$ ) ;
- Surface déperditive totale ( $m^2$ ) ;
- Ratio surface de baies (%).

Les surfaces en contact avec l'extérieur sont le réceptacle des échanges thermiques. Elles jouent le rôle d'interface, plus ou moins poreuse, entre extérieur et intérieur et garantissent donc le maintien d'un niveau de confort. Plus la surface est grande, plus les échanges sont conséquents. Les parois vitrées et opaques n'ont pas le même comportement. Pour résumer grossièrement, les baies apportent les gains et les murs évitent les déperditions.

#### **Notion de taille, d'échelle :**

- Volume chauffé ( $m^3$ ).

Le volume intervient dans le bilan énergétique car on parle toujours de volume « chauffé ». Plus un volume est grand, plus il est long à chauffer mais plus il possède d'inertie thermique.

- **Absence d'une information cruciale**

Le logiciel Archiwizard ne nous informe pas sur une information capitale qui pourrait servir à obtenir des indicateurs très intéressants : **la surface d'échange par orientation**. Elle donnerait la possibilité de calculer **le pourcentage de vitrage de chaque orientation**. Cet indicateur permet d'apprécier la proportion de vitrage par orientation séparée (la somme étant différente de 100%). Il ne doit pas être confondu avec le pourcentage par orientation de vitrage (aussi appelé taux de façade) dont la somme est égale à 100%. Cet indicateur est dangereux s'il est étudié indépendamment de l'autre car il donne la proportion de vitrage relativement à la quantité totale de vitrage et non à la surface totale.

#### **4`3`2 Les indicateurs morphologiques créés et renseignés**

Comme soutenu précédemment, les indicateurs sont simplement fonction des paramètres géométriques de base (hauteur, surface, volume), de l'orientation et du rapport entre surface de baies et parois opaques.

Les indicateurs morphologiques existants sont nombreux mais peuvent aussi être exploités pour en créer de nouveau par des transformations mathématiques, des combinaisons d'autres paramètres etc. La manipulation mathématique d'indicateurs est possible mais il est judicieux de toujours se raccrocher au sens physique de l'indicateur pour ne pas lui faire dire ce qu'il ne dit pas. Par exemple, le coefficient de forme  $S/V^{2/3}$  est complètement différente de la compacité  $S/V$  car il ne prend pas en compte la notion d'échelle (grandeur adimensionnelle)<sup>63</sup>.

L'objectif est de tirer parti de la diversité et exhaustivité du corpus (120 projets) pour tester ces indicateurs et en faire émerger quelques uns qui soient pertinents dans leur relation aux résultats de performance énergétique.

- **Sources bibliographiques**

Beaucoup de chercheurs en morphologie architecturale ont d'ores et déjà réfléchi à la manière dont pourrait être décrites les formes. Un certain nombre d'indicateurs permettent de simplifier et d'objectiver les caractéristiques de projets en vue de leur évaluation.

De prime abord, le travail a consisté en une recherche bibliographique d'indicateurs morphologiques. Les sources sont les suivantes :

- Thèse de Laetitia Arantes :

*L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située.*

- Publications de Serge Salat :

*Les villes et les formes sur l'urbanisme durable*, éd. Hermann, 2011, 543 p.

- Rapport intermédiaire du Centre énergétique et procédés :

*Progiciels d'aide à la conception intégrée des bâtiments* (PACIBA).

---

63 Le coefficient de forme d'une maison de 8m x 8m x 4m sera le même que celui d'un plot de 20m x 20m x 10m (homothétie) tandis que la compacité changera.

|                        |                         |                   |
|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Indépendant du vitrage | Coefficient de taille   | Ct                |
|                        | Coefficient de forme    | Cf                |
|                        | Compacité               | C                 |
|                        | Compacité surfacique    | Cs                |
| Dépendant du vitrage   | Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> |
|                        | Porosité volumique      | Pv                |
|                        | Porosité surfacique     | Ps                |
|                        | Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> |
|                        | Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> |
| Dépendant de tout      | Morphologie             | M                 |

4-28

#### 4-28. Indicateurs dépendants ou non du vitrage

Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan



• Liste non exhaustive d'indicateurs

| Nom                  | Compacité   |
|----------------------|---|
| Formule              | $S / V = \text{Facteur de forme} \times \text{Facteur de taille}$   |
| Unité                | $\text{m}^{-1}$   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- S est la somme des surfaces déperditives de l'enveloppe du bâtiment (façades et toiture comprises)</li> <li>- V est le volume chauffé du bâtiment</li> </ul>   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,25 et 0,55 pour une moyenne de 0,4</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,25 et 0,40 pour une moyenne de 0,3</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,65 et 0,95 pour une moyenne de 0,8</li> </ul>  |
| Sens, Interprétation | <p>La compacité est l'indicateur le plus fréquemment utilisé pour donner une idée de la performance énergétique d'un bâtiment. Un bâtiment compact possède paradoxalement une faible compacité au vue des résultats. Plus la compacité est élevée, moins le projet est performant a priori.</p> <p>Cet indicateur croît avec les surfaces déperditives car un bâtiment peu efficient énergétiquement possède une forte surface de contact avec l'extérieur (favorise les échanges thermiques). Pour un volume habitable équivalent, la configuration la plus efficace thermiquement sera donc logiquement celle ayant une enveloppe minimum, limitant ainsi les déperditions thermiques.</p> <p>L'indicateur décroît avec l'augmentation du volume car un bâtiment de grande taille réagit mieux énergétiquement (inertie thermique des gros volumes dans lesquels la température fluctue moins rapidement).</p> <p>En multipliant un indicateur surfacique par la Compacité, on obtient un indicateur volumique dont la taille devient un facteur non négligeable.</p> |
| Domaine de validité  | Les compacités des logements collectifs (barres et tours) et des habitations individuelles (pavillons) peuvent être comparées entre elles.  |

| Nom                  | Facteur de forme  |
|----------------------|---|
| Formule              | $S / V^{2/3}$   |
| Unité                | adimensionnel   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- S est la somme des surfaces déperditives de l'enveloppe du bâtiment (façades et toiture comprises)</li> <li>- V est le volume chauffé du bâtiment</li> </ul>   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 8,2 et 9,5 pour une moyenne de 9,0</li> <li>- Pour les tours : compris entre 6,0 et 8,5 pour une moyenne de 7,3</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 5,7 et 6,7 pour une moyenne de 6,1</li> </ul>  |
| Sens, Interprétation | <p>Ce facteur donne la possibilité d'obtenir des résultats du même ordre de grandeur pour des typologies de taille très différente de par sa nature adimensionnelle. Cette similarité est purement théorique car, énergétiquement parlant, un volume de grande taille (barre ou tour) ne se comporte pas de la même façon qu'un volume de petite taille (pavillon). En effet, la taille influe sur les besoins énergétiques.</p> <p>Cependant, ce facteur donne des informations quant à la complexité intrinsèque de la géométrie. On peut ainsi comparer la volumétrie d'une barre et d'un pavillon sans se préoccuper de la taille du volume. Deux volumes homothétiques ont ainsi le même facteur de forme.</p> |
| Domaine de validité  | Ce facteur est plus adapté quand la comparaison se fait entre bâtiments appartenant à une même famille typologique. La compacité est plus pertinente quand on compare deux bâtiments de typologie différente car elle prend en compte l'échelle du projet par l'application du facteur de taille.   |

64

64 Le facteur de forme a été calculé pour plusieurs cas de surfaces proposées par Archiwizard :

- Surface d'échange ;
- Surface déperditive totale ;
- Surface déperditive hors plancher.

Après examen des résultats, on remarque que l'indicateur de « compacité » ( facteur de forme plus exactement ) fourni par le logiciel est calculé à partir de la Surface déperditive totale. Par la suite, nous considérerons uniquement cette surface dans un souci de cohérence.

| Nom                  | Facteur de taille   |
|----------------------|---|
| Formule              | $1 / V^{1/3}$   |
| Unité                | $m^{-1}$  |
| Paramètres de base   | - V est le volume chauffé du bâtiment   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,03 et 0,06 pour une moyenne de 0,04</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,03 et 0,06 pour une moyenne de 0,04</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,10 et 0,16 pour une moyenne de 0,13</li> </ul>   |
| Sens, Interprétation | <p>Ce rapport fait uniquement intervenir le volume et donne une idée de la taille d'un bâtiment. Il est le facteur que nous utiliserons pour définir un niveau d'échelle, une taille de projet. Plus il est grand, plus le volume est petit et donc le bâtiment aussi.</p> <p>V est calculé à la puissance 1/3 pour rendre unidimensionnel le volume (qui est à trois dimensions à la base). Ainsi, nous obtenons une dimension caractéristique du volume qui ne dépend pas des trois autres (longueur, largeur et hauteur). Géométriquement, la dimension caractéristique obtenue représente le côté d'un cube renfermant le même volume que le bâtiment considéré.</p> <p>Par ailleurs, multiplier au coefficient de forme, il permet de calculer la compacité. Le facteur de forme, adimensionnel, devient fonction de la taille quand il est multiplié au facteur de taille pour obtenir la compacité. C'est donc le facteur de taille qui représente l'échelle, la taille du projet. Entre autre, il permet de créer des sous-catégories typologiques si l'échelle des projets est trop dispersée.</p> |
| Domaine de validité  | <p>Les barres et tours possèdent un volume moyen de : 20 000 m<sup>3</sup> et peuvent être comparées entre elles même si l'écart type entre barres et beaucoup plus élevé que pour la tour. Ce phénomène peut se comprendre car une tour possède une hauteur limite moyenne pour une surface de plancher moyenne alors que la barre est infiniment prolongeable. Les pavillons eux se situent en moyenne autour de : 500 m<sup>3</sup>.</p>   |

| Nom                  | Compacité surfacique  |
|----------------------|---|
| Formule              | $S / S_{SHAB}$  |
| Unité                | adimensionnel   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- S est la surface déperditive totale</li> <li>- <math>S_{SHAB}</math> est la surface habitable</li> </ul>   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,6 et 1,3 pour une moyenne de 0,9</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,7 et 1,1 pour une moyenne de 0,8</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 2,0 et 3,5 pour une moyenne de 2,5</li> </ul>  |
| Sens, Interprétation | <p>Cet indicateur permet d'estimer rapidement la surface déperditive associée à chaque m<sup>2</sup> d'habitation.</p> <p>Cet indicateur est peu fiable car le volume est plus représentatif des échanges thermiques qui ont lieu avec l'extérieur mais il donne une idée relative de la quantité de surface déperditive et donc de l'efficacité globale du bâtiment.</p> |
| Domaine de validité  | La compacité surfacique est applicable à toutes les typologies même si des aberrations subsistent au sein des pavillons car la surface habitable est très sensible à la différence entre maisons de plein pied et maisons sur plusieurs étages.   |

| Nom                  | Porosité surfacique   |
|----------------------|---|
| Formule              | $S_v / S$   |
| Unité                | adimensionnel   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> est la surface totale de baies</li> <li>- <math>S</math> est la surface déperditive totale</li> </ul>   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,15 et 0,45 pour une moyenne de 0,27</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,10 et 0,60 pour une moyenne de 0,25</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,05 et 0,25 pour une moyenne de 0,09</li> </ul>   |
| Sens, Interprétation | <p>Ce rapport fait intervenir la surface vitrée et la surface d'enveloppe totale. Il est donc irrémédiablement lié aux échanges thermiques entre intérieur et extérieur car il quantifie l'interface poreuse entre les deux milieux.</p> <p>Le résultat est adimensionnel et permet de comparer des morphologies de taille complètement différente (relativement à leur besoin). Cependant, les échanges thermiques sont additifs et plus la surface augmente, plus les échanges sont conséquents. A proportion égale de vitrage, une barre aura la même porosité qu'un pavillon. Il faut ainsi nuancer la vertu comparative de cet indicateur qui pourra être exploité complémentirement au facteur de taille par exemple.</p> <p>Il quantifie le potentiel d'échange d'un projet avec l'extérieur car plus la porosité est élevée, plus le projet va emmagasiner d'apports solaires ou alors perdre de la chaleur par le vitrage.</p> |
| Domaine de validité  | Cet indicateur s'applique lors de comparaisons extra-typologiques.  |

65

65 La surface déperditive hors plancher semble plus pertinente lors du calcul des proportions de vitrage. Cependant, la surface déperditive totale s'y substitue pour conserver les mêmes paramètres pour l'ensemble des calculs d'indicateurs. Par ailleurs, le rapport entre Surface totale déperditive hors plancher et Surface totale déperditive est quasi constant donc ce choix ne biaiserait pas grandement les résultats obtenus.

| Nom                  | Porosité volumique   |
|----------------------|--|
| Formule              | $S_v / V = \text{Compacité} \times \text{Porosité surfacique}$   |
| Unité                | $\text{m}^{-1}$  |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> est la surface totale de baies</li> <li>- <math>V</math> est le volume chauffé du bâtiment</li> </ul>  |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,05 et 0,20 pour une moyenne de 0,09</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,03 et 0,12 pour une moyenne de 0,07</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,03 et 0,18 pour une moyenne de 0,08</li> </ul>  |
| Sens, Interprétation | <p>A l'instar de la compacité, ce rapport linéique, exprimé en <math>\text{m}^{-1}</math>, dépend de la taille du projet car le facteur de taille intervient implicitement dans l'équation. Son ordre de grandeur est comparable entre les trois typologies. Il pourrait devenir un indicateur très prometteur car il donnerait la possibilité de comparer barres, tours et pavillons via un unique indicateur.</p> <p>En outre, cet indicateur possède l'avantage de qualifier la nature opaque / transparente de l'enveloppe tout en conservant une notion de taille contrairement à la porosité surfacique.</p> |
| Domaine de validité  | La porosité volumique aboutit aux mêmes résultats que la porosité surfacique à cela près qu'elle prend en compte la notion de taille et fluctue donc moins d'une typologie à l'autre. Cet indicateur s'applique donc lors de comparaisons intra-typologiques.  |

66

66 Cet indicateur donne une idée approximative de la luminosité des pièces intérieures car le vitrage est tout autant vecteur de chaleur que de lumière. En corrélant à une profondeur caractéristique, on pourrait définir un indicateur de bonne luminosité mais ceci n'est pas le propos de cette étude.

| Nom                  | Taux de façade exposée ( % vitrage Sud)   |
|----------------------|---|
| Formule              | $S_{v_{Sud}} / S_v$   |
| Unité                | adimensionnel   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> (Sud) est la surface de baies orientée au Sud</li> <li>- <math>S_v</math> est la surface totale de baies</li> </ul>   |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pour les barres : compris entre 5% et 60% pour une moyenne de 25%</li> <li>- Pour les tours : compris entre 20% et 50% pour une moyenne de 30%</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 10% et 65% pour une moyenne de 35%</li> </ul>   |
| Sens, Interprétation | <p>Dans notre cas, l'orientation choisie consciemment est l'orientation sud puisque c'est celle qui représente un handicap en été ou un avantage en hiver.</p> <p>Ce rapport fait uniquement intervenir les surfaces de vitrage : il est donc dangereux s'il est étudié indépendamment d'autres indicateurs car il donne la proportion de vitrage relativement à la quantité de vitrage totale et non à la surface totale. Point remarquable, la somme sur toutes les orientations des Taux de façade est égale à 100%.</p> <p>Cet indicateur permet d'estimer l'orientation privilégiée d'un projet et donne, dans le cas présent, une idée des apports que pourraient emmagasiner le bâtiment. Cependant, on peut uniquement conclure sur le fait que le vitrage est bien ou mal réparti sur les quatre orientations du bâtiment. Aucune indication n'est donnée quant à la quantité de vitrage relative à la taille du bâtiment. Pour cela, il serait pertinent de calculer l'indicateur qui suit : Porosité surfacique Sud.</p> |
| Domaine de validité  | Le taux de façade exposée sud semble pertinent quelle que soit la typologie concernée tant que celui-ci n'outrepasse pas ses compétences ; compétences qui sont assez limitées lorsque son utilisation n'est pas accompagnée d'un indicateur complémentaire.  |

| Nom                  | Porosité surfacique Sud (x 4)   |
|----------------------|---|
| Formule              | $S_{v_{sud}} / S = \text{Taux de façade exposée} \times \text{Porosité surfacique}$   |
| Unité                | adimensionnel   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> (Sud) est la surface de baies orientée au Sud</li> <li>- <math>S</math> est la surface déperditive totale</li> </ul>  |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,01 et 0,11 pour une moyenne de 0,05</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,03 et 0,15 pour une moyenne de 0,08</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,01 et 0,10 pour une moyenne de 0,03</li> </ul>   |
| Sens, Interprétation | <p>La Porosité surfacique sud informe sur la quantité de vitrage relativement au développé total de façade déperditive mais ne nous renseigne pas de manière précise sur le pourcentage de vitrage par orientation. En effet, en calculant cet indicateur, on considère implicitement que les quatre façades du bâtiment sont équiréparties en surface.</p> <p>La meilleure option serait de calculer la quantité de vitrage rapportée à la surface déperditive par orientation et d'obtenir ainsi le pourcentage de vitrage pour chaque orientation. Malheureusement, cette donnée est indisponible sous Archiwizard. Il est donc impossible de procéder à ce calcul crucial qui donnerait la possibilité d'apprécier la proportion de vitrage par orientation séparée (la somme étant différent de 100%). Pour avoir une idée de cette grandeur significatif, on peut obtenir une moyenne par façade en multipliant la Porosité surfacique Sud par 4.</p> |
| Domaine de validité  | <p>Contrairement au Taux de façade exposée sud, cet indicateur renseigne sur la proportion de vitrage par rapport au développé total de façade déperditive. Il est possible de juger quantitativement la surface de baies. En définitive, la Porosité surfacique sud et le Taux de façade Sud sont donc complémentaires. Le premier indique si le vitrage est en quantité suffisante et le deuxième si le vitrage est réparti judicieusement sur les quatre orientations possibles.</p>   |



| <b>Nom</b>           | <b>Porosité volumique Sud</b>   |
|----------------------|---|
| Formule              | $S_{v_{SUD}} / V = \text{Porosité surfacique Sud} \times \text{Compacité}$  |
| Unité                | $m^{-1}$  |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> (Sud) est la surface de baies orientée au Sud</li> <li>- <math>V</math> est le volume chauffé du bâtiment</li> </ul>  |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,00 et 0,05 pour une moyenne de 0,02</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,01 et 0,04 pour une moyenne de 0,02</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,01 et 0,06 pour une moyenne de 0,03</li> </ul> |
| Sens, Interprétation | La Porosité volumique Sud propose les mêmes résultats que la Porosité volumique générale mais pour une orientation particulière.  |
| Domaine de validité  | Le domaine d'application est similaire à celui de la Porosité volumique.  |

| <b>Nom</b>           | <b>Morphologie globale</b>   |
|----------------------|--|
| Formule              | $S_v * S / V * S_{SHAB}$   |
| Unité                | $m^{-1}$   |
| Paramètres de base   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>S_v</math> est la surface totale de baies</li> <li>- <math>S</math> est la surface déperditive totale</li> <li>- <math>V</math> est le volume chauffé</li> <li>- <math>S_{SHAB}</math> est la surface habitable</li> </ul>  |
| Ordre de grandeur    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les barres : compris entre 0,1 et 0,8 pour une moyenne de 0,27</li> <li>- Pour les tours : compris entre 0,1 et 0,5 pour une moyenne de 0,29</li> <li>- Pour les pavillons : compris entre 0,1 et 0,8 pour une moyenne de 0,26</li> </ul>  |
| Sens, Interprétation | L'indicateur de Morphologie globale possède un avantage précieux sur les autres indicateurs : il est fonction des quatre paramètres de base que sont $S_v$ , $S$ , $S_{SHAB}$ et $V$ . Cet indicateur est donc lié à plusieurs notions à la fois : efficacité, taille, échange. L'unique défaut que pourrait révéler cet outil est la non pondération de chaque facteur. |
| Domaine de validité  | Cet indicateur dépend implicitement du coefficient de taille : il est donc valable pour des comparaisons extra-typologiques.   |

### • Autres indicateurs

Les indicateurs recensés dans la partie précédente sont tous fonction de paramètres extractibles sur Archiwizard. Les indicateurs qui vont suivre font partie de la littérature sur le sujet mais dépendent de paramètres qui ne peuvent être calculés sur ce logiciel.

| Nom                | Maître-couple-solaire  |
|--------------------|--|
| Formule            | Seo  |
| Unité              | m <sup>2</sup>   |
| Paramètres de base | - Seo est la projection du bâtiment sur un plan vertical orienté Est-Ouest |

| Nom                | Orientation privilégiée   |
|--------------------|---|
| Formule            | Seo / ( Seo + Sns )   |
| Unité              | adimensionnel   |
| Paramètres de base | - Seo est la projection du bâtiment sur un plan vertical orienté Est-Ouest<br>- Sns est la projection du bâtiment sur un plan vertical orienté Nord-Sud |

Parmi les indicateurs proposés par Serge Salat<sup>67</sup>, on recense :

| Nom                | Coefficient d'accès solaire  |
|--------------------|--|
| Formule            | $\sum Si * Fei * Coi / \sum Si$  |
| Unité              | adimensionnel  |
| Paramètres de base | - Si est la Surface déperditive associée à une orientation<br>- Coi est le coefficient de prospect<br>- Fei est le coefficient d'orientation |

| Nom                | Admittance solaire   |
|--------------------|--|
| Formule            | $\sum Si * Fei * Coi / S_{SHAB}$   |
| Unité              | adimensionnel  |
| Paramètres de base | - Si est la Surface déperditive associée à une orientation<br>- Coi est le coefficient de prospect<br>- Fei est le coefficient d'orientation |

67 Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.

En prolongeant l'investigation, il était possible de tester davantage d'indicateurs et même des combinaisons d'indicateurs entre eux. Ces combinaisons tendent à se rapprocher au maximum des résultats de performance énergétique. A partir d'une étude paramétrique ou algorithmique, de nombreuses combinaisons pourraient être testées afin de se rapprocher au mieux du résultat.

Plusieurs processus de création sont imaginables :

- Combinaisons non linéaires de paramètres à l'image du facteur de forme  $S / V^{2/3}$
- Somme pondérée d'indicateurs ou polynômes éventuels ;
- Produit / Quotient d'indicateurs comme par exemple, Compacité x Porosité.

#### 4`3`3 Approche statistique de comparaison

##### • Calcul statistique représentatif

Pour dresser des conclusions sur des ensembles typologiques ou des interventions de même type, il a été nécessaire de calculer des moyennes<sup>68</sup> représentatives de chaque catégorie de logement.

Les moyennes des indicateurs par typologie présentent les atouts suivants :

- donner des ordres de grandeur pour chaque typologie ;
- donner des ordres de grandeur d'évolution avec le degré d'intervention.

##### • Procédure de comparaison

Les indicateurs seront confrontés par typologie et par degré d'intervention. Dans le cas du degré d'intervention, l'attention portera sur l'évolution de l'indicateur après intervention sur l'existant tel que :

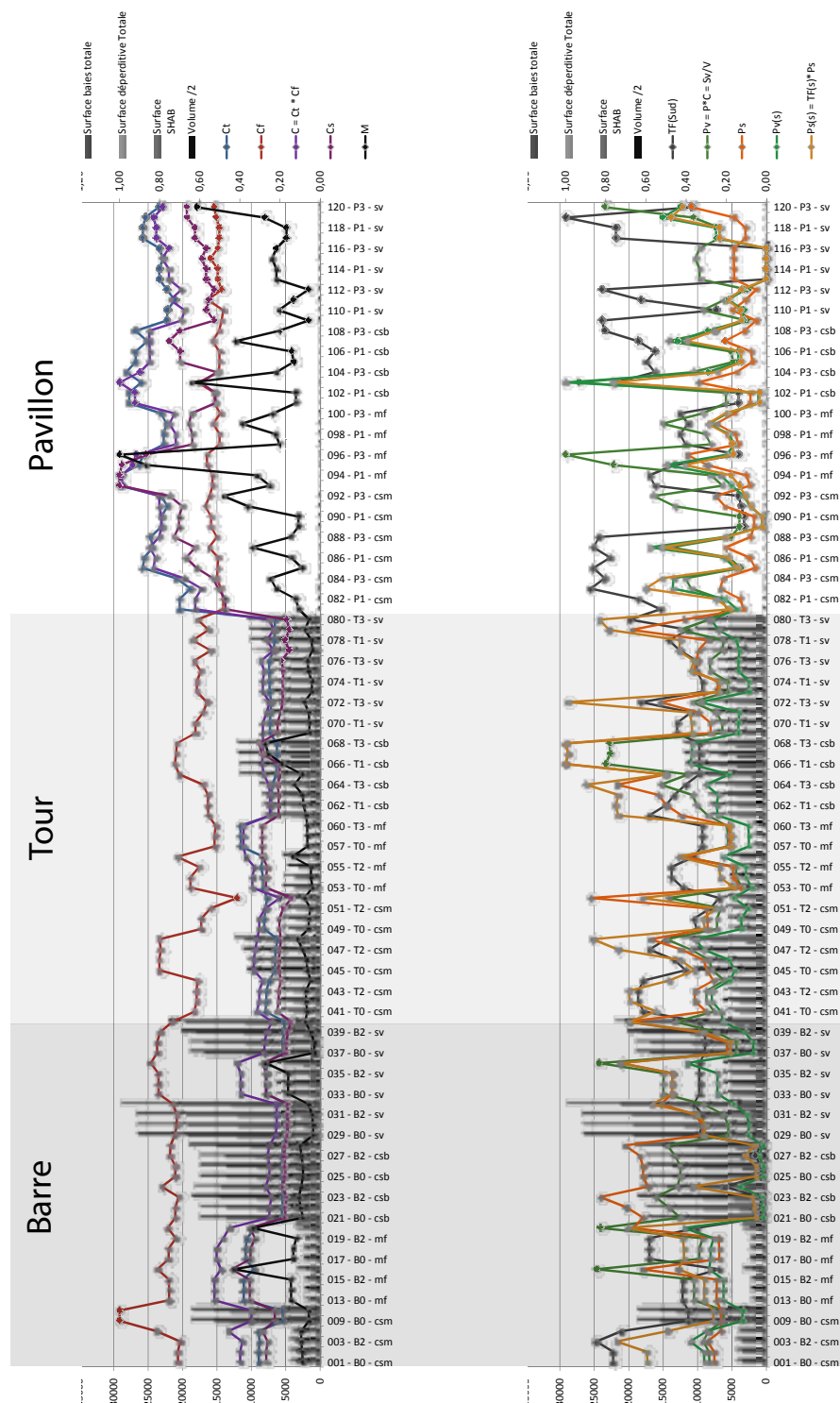
$$\text{évolution} = \text{Indicateur}_{\text{intervention}} - \text{Indicateur}_{\text{existant}}$$

L'objectif est de tirer des conclusions intra-typologiques, extra-typologiques et même générales si le domaine d'application de l'indicateur le permet.

La liste des indicateurs étant longues, quelques-uns ont été sélectionnés :

|                        |                         |                   |
|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Indépendant du vitrage | Coefficient de taille   | Ct                |
|                        | Coefficient de forme    | Cf                |
|                        | Compacité               | C                 |
|                        | Compacité surfacique    | Cs                |
| Dépendant du vitrage   | Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> |
|                        | Porosité volumique      | Pv                |
|                        | Porosité surfacique     | Ps                |
|                        | Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> |
|                        | Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> |
| Dépendant de tout      | Morphologie             | M                 |

<sup>68</sup> Pour vérifier la dispersion des données autour des moyennes, un écart-type a été calculé.



4-29 4-30

#### 4.3.4 Comparaison des résultats et conclusions

- **Comparaison globale :** (figure 4-29 et 4-30)

Pour l'ensemble des indicateurs de « morphologie pure »<sup>69</sup>, on observe de grande disparité entre logements collectifs et pavillons : les indicateurs fluctuent beaucoup plus pour ces derniers. De surcroît, la valeur absolue de la quasi totalité des indicateurs est d'un autre ordre de grandeur pour les pavillons. Seul le coefficient de forme semble adapté à la comparaison adimensionnelle<sup>70</sup>. Autre fait marquant, l'indicateur de morphologie globale paraît symptomatique de la diversité typo-morphologique de l'habitat périurbain.

La plupart des indicateurs ont l'air de suivre les mêmes évolutions, mis à part le Taux de façade  $Tf_{SUD}$ . Les porosités surfaciques et porosités volumiques sont respectivement liées entre elles, excepté pour certains cas où l'orientation vers le Sud prédomine fortement.

- **Comparaison extra-typologique :** (figure 4-31 et 4-32)

L'analyse se fera par indicateur en comparant les typologies entre elles (B vs T vs P) et en suivant l'évolution des indicateurs avec les interventions.

|                       |    |               |
|-----------------------|----|---------------|
| Coefficient de taille | Ct | $1 / V^{1/3}$ |
|-----------------------|----|---------------|

Le Coefficient de taille, inverse pondéré du volume, est voisin pour les barres et tours. Cependant, les barres ont tendance à se différencier davantage les unes des autres. La tour, par ses limites géométriques en profondeur et en hauteur, propose des résultats plus homogènes. En moyenne, les pavillons possèdent un coefficient de taille trois fois plus élevés. L'écart-type est comparable à celui des tours et révèle la forte diversité de cette typologie en terme de taille.

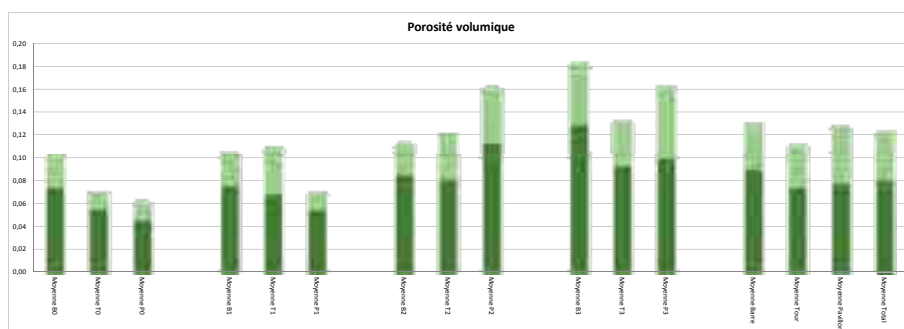
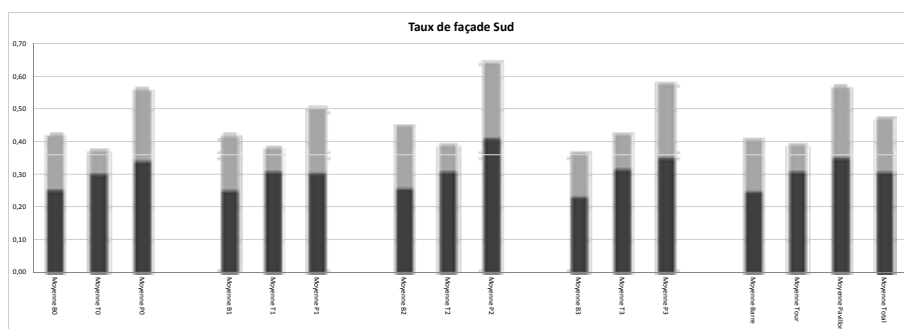
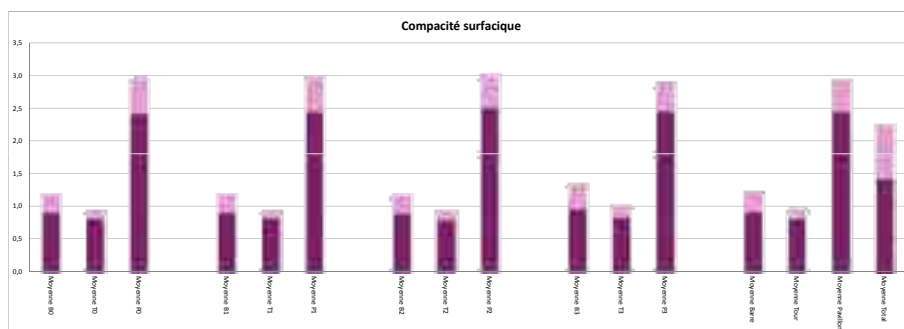
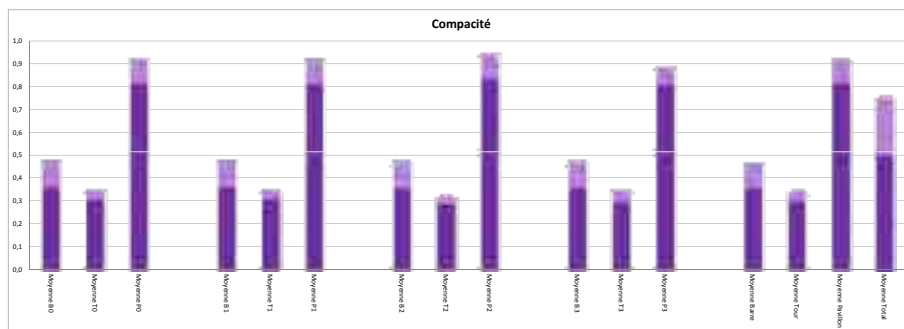
Les graphiques démontrent que le volume ne change pas conséquemment après intervention. Les répercussions les plus notoires sont observables pour les barres et les tours qui se différencient avec les interventions. En toute logique, le volume augmente négligemment pour la réhabilitation de type greffe.

|                      |    |               |
|----------------------|----|---------------|
| Coefficient de forme | Cf | $S / V^{2/3}$ |
|----------------------|----|---------------|

Le Coefficient de forme détient la particularité de décroître linéairement de la barre vers les pavillons en passant par les tours. Les écarts tendent néanmoins à se réduire avec les interventions. Peut-être que les simplifications géométriques sont responsables de cette convergence vers un Cf moyen extra-typologique.

<sup>69</sup> On appelle indicateurs de « morphologie pure », les indicateurs qui sont indépendants de la proportion de vitrage.

<sup>70</sup> On appelle comparaison adimensionnelle, une comparaison de la géométrie d'objets sans considération de l'effet de leur taille.



4-31

**4-31. Comparaison des indicateurs entre typologies pour l'existant et les projets**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-31. Compacité, Compacité surfacique, Taux de façade Sud et Porosité volumique**  
De haut en bas  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

Le coefficient de forme ne varie pas fortement parmi les typologies (faible écart-type) mais donne l'occasion de procéder à des confrontations extra-typologiques.

|           |   |         |
|-----------|---|---------|
| Compacité | C | $S / V$ |
|-----------|---|---------|

La Compacité générale du bâtiment semble peu propice aux pavillons. Sa dépendance au coefficient de taille rend cet indicateur sensible aux différences volumétriques. Les tours arborent une certaine homogénéité (faible écart-type) comparées aux deux autres typologies. Toutes ces conclusions peuvent être extrapolées aux différents cas d'intervention.

|                      |    |                |
|----------------------|----|----------------|
| Compacité surfacique | Cs | $S / S_{SHAB}$ |
|----------------------|----|----------------|

La Compacité surfacique révèle les mêmes résultats que la compacité générale, à cela près que les écarts sont encore plus marqués pour les pavillons. La barre subit aussi de grandes divergences pour l'intervention de type enveloppe globale.

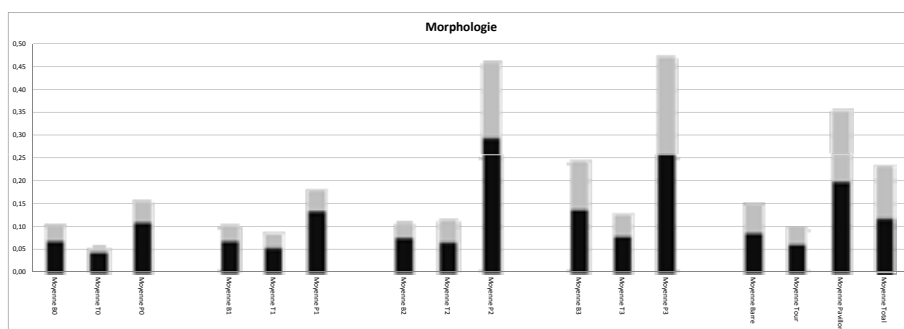
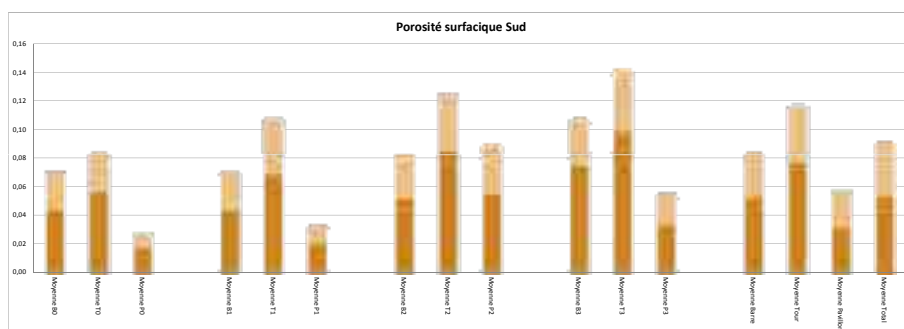
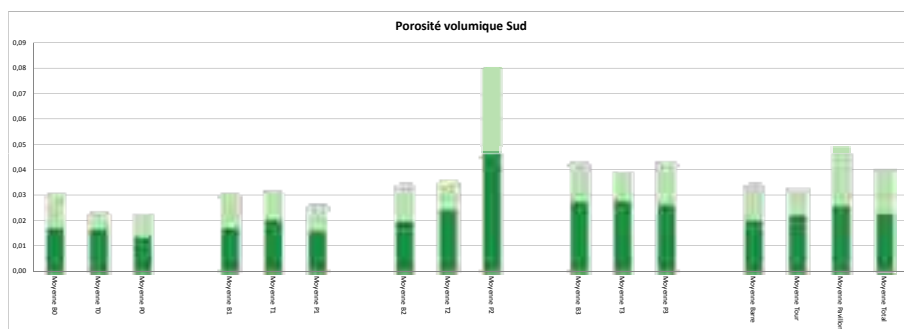
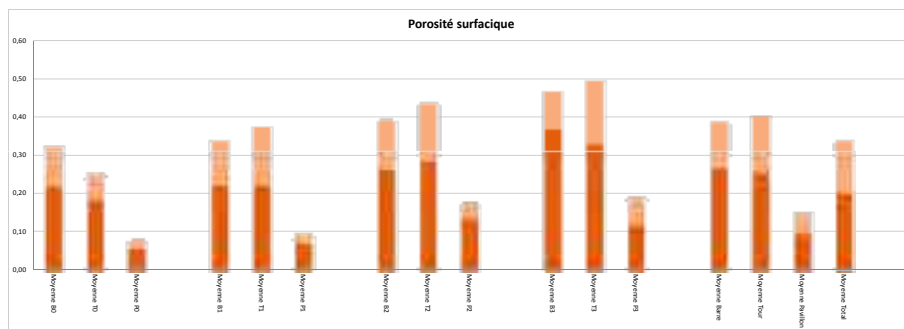
|                    |            |                 |
|--------------------|------------|-----------------|
| Taux de façade Sud | $Tf_{SUD}$ | $Sv_{SUD} / Sv$ |
|--------------------|------------|-----------------|

Le Taux de façade est, en général, plus élevé pour les pavillons. Cependant, l'intervention a minima voit la tendance s'inverser au profit des tours. Dès la première intervention, les tours sont sujettes à des augmentations significatives de surface vitrée au sud. Par ailleurs, l'écart-type corrobore une nouvelle fois le fait que les tours soient plus homogènes dans la répartition de leur vitrage que les barres ou les pavillons. Les barres présentent des résultats très distendus car l'orientation de la plus grande longueur du bâtiment joue un rôle important dans l'équation. Les pavillons, moins contraints dans la distribution des ouvertures, sont constitués plus aléatoirement.

|                    |    |          |
|--------------------|----|----------|
| Porosité volumique | Pv | $Sv / V$ |
|--------------------|----|----------|

La Porosité volumique dépend fortement du type d'intervention. A minima, les logements les plus « poreux »<sup>71</sup> sont les barres, suivies des tours. La tendance s'inverse complètement pour les greffes de serre qui voient les pavillons faire la course en tête. En effet, les serres représentent une plus-value indéniable en surface vitrée pour les pavillons comparativement à leur volume. Finalement, pour la transformation globale de l'enveloppe, les barres tirent leur épingle du jeu car les étudiants ont souvent proposé des projets de couverture en verre recouvrant l'intégralité du bâtiment.

71 Caractère de ce qui est massivement vitré.



4-32

**4-32. Comparaison des indicateurs entre typologies pour l'existant et les projets**  
Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
*Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan*

**4-32. Porosité surfacique, Porosité volumique sud, Porosité surfacique sud, Morphologie**  
De haut en bas  
*Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan*



|                     |       |           |
|---------------------|-------|-----------|
| Porosité surfacique | $P_s$ | $S_v / S$ |
|---------------------|-------|-----------|

La Porosité surfacique des pavillons est très faible devant celle des autres typologies. Cette typologie, souvent libre sur toutes ses orientations, en privilégie une ou deux ; ce qui a pour effet de diminuer considérablement le Taux de vitrage relativement à l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment. Les projets de serre participent au contrebalancement de cette anomalie par l'apport massif de surface vitrée. Les barres et les tours aboutissent aux mêmes résultats.

|                        |               |                   |
|------------------------|---------------|-------------------|
| Porosité volumique sud | $P_{v_{SUD}}$ | $S_{v_{SUD}} / V$ |
|------------------------|---------------|-------------------|

La Porosité volumique sud est un dénominateur commun pour les trois typologies. Cet indicateur explose uniquement dans le cas d'une intervention de type serre pour les pavillons. En effet, les serres sont souvent implantées au sud pour maximiser les gains.

|                         |               |                   |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| Porosité surfacique sud | $P_{s_{SUD}}$ | $S_{v_{SUD}} / S$ |
|-------------------------|---------------|-------------------|

L'enveloppe généreusement vitrée au sud rend les tours aptes à capter les apports solaires. Le constat est un peu plus cruel pour les pavillons qui ne semblent pas se tourner pleinement vers le sud. Même constat que pour  $P_{v_{SUD}}$  dans le cas de l'ajout d'une serre.

|                     |     |                          |
|---------------------|-----|--------------------------|
| Morphologie globale | $M$ | $S_v * S / V * S_{SHAB}$ |
|---------------------|-----|--------------------------|

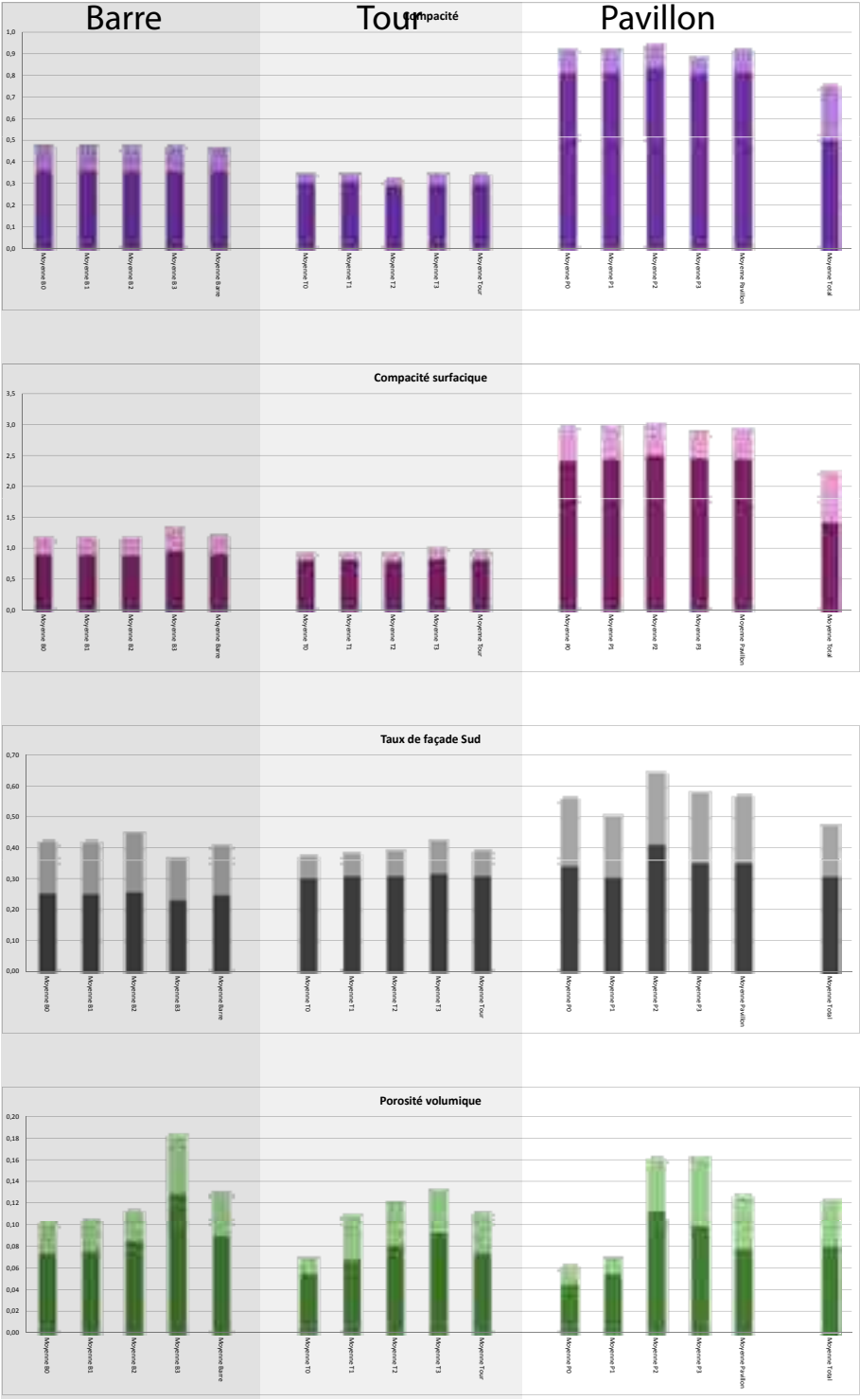
Dans l'ordre croissant, l'indicateur de Morphologie globale des tours puis des barres et enfin des pavillons suit une évolution constante quelle que soit l'intervention.

En conclusion, les pavillons, plus réduits, sont plus soumis aux variations morphologiques de leur enveloppe globale. La définition morphologique des tours dépend fortement de la proportion de vitrage. Quant aux barres, leur définition morphologique repose sur deux aspects cités précédemment ; leur orientation privilégiée influe sur la répartition du vitrage et leur grand différentiel de développé agit substantiellement sur les indicateurs sensibles à la taille.

• **Comparaison des indicateurs d'une intervention à l'autre :** (figure 4-33 et 4-34)

A priori, les indicateurs devraient varier selon une certaine logique avec les types d'intervention car celles-ci sont guidées par des volontés similaires d'amélioration de l'efficacité énergétique. Si les projets ont été bien développés, les indicateurs devraient suivre des tendances favorables d'un point de vue énergétique<sup>72</sup>. En somme, si les projets d'étudiants progressent énergétiquement, les indicateurs devraient tendre vers des valeurs favorables.

<sup>72</sup> Le postulat de la corrélation entre morphologie et énergie est accepté momentanément.



4-33

**4-33. Comparaison des indicateurs entre interventions pour chaque typologie**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-33. Compacité, Compacité surfacique, Taux de façade Sud et Porosité volumique**  
De haut en bas  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

C'est cette tendance qui nous intéresse. Nous allons donc étudier les variations des indicateurs en relation avec la succession des interventions.

#### Projets de barre

|                         |                   |                       |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| Coefficient de taille   | Ct                | constant              |
| Coefficient de forme    | Cf                | décroit sauf pour B3  |
| Compacité               | C                 | constant              |
| Compacité surfacique    | Cs                | décroit sauf pour B3  |
| Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> | constant sauf pour B3 |
| Porosité volumique      | Pv                | croît                 |
| Porosité surfacique     | Ps                | croît                 |
| Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> | croît                 |
| Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> | croît                 |
| Morphologie             | M                 | Constant sauf pour B3 |

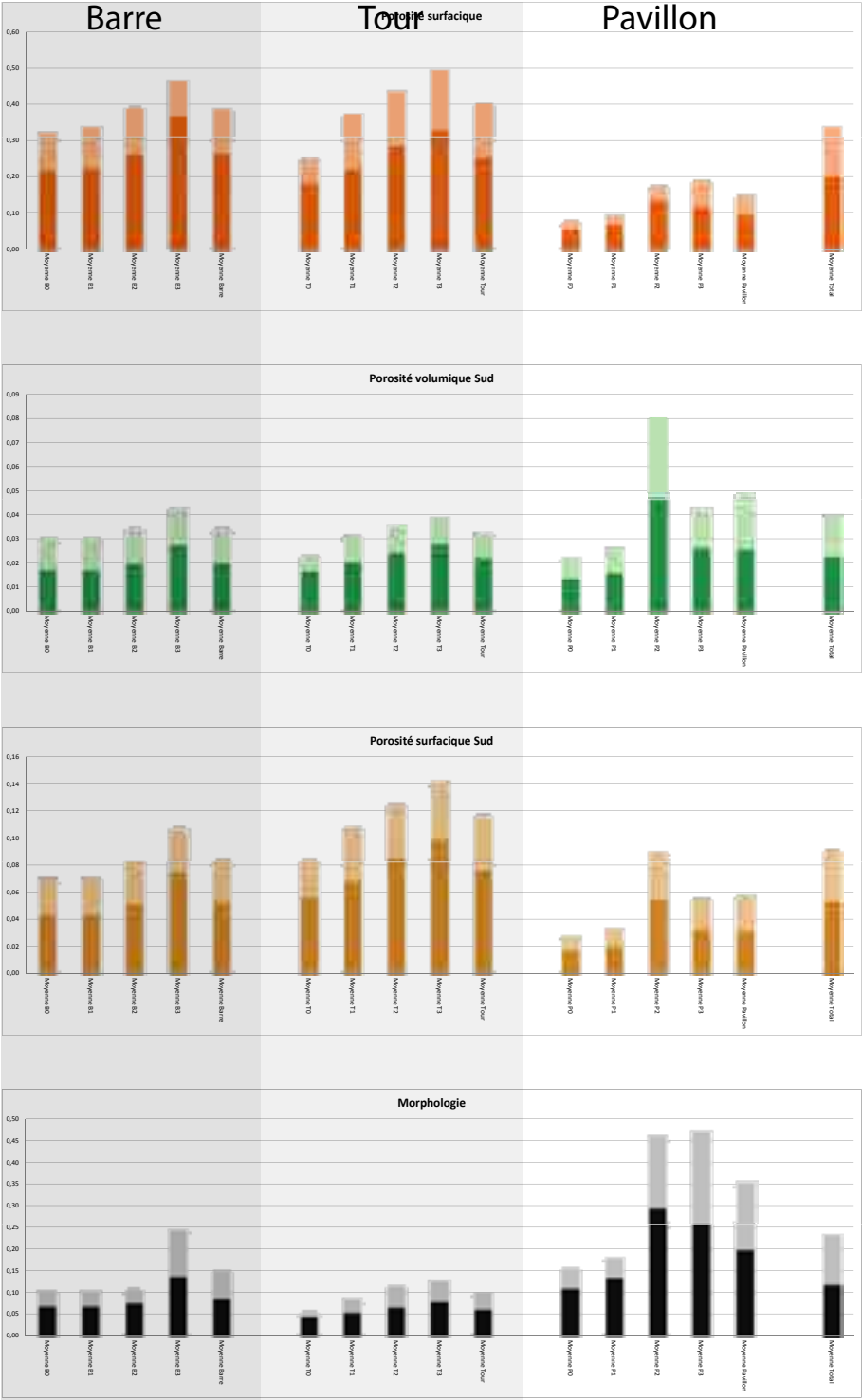
Les seuls indicateurs qui présentent une logique remarquable sont les indicateurs de porosité. Cette logique semble liée à la volonté des étudiants de profiter des apports solaires au maximum par une orientation au sud et une augmentation de la surface vitrée. Le cas du changement global d'enveloppe se démarque aussi des autres interventions.

#### Projets de tour

|                         |                   |                       |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| Coefficient de taille   | Ct                | constant              |
| Coefficient de forme    | Cf                | constant              |
| Compacité               | C                 | constant sauf pour T2 |
| Compacité surfacique    | Cs                | constant sauf pour B3 |
| Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> | constant              |
| Porosité volumique      | Pv                | croît                 |
| Porosité surfacique     | Ps                | croît                 |
| Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> | croît                 |
| Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> | croît                 |
| Morphologie             | M                 | croît                 |

La constance des indicateurs de morphologie pure<sup>73</sup> illustre la façon dont ont été modifiées les tours. Elles ont été davantage traitées par la qualité opaque/vitrée de leur enveloppe que par leur géométrie. L'indicateur de morphologie globale M renforce cette assertion car le changement conséquent de quantité de vitrage le fait croître lui aussi. Ainsi, les variations d'indicateurs entre typologie paraissent plus prononcées pour les tours que pour les barres.

73 Sans influence du vitrage dans l'équation.



4-34

**4-34. Comparaison des indicateurs entre interventions pour chaque typologie**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-34. Porosité surfacique, Porosité volumique sud, Porosité surfacique sud, Morphologie**  
De haut en bas  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

### Projets de pavillon

|                         |                   |                       |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| Coefficient de taille   | Ct                | constant sauf pour P2 |
| Coefficient de forme    | Cf                | constant sauf pour P2 |
| Compacité               | C                 | constant sauf pour T2 |
| Compacité surfacique    | Cs                | constant sauf pour B3 |
| Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> | constant sauf pour P2 |
| Porosité volumique      | Pv                | aléatoire             |
| Porosité surfacique     | Ps                | croît sauf pour P3    |
| Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> | croît sauf pour P3    |
| Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> | croît sauf pour P3    |
| Morphologie             | M                 | croît sauf pour P3    |

Les pavillons, étant de taille plus petite, sont plus réceptifs vis-à-vis des ajouts de serre. Ainsi, Ct diminue faiblement mais sûrement et influence les autres compacités. Autre constatation, la modification de l'enveloppe globale a été minorée car les interventions consistaient souvent à modifier la composition du mur et non le ratio opaque/vitré. La composition, standardisée par hypothèse, n'a donc pas influencé l'évolution des paramètres morphologiques.

Comparé aux autres typologies, le pavillon se rapproche fortement de la tour, ce qui ne semble pas intuitif. L'influence croisée de certains paramètres semble expliquer ce phénomène paradoxal.

#### • Comparaison des indicateurs entre eux / avec leur paramètre de base :

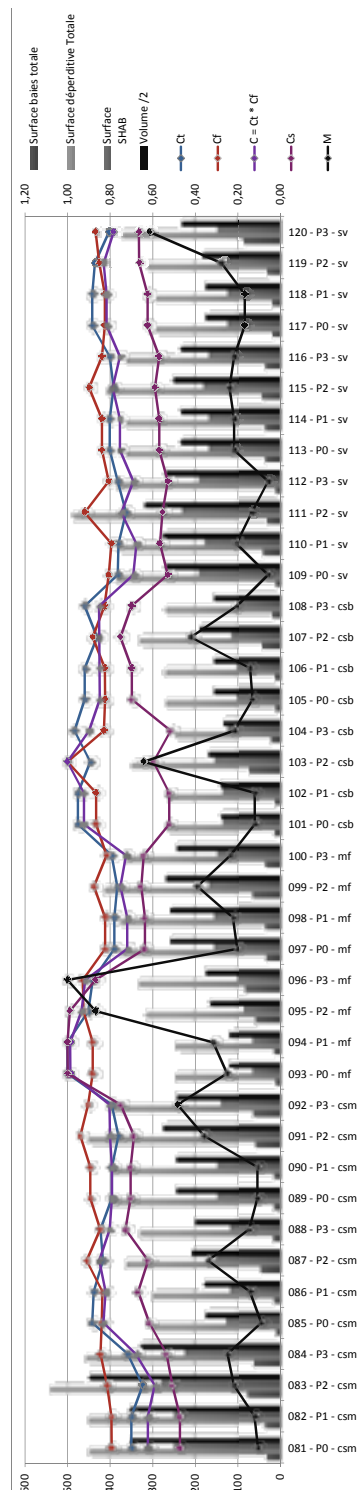
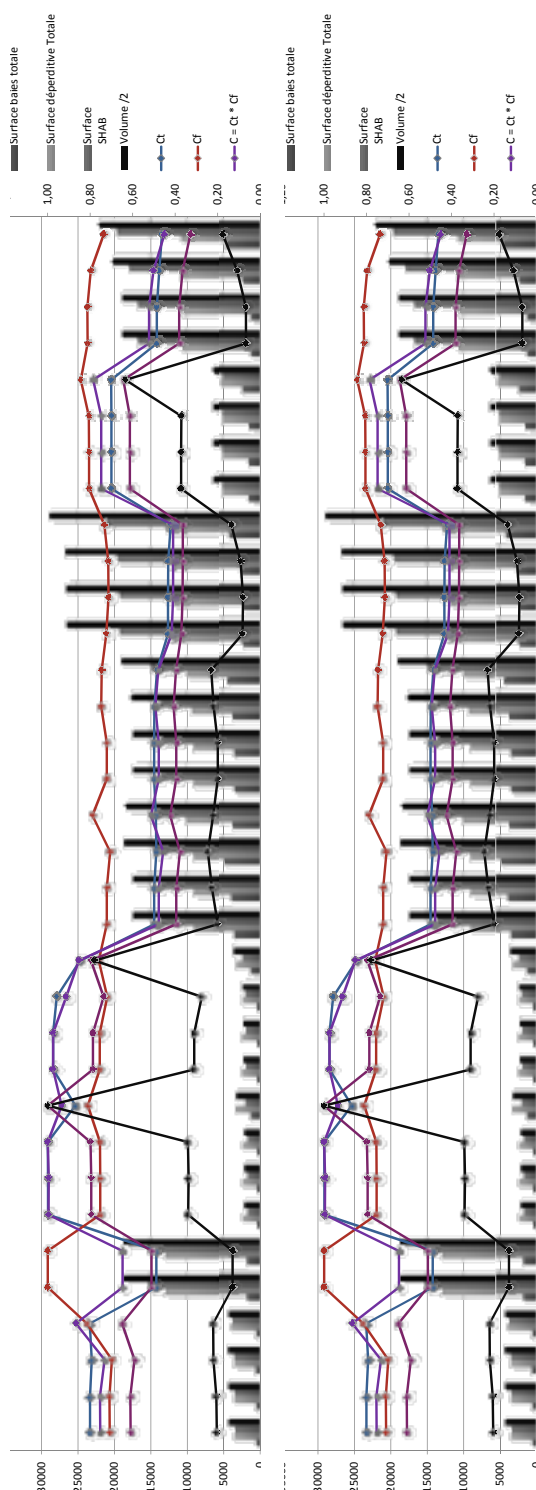
Les indicateurs morphologiques dépendent tous des mêmes paramètres de base et sont donc sujets à des lois d'évolution plus ou moins corrélées. Pour éviter de se fier à des indicateurs redondants, il est bon de vérifier si certains ne suivent pas les mêmes courbes de variation.

Afin de retenir un des indicateurs parmi les redondants, nous procéderons à l'analyse comparée de leur corrélation aux besoins énergétiques dans le but de mettre en évidence le plus pertinent.

Les 4 paramètres décelés<sup>74</sup> comme étant les plus déterminants sont les suivants :

- S : Surface déperditive totale (notion d'échange thermique global) ;
- Sv : Surface de baies totale (notion d'échange thermique sensible) ;
- V : Volume (notion de taille) ;
- S<sub>SHAB</sub> : Surface habitable (notion d'efficacité)

<sup>74</sup> On remarque que S, S<sub>SHAB</sub> et V suivent un peu près la même courbe d'évolution ; observation logique quand on y réfléchit. Sv possède un comportement plus chaotique.



4-35

**4-35. Lois d'évolution et possible redondance**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-35. Indicateurs testés : Ct, Cf, C, Cs et M**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**Indicateurs indépendants du vitrage :** (figure 4-35)

Pour les barres, Ct, C et Cs sont intimement liés. Pour les petits volumes, Cs tend tout de même à suivre une évolution propre. Contrairement à tous les autres indicateurs, Cf ne varie pas conséquemment avec le volume. Ce phénomène est sûrement dû à la linéarisation du volume par la puissance 2/3 qui atténue l'effet de taille. M, quant à lui, suit globalement la même courbe tout en étant sensible à la proportion de vitrage Sv.

Pour les tours, les courbes varient de manière plus chaotique. Comme pour le cas précédent, Ct, C et Cs révèlent quasiment les mêmes résultats. Cependant, cette fois, c'est Ct qui se différencie de ces compères pour les gros volumes. Cf suit un peu plus les évolutions des autres indicateurs tout en étant très sensible aux variations de la surface déperditive totale pour les gros volumes. Quant à M, on aboutit aux mêmes conclusions que pour la barre : une forte variabilité conforme à la diversité morpho-typologique.

Pour les pavillons, on converge approximativement vers les mêmes résultats malgré la plus grande variabilité globale des données. En effet, les pavillons sont plus sujets aux variations morphologiques à leur échelle ; leur rapport S / V est complètement différent des logements collectifs. Une seule différence subsiste : l'indicateur Cs suit sa propre courbe d'évolution pour les plus grandes surfaces déperditives par rapport au volume.

**Conclusion :** En général, les indicateurs indépendants du vitrage suivent les mêmes courbes d'évolution du fait que les trois paramètres qui les fondent (S, Shab, V) sont naturellement liés.

Suite aux analyses comparées des trois typologies, il apparaît que Ct, C et Cs sont redondants même si Cs se différencie des deux autres lorsque le volume s'écarte de la moyenne typologique. De surcroît, C possède l'avantage de pouvoir être appliqué en cas de confrontation extra-typologique.

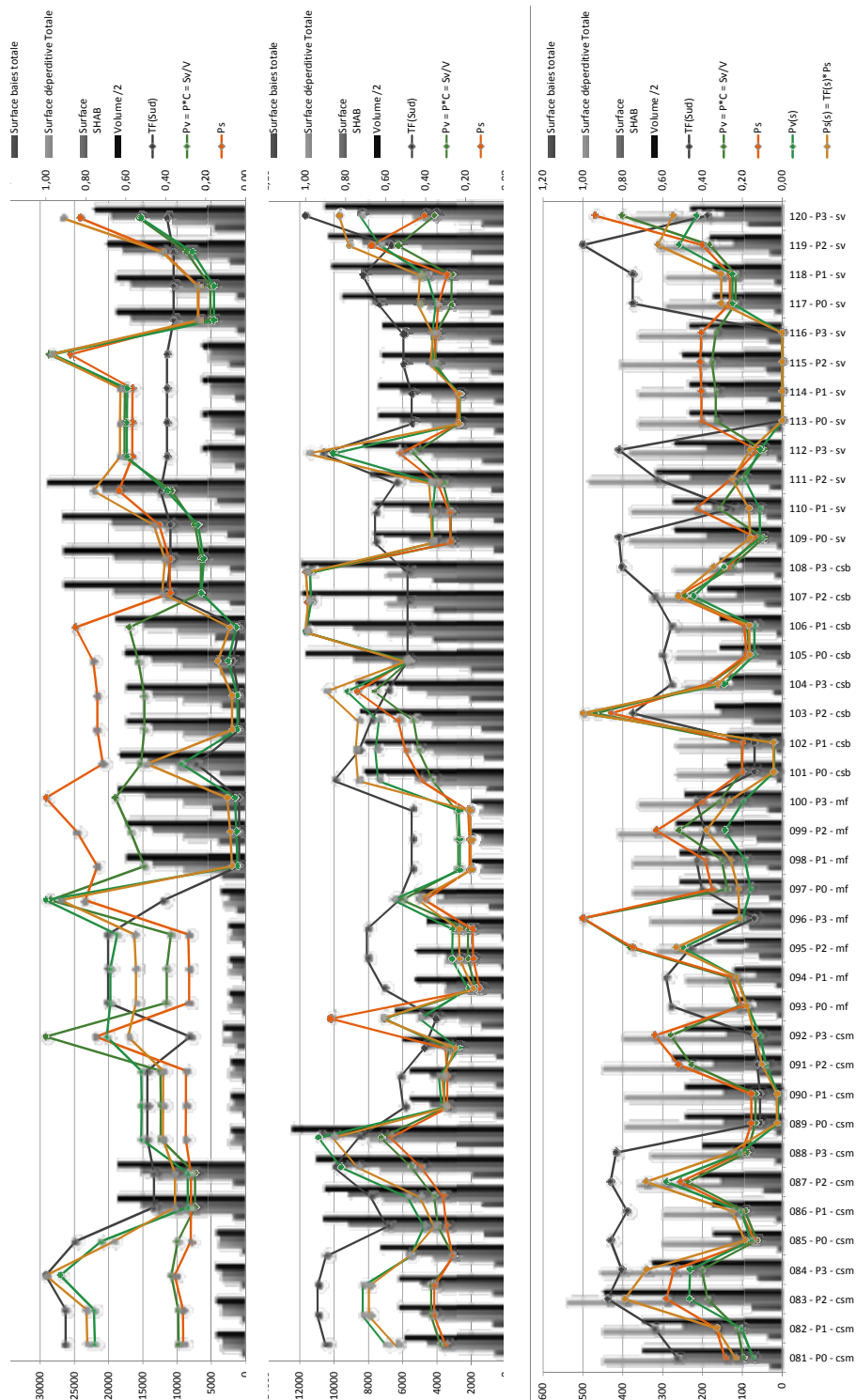
En définitive, c'est l'indicateur M, dit de la morphologie globale, qui semble le plus retranscrire la diversité des formes. L'indicateur Cf semble assez pertinent car il permet de procéder à des comparaisons extra-typologiques grâce à sa constance<sup>75</sup> et à l'information qu'il apporte sur la quantité de surface déperditive.

**Indicateurs indépendants du vitrage :** (figure 4-36)

Pour les barres, les indicateurs suivent approximativement les mêmes fluctuations pour les petits volumes tandis qu'ils perdent leur corrélation pour les grands. Pour les projets de grande taille, Tf tend vers les indicateurs  $Pv_{SUD}$  et  $Ps_{SUD}$  tandis que  $Pv$  et  $Ps$  se détachent légèrement du lot. Le ratio de surface opaque/transparente étant différent d'un projet à l'autre,  $Pv_{SUD}$  et  $Ps_{SUD}$  en dépendent fortement.

---

75 Faible dispersion des valeurs.



4-36

**4-36. Lois d'évolution et possible redondance**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

**4-36. Indicateurs : Pv, Ps,  $Pv_{sup}$ ,  $Ps_{sup}$  et  $Tf_{sup}$**   
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan



Pour les tours, tous les indicateurs, excepté  $Tf_{SUD}$ , varient quasiment de la même manière.  $Tf$  évolue aléatoirement au gré de la surface de vitrage sud. On se rend compte de la grande diversité des proportions de vitrage sur l'ensemble des cas. Dans le même temps,  $Pv$  et  $Ps$  possèdent des courbes presque superposées. Plus  $Tf$  est élevé, plus les résultats pour l'orientation tendent vers les résultats généraux pour  $Pv$  et  $Ps$ .

Pour les pavillons, le constat est encore plus flagrant : les indicateurs fluctuent simultanément, excepté au moment où la surface de baies  $Sv$  atteint des valeurs extrêmes. Ici,  $Tf$  semble se comporter un peu plus en accord avec les autres courbes car les proportions de vitrage sont très proches d'un pavillon à l'autre.

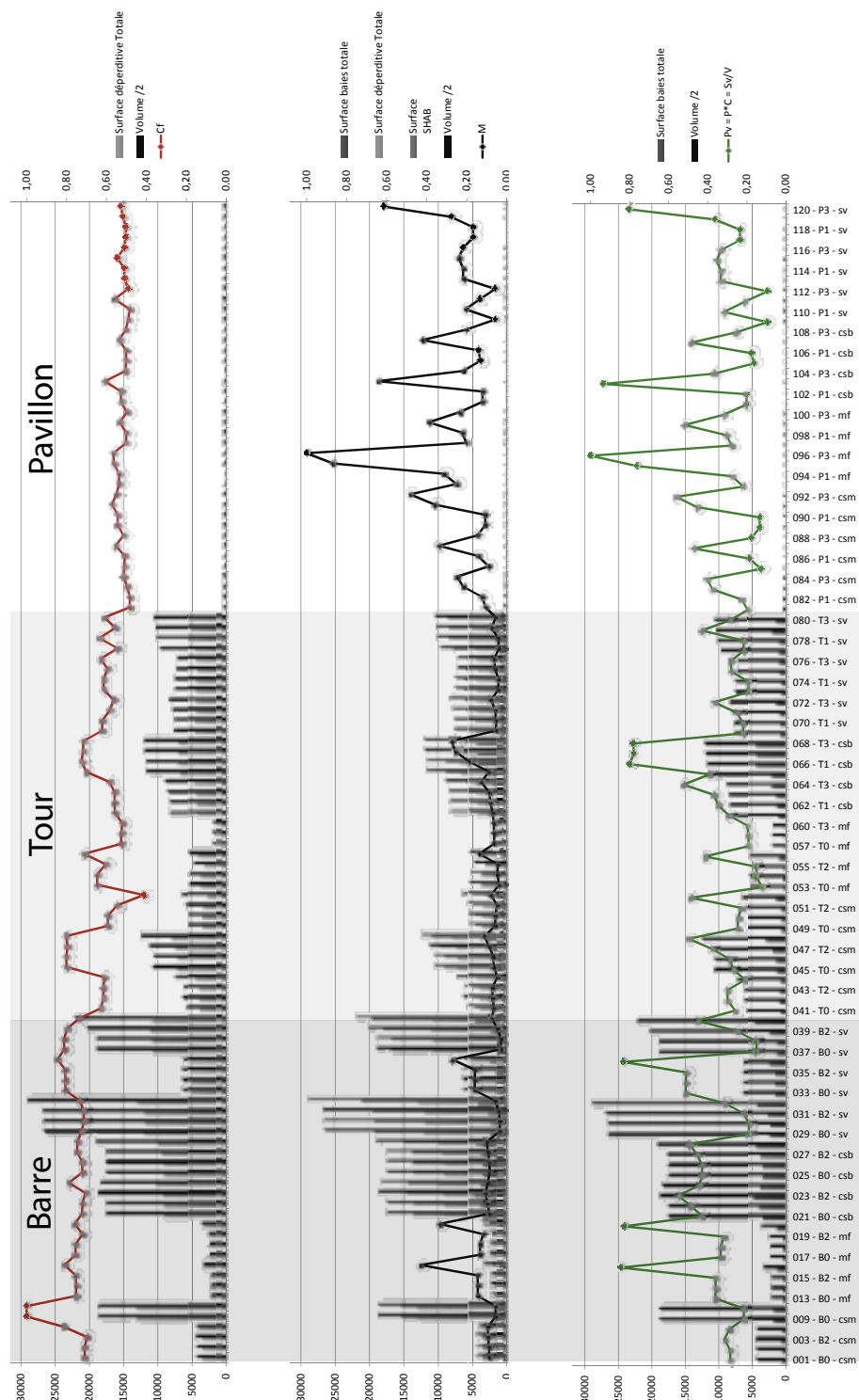
**Conclusion :** En général, tous les indicateurs sauf  $Tf$  varient selon les mêmes courbes. Dans le détail,  $Pv$  et  $Ps$  sont redondants pour le cas générique et aussi par orientation. En somme, trois indicateurs complémentaires pourraient être utilisés pour définir complètement la nature opaque/transparente de l'enveloppe :  $Tf$ ,  $Pv$  et  $Pv_{SUD}$ .

#### 4`3`5 Discussion critique sur les conclusions

La variabilité des indicateurs est symptomatique de la diversité des logements. Les résultats par comparaison intra et extra-typologique sont donc difficiles à critiquer. Des observations sur ces résultats nous amènent cependant à dresser quelques conclusions.

Concrètement, l'indicateur de morphologie globale  $M$ , accompagné du coefficient de forme  $Cf$ , semble décrire assez bien chaque projet.  $M$  est synthétique dans sa description tandis que  $Cf$  caractérise la morphologie pure de l'enveloppe. Ces deux indicateurs présentent l'avantage d'être adaptés aux comparaisons extra-typologiques. D'autres part, trois indicateurs permettent de définir la nature opaque/transparente puisqu'ils fournissent chacun une information sur la proportion de vitrage comparativement au volume global et à la quantité de vitrage totale. Ainsi, le projet est renseigné quant à sa quantité et sa répartition de vitrage en fonction ou non de son orientation privilégiée par  $Tf_{SUD}$ ,  $Pv$  et  $Pv_{SUD}$ .

En somme, l'indicateur, seul, possède un domaine d'application limité qui minimise son champ d'action. De plus, chaque indicateur génère des informations partielles qui vont nous renseigner sur la taille, la géométrie ou le rapport opaque/vitré mais jamais sur l'ensemble. En ce sens, il semble que les indicateurs se comportent mieux en association. Au vu des résultats, des complémentarités se mettent en place comme celles faisant intervenir le Taux de façade et la Porosité par orientation qui donnent à la fois des informations sur la quantité et la proportion de vitrage. Le facteur de taille paraît tout aussi intéressant car il permet de jongler entre analyses intra et extra-typologiques. Par ailleurs, l'utilisation simultanée d'indicateurs liés à des notions diverses (taille, forme de l'enveloppe, proportion de vitrage) peuvent enrichir la définition morphologique



4-37

**4-37. Trois indicateurs morpho-énergétiques**  
Graphes issus du tableau Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-37. Coefficient de forme, Morphologie globale et Porosité volumique**  
De gauche à droite  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

globale d'un projet. La compacité corrélée à la porosité volumique revêt un fort potentiel. Enfin, la comparaison des orientations d'un bâtiment via le maître-couple-solaire ou le taux de façade permet de déterminer des orientations préférentielles ou privilégiées vis-à-vis de la course du soleil. Cet aspect n'a pas pu être examiné car le logiciel présente des limites quant à l'obtention des informations nécessaires à ces calculs.

Le prolongement légitime de cette investigation serait de pondérer cette synergie entre indicateurs et de la corréler systématiquement aux résultats de performance énergétique dans le but de trouver une combinaison qui soit la plus fidèle au comportement énergétique de n'importe quel bâtiment.

Par disjonction typologique des cas, on remarque que les barres et les tours<sup>76</sup> se comportent quasiment de la même façon contrairement aux pavillons dont les résultats sont souvent excessifs, irréguliers et donc difficilement prédictibles. Ce phénomène d'imprévisibilité rajoute un poids à la mauvaise réputation des pavillons<sup>77</sup>.

Finalement, l'évolution des indicateurs d'une intervention à l'autre reflète trois volontés préconisées d'instinct par les étudiants :

- simplification géométrique pour minimiser les pertes : augmentation de la compacité et du coefficient de forme ;
- augmentation de la surface de vitrage pour maximiser les apports : augmentation de la porosité morphologique<sup>78</sup> ;
- orientation vers le sud pour tirer parti des apports solaires optimaux.

Il est bon de vérifier si ces trois postulats, établis instinctivement, sont cohérents. En effet, la hausse illimitée de la porosité couplée à l'orientation sud pourraient aboutir à l'accroissement exponentiel des besoins en froid<sup>79</sup>. Tout est question d'équilibre et aucune assertion n'a valeur d'absolu. Pour appuyer cet argument, les indicateurs seront corrélés à des résultats de performance énergétique pour visualiser directement l'influence de la forme sur l'énergie.

---

76 Dans le détail, les barres possèdent une orientation privilégiée très marquée et un développé de façade beaucoup plus libre que la tour, d'où l'obtention d'écart-types plus élevés pour la barre. Peut-être serait-il judicieux de créer des sous-catégories typo-morphologiques pour les barres qui soient définies par une longueur caractéristique et une orientation préférentielle. Les comparaisons entre tours sont moins risquées car les résultats révèlent une homogénéité statistique puisque les tours sont plus limitées dans l'espace que les barres (hauteur limitée comparée à la longueur d'une barre). Le vitrage intervient tout de même conséquemment dans l'équation. Tout comme la barre, il serait éventuellement pertinent de créer des sous-catégories définies en fonction du taux de vitrage et d'une hauteur caractéristique.

77 Réputation fondée sur leur faible efficacité énergétique comme reconnu dans la partie précédente.

78 Caractérise la proportion de vitrage. Un bâtiment « poreux » est un bâtiment fortement vitré.

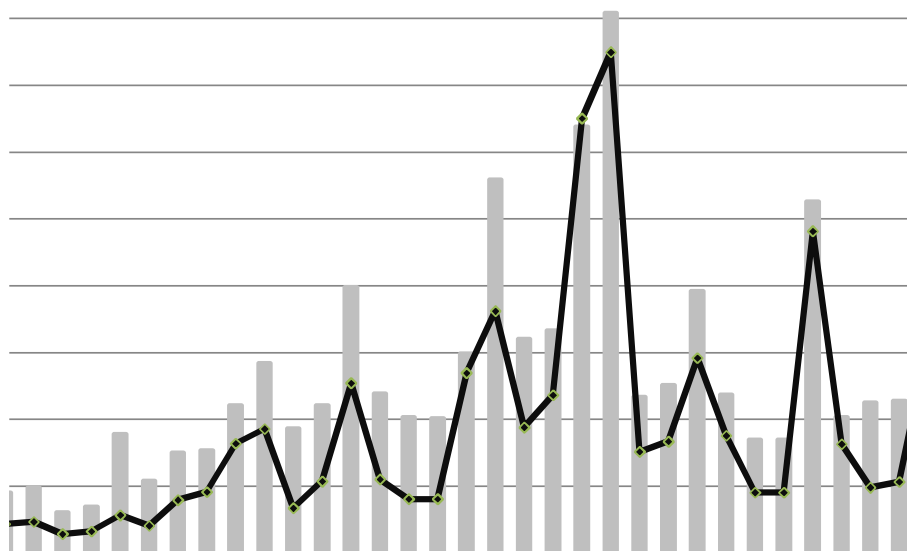
79 Dans le cas des serres greffées, la porosité augmente fortement (on rajoute une surface 100% vitrée) alors que le volume varie légèrement. Cette zone tampon ainsi créée perturbe les calculs car le moteur de calcul d'archiwizard ne prend pas en compte le fonctionnement subtil de cette serre. Il faut donc se méfier de ce cas de figure dans la formulation des indicateurs puisque l'intervention est perçue comme phénoménale comparativement à l'existant.



Énergie



Forme 4-38



4-39

**4-38. De l'énergie à la forme par l'indicateur**  
Croquis expliquant la morphogénèse énergétique  
Document créé pour l'étude :  
Réda Oussennan

**4-39. Arraché d'une corrélation entre M et les performances énergétiques annuelles**  
Document créé pour l'étude :  
Réda Oussennan

## 4.4 Corrélation entre Forme et Énergie

### 4.4.1 Rappel des enjeux légitimant cette entreprise

Quel est le paramètre morphologique prépondérant : la forme de l'enveloppe, l'orientation du bâtiment ou sa constitution en surface opaque / vitrée ? Existe-t-il un principe déterministe absolu ou cette prépondérance dépend des cas ? Des typologies ? Peut-on identifier ces cas ?

Il est peut-être possible de statuer sur la pertinence d'un indicateur pour des situations précises<sup>80</sup> ou sur l'éventuelle existence de cas pour lesquels il devient obsolète<sup>81</sup>. Si certains indicateurs se révèlent plus pertinents que d'autres, il sera alors possible de conclure sur les paramètres qui gouvernent le comportement énergétique. Au contraire, peut-être qu'aucun indicateur ne se révélera absolument fiable et que la combinaison subtile de plusieurs paramètres permettra d'atteindre au mieux cette corrélation entre forme et énergie (*figure 4-39*).

Est-il possible de tendre vers une combinaison idéale d'indicateurs qui puisse nous renseigner sur les résultats de performance énergétique au mieux ? Procédure algorithmique pour trouver cette combinaison ? L'investigation peut être développée selon une méthode de recherche mathématique plus poussée qui confère la possibilité de tendre vers un ou des indicateurs optimaux via un processus algorithmique itératif<sup>82</sup>.

### 4.4.2 Choix des paramètres corrélés en fonction des enjeux

#### • Les scénarios de performance énergétique testés

Afin de couvrir un maximum de situations, nous tenterons de corréler tous les indicateurs précédemment sélectionnés avec quatre résultats de performance :

- Besoin annuel total 2013 pour les besoins brutes sur l'année ;
- Besoin hiver / été 2013 pour les besoins extrêmes et de nature différente selon les saisons ;
- Augmentation relative 2013-2050 été/hiver/annuel pour l'évolution des besoins.

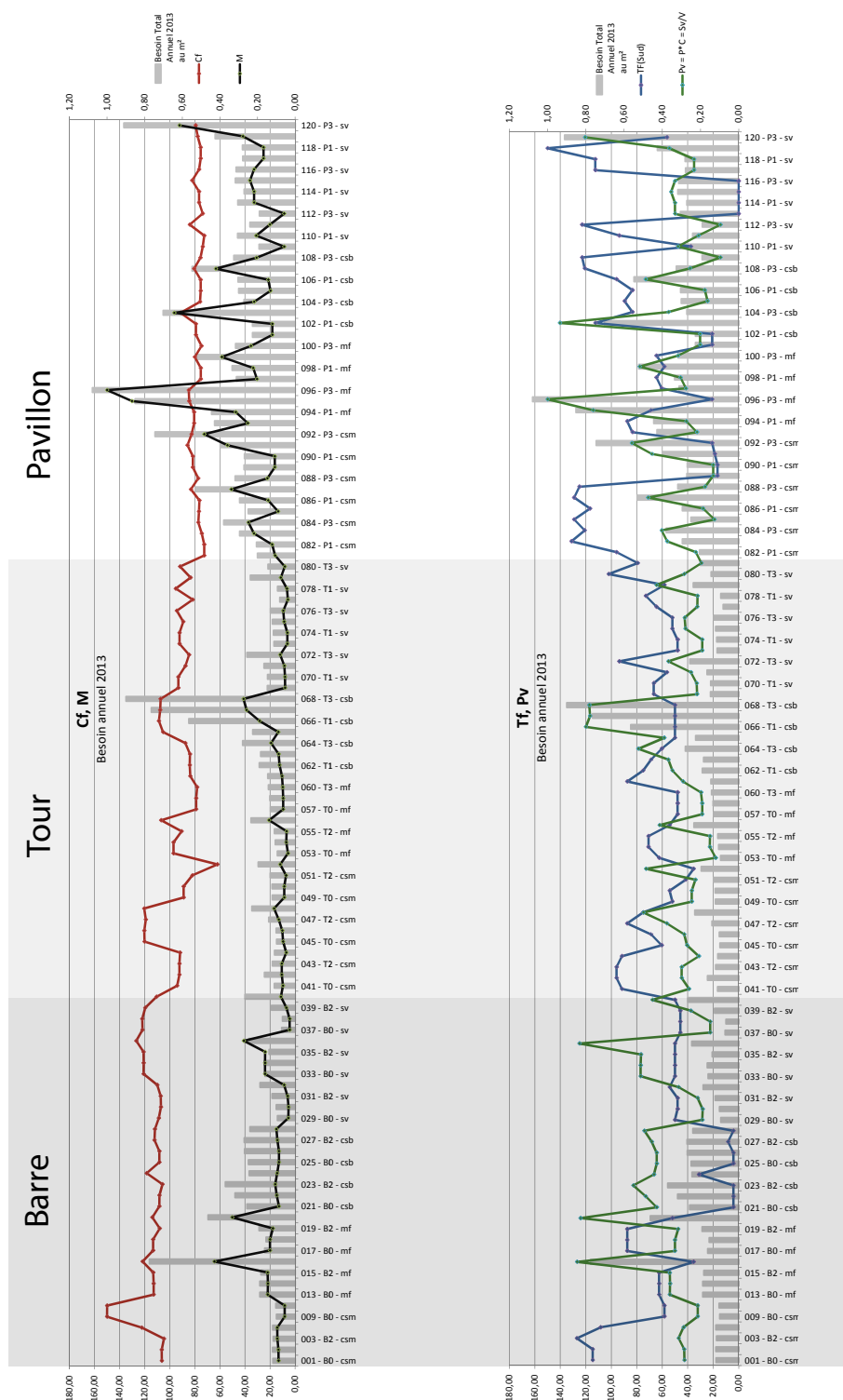
Ces corrélations serviront à déterminer quels indicateurs sont les plus adaptés pour l'étude de chaque intervalle de temps considéré et quelles pourraient être les valeurs des indicateurs qui permettent d'identifier un potentiel bon projet sur le court et le long terme.

---

<sup>80</sup> Situations été, hiver, et annuelle.

<sup>81</sup> Cas des serres, des barres très longues etc.

<sup>82</sup> Algorithme génétique via le logiciel Grasshopper par exemple.



4-40 4-41

#### 4-40. Cf et M corrélés au besoin annuel 2013

Graphe issu du tableau Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

#### 4-41. Tf<sub>sud</sub> et Pv corrélés au besoin annuel 2013

Graphe issu du tableau Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

### • Les indicateurs morphologiques testés

Dix indicateurs de base seront testés. Ensemble, ils définissent la morphologie globale du bâtiment de manière assez complète. Indépendamment, ils revêtent un intérêt plus limité.

Ne connaissant pas le type de relation qui lie indicateur et performance énergétique<sup>83</sup>, la comparaison se fera linéairement<sup>84</sup> ou via un logarithme<sup>85</sup>. Le but est d'établir une relation linéaire entre indicateurs et performance énergétique par régression, linéaire ou non, par changement de variables et pas mal d'intuition. De surcroît, chaque indicateur sera étudié par typologie.

### • Informations à croiser : matrice expérimentale

| Scénario                      | Indicateurs             | Typologie | Opération  |
|-------------------------------|-------------------------|-----------|------------|
| Annuel 2013                   | Morphologie globale     | Totalité  | linéaire   |
| Été 2013                      | Coefficient de taille   | Barre     | logarithme |
| Hiver 2013                    | Coefficient de forme    | Tour      | 2          |
| Augmentation 2013-2050 annuel | Compacité               | Pavillon  |            |
|                               | Compacité surfacique    | 4         |            |
|                               | Taux de façade          |           |            |
| Augmentation 2013-2050 été    | Porosité volumique      |           |            |
|                               | Porosité surfacique     |           |            |
|                               | Porosité volumique Sud  |           |            |
| Augmentation 2013-2050 hiver  | Porosité surfacique Sud | 10        |            |
|                               |                         |           |            |
| 6                             |                         |           |            |

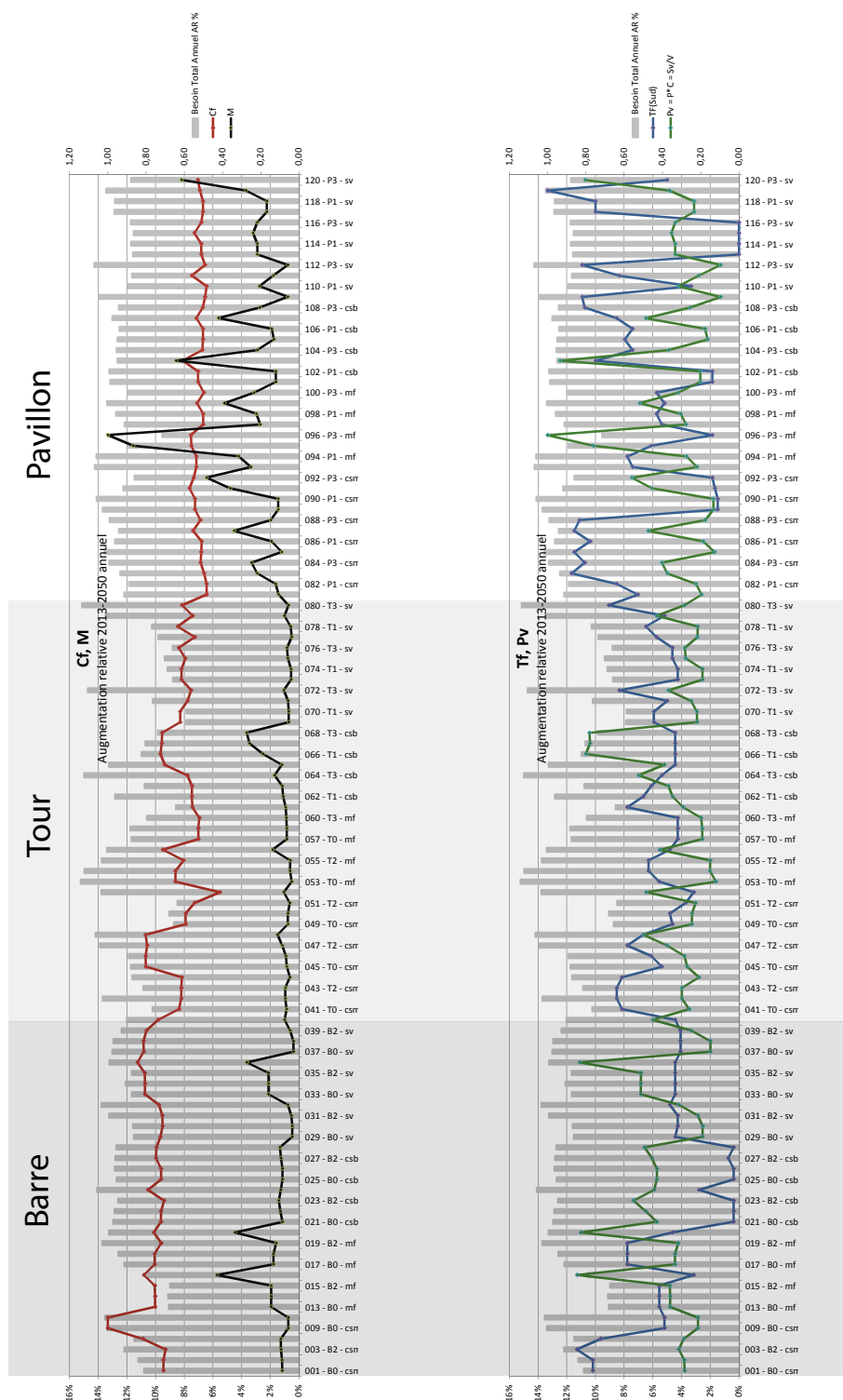
On pourrait étudier **480 cas** systématiquement mais nous sélectionnerons les indicateurs dont le potentiel a été dévoilé dans la partie précédente :

- Taux de façade Tf
- Porosité volumique Pv
- Coefficient de forme Cf
- Morphologie globale M

<sup>83</sup> Relation linéaire, polynomiale ou autre.

<sup>84</sup> indicateur en abscisse, besoin en ordonnée.

<sup>85</sup> log( indicateur ) en abscisse, ln( besoin ) en ordonnée.



4-42 4-43



Ces indicateurs seront testés sur l'ensemble des projets selon les situations :

| Situations                    | Indicateurs             | Typologie | Opération  |
|-------------------------------|-------------------------|-----------|------------|
| Annuel 2013                   | Morphologie globale     | Totalité  | linéaire   |
| Été 2013                      | Coefficient de taille   | Barre     | logarithme |
| Hiver 2013                    | Coefficient de forme    | Tour      | 2          |
| Augmentation 2013-2050 annuel | Compacité               | Pavillon  |            |
|                               | Compacité surfacique    | 4         |            |
|                               | Taux de façade          |           |            |
| Augmentation 2013-2050 été    | Porosité volumique      |           |            |
|                               | Porosité surfacique     |           |            |
|                               | Porosité volumique Sud  |           |            |
| Augmentation 2013-2050 hiver  | Porosité surfacique Sud |           |            |
|                               | 10                      |           |            |
| 6                             |                         |           |            |

#### 4` 4` 3 Corrélation morpho-énergétique et conclusions

- **Corrélation annuelle** (figure 4-40, 4-41 et 4-44)

La Morphologie globale et la Porosité volumique présentent des résultats éloquentes. La porosité volumique a l'air plus fidèle au comportement énergétique des grandes typologies tandis que la Morphologie s'adapte parfaitement aux variations entre pavillons individuels.

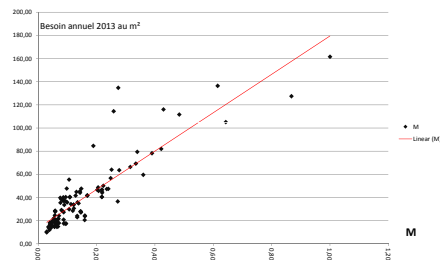
- **Corrélation saisonnière été / hiver** (figure 4-45 et 4-46)

Les typologies sont très sensibles aux différences de saison. Sur les graphes, on observe des nuées de points qui suivent des logiques non concomitantes mais groupées. Par disjonction des cas typologiques, on obtient des résultats très probants pour l'indicateur de Morphologie globale en période estivale et hivernale ; de même pour la Porosité volumique en hiver.

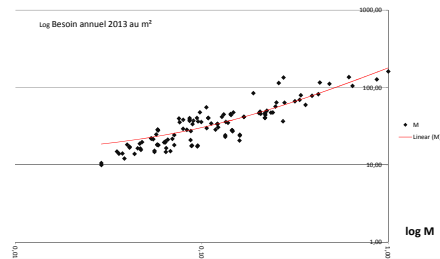
- **Corrélation sur le long terme** (figure 4-42, 4-43 et 4-47)

L'augmentation relative des besoins est liée au Coefficient de forme, même si ce résultat reste à affiner car il n'est pas instinctif. De même, le Taux de façade semble influencer partiellement l'évolution relative des besoins en hiver.

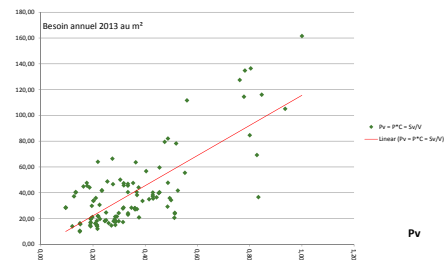
Relation Linéaire M - Besoin annuel



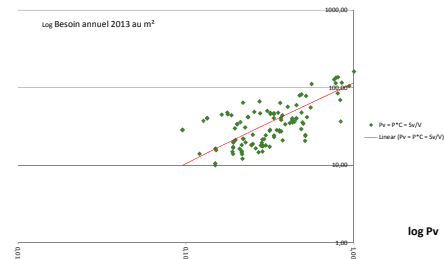
Relation Logarithmique M - Besoin annuel



Relation Linéaire Pv - Besoin annuel

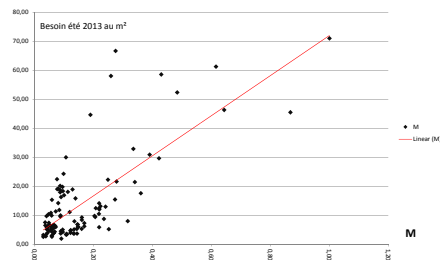


Relation Logarithmique Pv - Besoin annuel

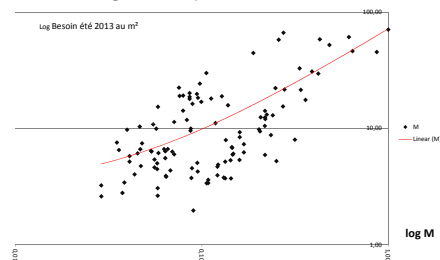


4-44

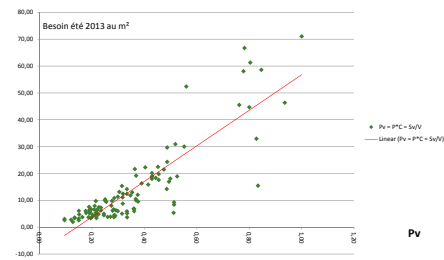
Relation Linéaire M - Besoin été



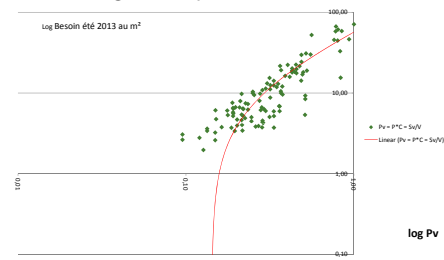
Relation Logarithmique M - Besoin été



Relation Linéaire Pv - Besoin été



Relation Logarithmique Pv - Besoin été



4-45

#### 4-44. M et Pv reliés aux résultats annuels de performance énergétique

Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

#### 4-45. M et Pv reliés aux résultats estivaux de performance énergétique

Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

#### 4` 4` 4 Discussion critique sur les conclusions

##### • **Emergence d'indicateurs morpho-énergétiques pertinents**

La corrélation entre indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique représente la substantifique moelle de cette étude. Les résultats obtenus sont très probants puisque certains indicateurs suivent fidèlement les lois qui régissent le comportement énergétique des bâtiments. Plusieurs conclusions très éloquentes ont émergé du test des dix indicateurs selon une matrice expérimentale exhaustive croisant scénarios prévisionnels (2013, 2050) et domaine de validité (extra, intra-typologique). Deux grands enjeux se sont dégagés au cours même de l'investigation : approcher au mieux les variations de besoins instantanément obtenus après intervention architecturale et définir la capacité d'adaptation d'un bâtiment au phénomène du changement climatique grâce aux indicateurs. Le comportement énergétique instantané se corrèle avec deux indicateurs de forme :

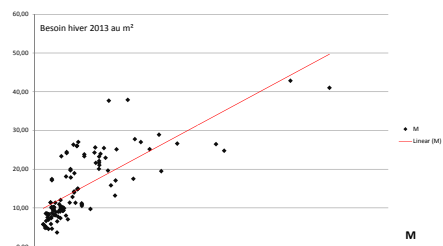
- **la Porosité volumique** définie par le rapport entre surface totale de baies et volume chauffé ;
- **la Morphologie globale**, fonction de l'intégralité des paramètres morphologiques de base.

Quant à l'augmentation relative des besoins sur les quarante prochaines années, elle est étroitement liée au **Coefficient de forme**, exprimé par le rapport adimensionnel entre surfaces déperditives et volume. La conclusion majeure qu'on peut tirer de ces résultats est que la performance énergétique du bâtiment sur le court terme dépend significativement de la proportion et répartition du vitrage. En effet, la compacité ou le coefficient de forme, indicateurs sacrés de la littérature spécialisée, ne revêtent pas une grande pertinence pour les besoins de 2013 comparés aux indicateurs de porosité. Cependant, la géométrie pure, caractérisée par ces deux indicateurs, semble influencer sur l'évolution des besoins à long terme.

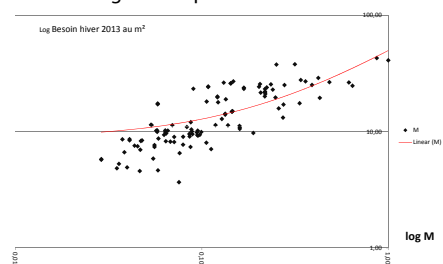
Comme statué précédemment, les indicateurs morpho-énergétiques peuvent être pleinement exploités lorsqu'ils sont associés entre eux. Le prolongement légitime de cette investigation serait de pondérer cette complémentarité et de la corréler systématiquement aux résultats de performance énergétique. La fin ultime consisterait ainsi à trouver une combinaison qui soit la plus fidèle au comportement énergétique de n'importe quel bâtiment et qui évite d'avoir recours à de multiples indicateurs.

Par cette étude, nous avons réussi à définir partiellement la relation entre Forme et Energie ; relation qui semble partielle par nature. C'est dans la mutualisation de plusieurs indicateurs et la compréhension rapide de leur influence sur les besoins énergétiques que pourra se développer le projet de manière judicieuse. Les débats énergétiques de base qui questionnent la pertinence d'une intervention comparée à une autre sont très chronophages et confus car ils sont uniquement fondés sur des considérations instinctives.

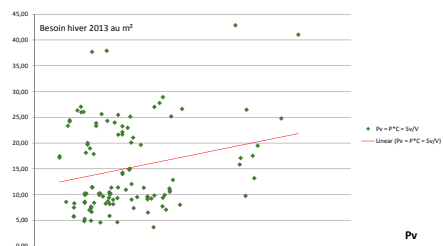
Relation Linéaire M - Besoin hiver



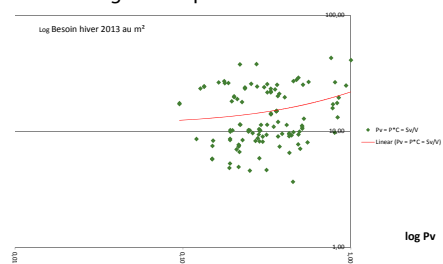
Relation Logarithmique M - Besoin hiver



Relation Linéaire Pv - Besoin hiver

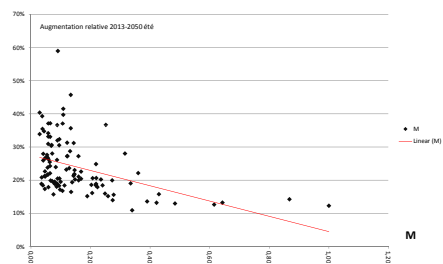


Relation Logarithmique Pv - Besoin hiver

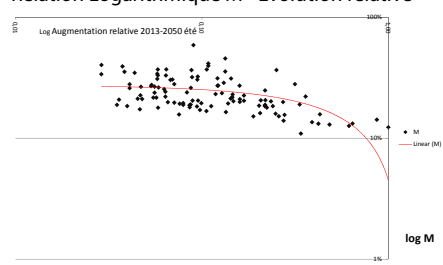


4-46

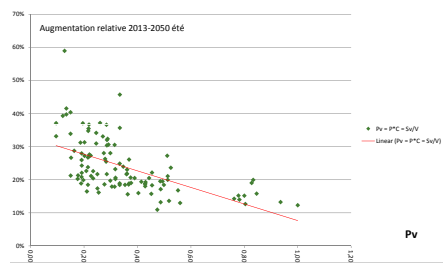
Relation Linéaire M - Evolution relative



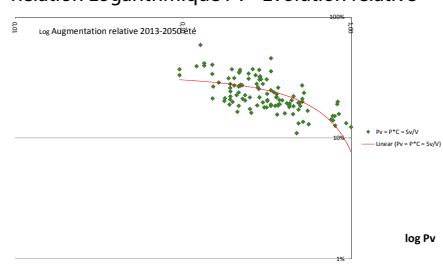
Relation Logarithmique M - Evolution relative



Relation Linéaire Pv - Evolution relative



Relation Logarithmique Pv - Evolution relative



4-47

#### 4-46. M et Pv reliés aux résultats hivernaux de performance énergétique

Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

#### 4-47. M et Pv reliés à l'évolution 2013-2050 de la performance énergétique

Graphes issus du tableur Excel récapitulatif  
Documents créés pour l'étude : Réda Oussennan

Ces polémiques essentielles au bon développement du projet pourront ainsi être éludées rapidement par ces indicateurs de poche. Les indicateurs pourront pleinement assumer leur rôle d'ordre de grandeur ou d'aide à la décision tout autant en phase de conception qu'au cours de la réalisation du projet. En nombre suffisant et utilisés dans leur cadre strict d'application, les indicateurs morpho-énergétiques rempliront ainsi leurs fonctions efficacement : guider, justifier ou vérifier.

#### • Limites de la recherche

D'une part, les liens que nous avons mis en valeur entre forme et énergie sont fondés sur des hypothèses qui doivent être discutées. D'autre part, la fiabilité des logiciels de simulation thermique n'est pas incontestable. Pour éprouver l'authenticité des résultats, il faudra affiner les hypothèses pour des situations précises. Par exemple, le scénario d'occultation solaire peut être corrigé en été. Cette recherche d'indicateurs par des tendances statistiques peut également être appuyée par des analyses thermiques plus fines<sup>86</sup>.

Outre ce point important, nous avons choisi consciemment d'éviter certaines questions lors de la définition des hypothèses. Ainsi, certains facteurs tels que la composition matérielle des parois n'ont pas été analysés. Il est possible que ce paramètre puisse primer sur la morphologie. Une étude multicritère semble ambitieuse mais essentielle à la détermination des paramètres qui conditionnent le plus le comportement énergétique d'un bâtiment.

---

<sup>86</sup> Sébastien Malaussène, étudiant à l'école des Ponts a mené des études thermiques sur des projets similaires mais par le biais d'outils de simulation thermique dynamique plus précis (Pléiade + Comfie).



cl-01

**cl-01. De l'énergie à la forme par l'indicateur**

Croquis expliquant la morphogénèse énergétique

*Document créé pour l'étude :*

*Réda Oussennan*

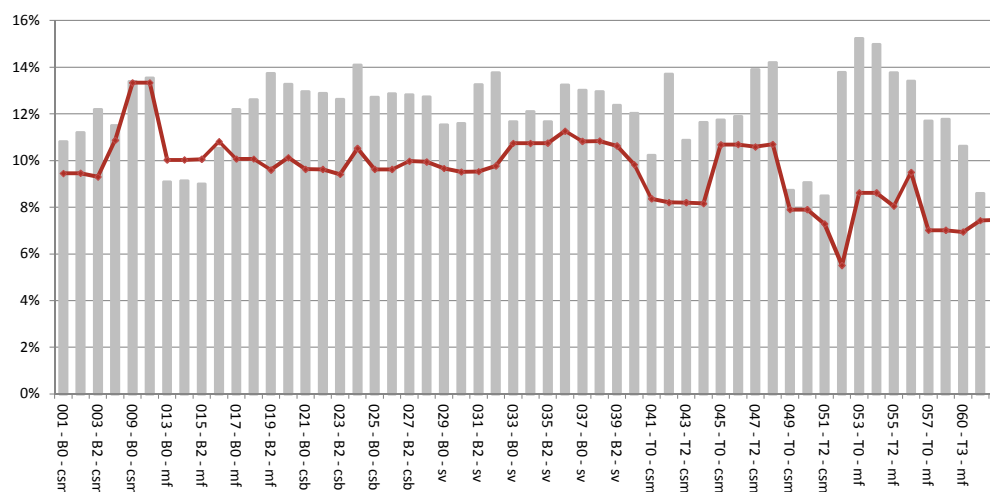
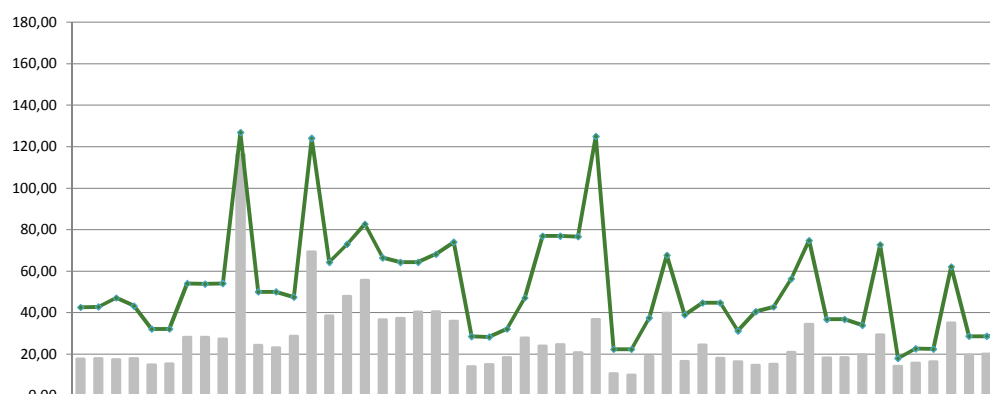
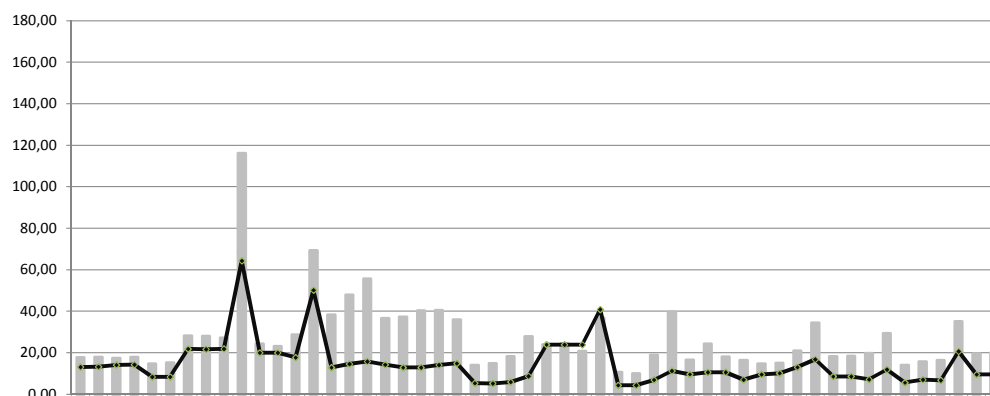
# Conclusion

La présente étude visait à établir un lien direct entre forme et énergie à partir d'outils simples et intelligibles qui puissent être exploités tout autant en phase d'esquisse qu'au cours de la vérification du projet en aval. Afin d'anticiper le comportement énergétique d'un projet à partir de ces caractéristiques typomorphologiques, il a fallu se doter d'un outil à la portée de tout concepteur : l'indicateur. La problématique se résumait donc à la formulation :

**Peut-on corrélérer indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique d'un projet afin de créer des outils d'aide à la conception bioclimatique ?**

Après avoir défini un socle solide de connaissances, d'hypothèses et de précautions, le traitement des innombrables données (150 000) a abouti à des conclusions qui vont parfois à l'encontre du bon sens commun. La différenciation des performances énergétiques se ressent lorsqu'on étudie les situations été et hiver séparément. La tour, bonne élève typologique dans le cas général, se révèle moins performante par disjonction des cas saisonniers. D'autre part, on remarque que la plupart des cas étudiés voient leurs besoins augmentés drastiquement suite aux interventions proposées et ce, à cause de la détérioration brutale des conditions de confort en été. En prenant du recul, l'adaptation au climat semble révéler plus de résultats favorables que le bilan énergétique en 2013. Somme toute, les barres, tours et pavillons possèdent des performances énergétiques très disparates qui évoluent très différemment sur le long terme. L'extrême variété des comportements énergétiques semble révélatrice de la disparité typomorphologique, elle-même propre à l'habitat périurbain dominant sur la Dorsale Est.

La diversité des indicateurs morphologiques recèle un potentiel inestimable puisqu'ils ont tous une histoire à nous raconter sur l'identité formelle des bâtiments. Chaque indicateur ne peut définir l'ensemble de la forme à lui seul mais la complémentarité des indicateurs pallie cette lacune. Leur synergie dépend fortement de leur domaine d'application, du sens physique sous-jacent et des paramètres morphologiques de base qu'ils invoquent.



cl-02

### cl-02. Trois indicateurs morpho-énergétiques pertinents

Graphes issus du tableau Excel récapitulatif

Documents créés pour l'étude :

Réda Oussennan



La corrélation entre indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique représente la substantifique moelle de cette étude. Les résultats obtenus sont très probants puisque certains indicateurs suivent fidèlement les lois qui régissent le comportement énergétique des bâtiments. C'est le cas de la Porosité volumique<sup>1</sup> et de l'indicateur de Morphologie globale<sup>2</sup> qui sont étroitement liés aux besoins annuels 2013 et 2050 de la grande majorité des cas étudiés quelle que soit leur typologie. D'autre part, Le coefficient de forme et la compacité, indicateurs sacrés de la littérature spécialisée, ne semblent pas pertinents lorsqu'ils sont mis en relation avec les besoins calculés à un instant t. Cependant, ils informent sur la capacité d'adaptation d'un bâtiment au changement climatique puisqu'ils présentent des similitudes inattendues avec le calcul de l'évolution relative des besoins sur les quarante prochaines années. Outre ces découvertes, la conclusion majeure qu'on peut tirer de ces résultats est que la performance énergétique du bâtiment dépend plus de la proportion et répartition du vitrage que de la géométrie de l'enveloppe car la surface de baies est le dénominateur commun des indicateurs les plus pertinents.

Par cette étude, nous avons réussi à définir partiellement la relation entre Forme et Energie. C'est dans la mutualisation de plusieurs indicateurs et la compréhension rapide de leur influence sur les besoins énergétiques que pourra se développer le projet de manière judicieuse. En nombre suffisant et utilisés dans leur cadre strict d'application, ces indicateurs de poche rempliront ainsi leurs fonctions efficacement : guider, justifier ou vérifier.

Le prolongement légitime de cette investigation consisterait à affiner les indicateurs pertinents par des combinaisons mathématiques plus sophistiquées entre indicateurs. Pour ce faire, l'outil paramétrique paraît adéquat car il permet de tester un grand nombre de combinaisons par des procédures algorithmiques. Tendre vers une formule optimale est une entreprise qui paraît tout de même dangereuse par son manque de pluralité mais reste hautement intéressante. Par extension une piste serait celle amorcée par Laetitia Arantes<sup>3</sup> qui développe une recherche multicritère prenant en compte des paramètres de nature très diverse. L'appréciation simultanée de la forme, des matériaux ou des systèmes techniques utilisés paraît plus complexe à mettre en œuvre mais apporte une certaine relativité au jeu des paramètres intervenant dans le bilan énergétique des bâtiments.

Finalement, cette recherche peut également être enrichie d'indicateurs morpho-énergétiques à l'échelle urbaine. Serge Salat<sup>4</sup> a déjà entamé l'évaluation des qualités urbaines via des outils d'analyse rapides et intuitifs. En extrapolant notre étude à l'échelle urbaine, le recours à des indicateurs faciliterait la compréhension de l'interaction entre les bâtiments et leur environnement.

---

1 Indicateur défini par le rapport entre surface totale de baies et volume chauffé.

2 Indicateur dépendant de l'intégralité des paramètres morphologiques de base.

3 Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.

4 Salat, Serge, *Les Villes et les Formes*, sur l'urbanisme durable, Paris, Hermann éditeurs, 2011.



R-01

**R-01. De l'énergie à la forme par l'indicateur**  
Croquis expliquant la morphogénèse énergétique  
*Document créé pour l'étude :*  
Réda Oussennan

# Résumé

Architecture, forme et énergie sont irrémédiablement liées et constituent un nouveau et prolifique terrain de recherche qui va indubitablement inspirer, influencer ou conditionner la conception des bâtiments de demain. Selon les règles du jeu que se fixeront architectes, ingénieurs et chercheurs, la pratique va être profondément bouleversée. C'est dans cette optique que des réflexions ont déjà été initiées. Le groupement scientifique interdisciplinaire participant au programme de recherche *Ignis Mutat Res* a précisé clairement ses ambitions pour répondre aux enjeux énergétiques futurs :

*« L'objectif est l'élaboration d'une sorte de grammaire des formes, à même d'établir des prévisions de performance énergétique en fonction de grandes familles géométriques d'objets bâtis, de leur position dans l'espace et de scénarios climatiques. »<sup>1</sup>*

Ma démarche s'inscrit dans cette investigation plus globale qui vise à établir **un lien direct entre Forme et Énergie**. Pour parachever cet objectif, il a été nécessaire de se doter d'outils d'étude simples et efficaces : à savoir **les indicateurs morpho-énergétiques**.

Les enjeux ont déjà été identifiés par le groupe de recherche :

*« La «typo-morphologie énergétique» ainsi construite constituera un outil de conception, de prévision et de repérage dans l'éventail des postures d'intervention possibles, à l'usage des urbanistes et des architectes : quel comportement énergétique peut-on associer à tel type de forme dans tel type d'environnement à telle période – qu'il soit ou non bâti ? »<sup>2</sup>*

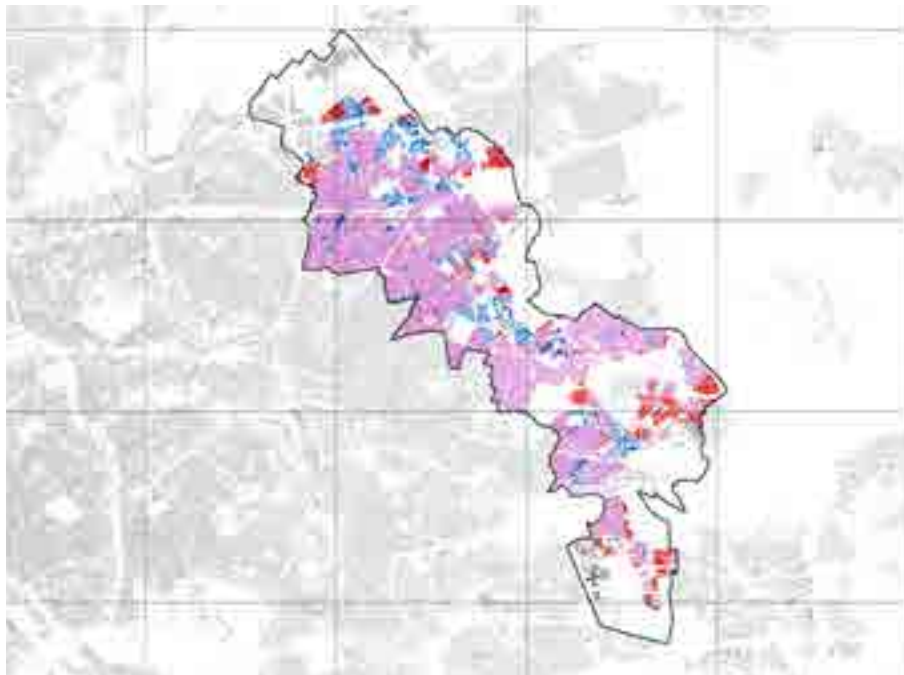
Par ailleurs, les indicateurs permettent aussi d'identifier rapidement des potentiels morpho-énergétiques lors de l'étude de bâtiments existants. Outre une possible utilisation des outils en phase d'esquisse, le recours à des indicateurs pourrait ainsi orienter certaines décisions de réhabilitation en prenant en compte le potentiel morphologique des bâtiments en question.

Des indicateurs tels que le coefficient de forme ou la porosité volumique permettent de caractériser formellement un bâtiment et entretiennent des relations, certes complexes mais indéniables, avec sa performance énergétique.

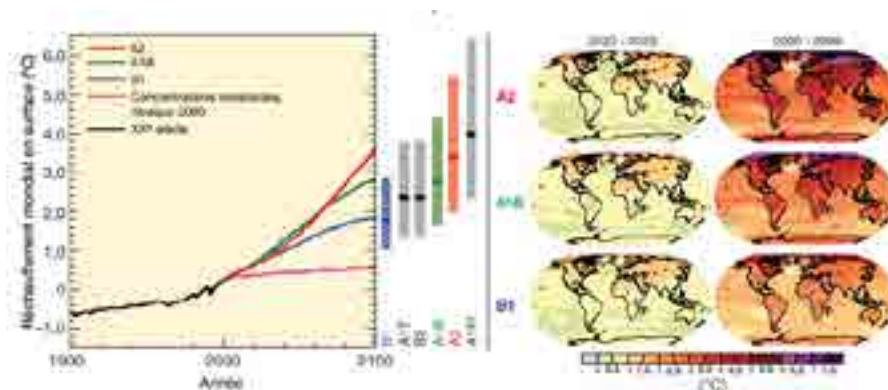
---

<sup>1</sup> Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, Ecole des Ponts Paristech, *Rapport intermédiaire du programme de recherche Ignis Mutat Res*, novembre 2013.

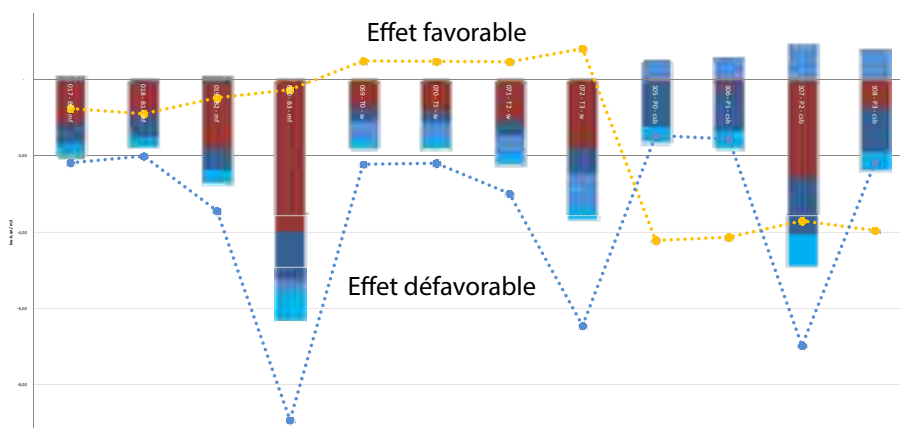
<sup>2</sup> *ibid.*



R-02



R-03



**R-02. Variété typomorphologique de l'habitat**  
Carte de la répartition typologique du logement  
Document créé à partir des travaux de DSA  
d'architecte-urbaniste de l'ENSA Marne-la Vallée

**R-03. Réchauffement climatique prospectif**  
Graphiques de l'évolution des températures  
Documents tirés du GIEC, Quatrième rapport  
d'évaluation : Changements climatiques 2007

Leur atout majeur tient à leur simplicité. Leur inconvénient reste leur incomplétude car ils ne permettent pas de définir intégralement une forme. En effet, chaque indicateur informe le projet sur un point précis et possède un domaine d'application à respecter. Par exemple, certains indicateurs n'aboutissent pas aux mêmes conclusions selon la taille du bâtiment considéré. Ainsi, leur fiabilité dépend fortement de l'égard porté au cadre strict de leur validité, à leur sens physique et aux possibles interprétations architecturales qui en découlent. Dans sa thèse<sup>3</sup>, Laetitia Arantes insiste sur quelques questionnements incontournables qui sont impliqués par le calcul de ces indicateurs :  
« Sur quels indicateurs doit-on s'appuyer pour juger de la qualité et la performance globale d'un bâtiment dit « durable » ? Quelle est la pertinence de ces indicateurs devant la complexité inhérente à la multiplicité d'interprétation des composantes contextuelles d'un projet ? »

Pour procéder au test des indicateurs, une démarche rigoureuse de recherche a été mise en place. Premièrement, un terrain d'étude a été identifié ; à savoir **la Dorsale Est**. Ce choix est justifié par deux arguments. Le premier et le plus déterminant est la représentativité de ce territoire comme espace caractéristique de l'habitat périurbain. Située à la périphérie d'une grande ville, la Dorsale Est bénéficie d'une situation stratégique<sup>4</sup> et recèle un potentiel de croissance important. Par ailleurs, ce terrain d'observation est constitué de bâtiments très variés. L'étude morphologique peut ainsi se nourrir de cette **diversité de formes bâties**. L'autre raison qui a motivé ce choix est d'ordre pratique : les étudiants du Master Matières à Penser<sup>5</sup> ont étudié ce site et proposé des projets de réhabilitation conditionnés en partie par la donne énergétique. Ce large éventail de 120 projets devient ainsi une mine d'informations à exploiter pour la procédure de recherche qui va suivre.

Deuxièmement, **des hypothèses fixes** ont été énoncées et légitiment le déni volontaire d'une démarche multicritère. Le recours à des données standards quant à la composition des parois et des baies permet de se dédouaner des considérations matérielles pour concentrer l'analyse sur le paramètre étudié : la Forme. Les hypothèses ont été corrigées plusieurs fois pendant l'analyse mais les modifications ont été systématiquement répercutées sur l'ensemble des projets dans un souci de comparaison. Pour extraire les résultats de performance énergétique, l'utilisation du logiciel de simulation thermique réglementaire Archiwizard aura été décisive et pleinement assumée. En effet, nonobstant son jeune âge, le rapport entre rapidité des calculs et fiabilité de ce logiciel est plus que suffisant. De plus, le grand nombre de cas étudiés permet de faire fi des quelques aberrations. La nature statistique de l'étude prend ainsi tout son poids.

---

<sup>3</sup> Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.

<sup>4</sup> Territoire à proximité de grands pôles dynamiques, projet du Grand Paris, Cluster Descartes.

<sup>5</sup> Master de l'Ecole Supérieure d'Architecture de Marne-la-Vallée, 2012-2013.

|                        |                         |                   |
|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Indépendant du vitrage | Coefficient de taille   | Ct                |
|                        | Coefficient de forme    | Cf                |
|                        | Compacité               | C                 |
|                        | Compacité surfacique    | Cs                |
| Dépendant du vitrage   | Taux de façade Sud      | Tf <sub>SUD</sub> |
|                        | Porosité volumique      | Pv                |
|                        | Porosité surfacique     | Ps                |
|                        | Porosité volumique Sud  | Pv <sub>SUD</sub> |
| Dépendant de tout      | Porosité surfacique Sud | Ps <sub>SUD</sub> |
|                        | Morphologie             | M                 |

| Nom                  | Porosité volumique   |
|----------------------|--|
| Formule              | $S_v / V = \text{Compacité} \times \text{Porosité surfacique}$   |
| Unité                | m <sup>-1</sup>  |
| Paramètres de base   | - Sv est la surface totale de baies<br>- V est le volume chauffé du bâtiment   |
| Ordre de grandeur    | - Barres : compris entre 0,05 et 0,20 (moyenne de 0,09)<br>- Tours : compris entre 0,03 et 0,12 (moyenne de 0,07)<br>- Pavillons : compris entre 0,03 et 0,18 (moyenne de 0,08)  |
| Sens, Interprétation | A l'instar de la compacité, ce rapport linéique, exprimé en m <sup>-1</sup> , dépend de la taille du projet car le facteur de taille intervient implicitement dans l'équation. Son ordre de grandeur est comparable entre les trois typologies. Il pourrait devenir un indicateur très prometteur car il donnerait la possibilité de comparer barres, tours et pavillons via un unique indicateur. En outre, cet indicateur possède l'avantage de qualifier la nature opaque / transparente de l'enveloppe tout en conservant une notion de taille contrairement à la porosité surfacique. |
| Domaine de validité  | La porosité volumique aboutit aux mêmes résultats que la porosité surfacique à cela près qu'elle prend en compte la notion de taille et fluctue donc moins d'une typologie à l'autre. Cet indicateur s'applique donc lors de comparaisons intra-typologiques.  |

R-04

1

#### R - 04. Indicateurs dépendants ou non du vitrage

Tableau récapitulatif des indicateurs morphologiques

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan

1 Cet indicateur donne une idée approximative de la luminosité des pièces intérieures car le vitrage est tout autant vecteur de chaleur que de lumière. En corrélant à une profondeur caractéristique, on pourrait définir un indicateur de bonne luminosité mais ceci n'est pas le propos de cette étude

Troisièmement, la variabilité des conditions climatiques a été prise en compte sur des périodes plus ou moins étendues par la considération de scénarios saisonniers (été et hiver) et prospectivistes (prévisions du GIEC<sup>6</sup> 2013 et 2050). Sur le long terme, les données météorologiques du GIEC nous donnent la possibilité de statuer sur l'évolution des besoins énergétiques au regard du changement climatique qui s'accélère chaque année. La sélection du pire scénario établi par le groupe d'experts a été faite consciemment. Une problématique sous-jacente serait donc la détermination des possibilités d'adaptation d'un bâtiment à l'hostilité croissante des conditions d'ensoleillement ou aux éventuelles crises énergétiques brutales. Dennis Meadows utilise le concept de résilience<sup>7</sup> pour illustrer ce point. En parallèle, il a été nécessaire de consulter la littérature pour en extraire le plus d'indicateurs possibles. De nombreuses réflexions sur le sujet ont déjà été élaborées par Serge Salat<sup>8</sup>, Carlo Ratti<sup>9</sup> ou Laetitia Arantes et démontrent bien l'intérêt que suscitent ces variables morpho-énergétiques.

Après avoir défini ce socle solide de connaissances, d'hypothèses et de précautions, il a été possible d'extraire et de traiter une partie des innombrables données (150 000) relatives aux 120 projets traités. Les résultats ont été critiqués par comparaison des situations (été, hiver, annuel), des prévisions (2013, 2050), des différents échanges énergétiques (apports, pertes), des typologies (barre, tour, pavillon), des degrés d'intervention (a minima, greffe et transformation globale de l'enveloppe) et des hypothèses (avec et sans protections solaires). La finalité ultime est de se concentrer sur les caractéristiques morpho-énergétiques des bâtiments existants et projets imaginés pour en tirer des tendances à partir du large corpus. L'idéal serait de corrélérer des indicateurs morphologiques avec des résultats de performance énergétique<sup>10</sup>. La corrélation établie, ces indicateurs morphologiques pourraient informer le projet quant à ses consommations énergétiques tout autant en phase d'esquisse qu'au cours d'étapes plus avancées (vérification et réalisation). Dixit Serge Salat, « *Les indicateurs ne sont pas des outils prescriptifs mais des outils d'aide à la décision et de communication. Ils permettent de comparer plusieurs projets en vérifiant les conséquences énergétiques et environnementales de choix de formes.* » Ils auraient ainsi valeur d'**ordre de grandeur** et pourraient ainsi étoffer la boîte à outils des architectes et ingénieurs à l'instar des pré-dimensionnements d'éléments structurels.

---

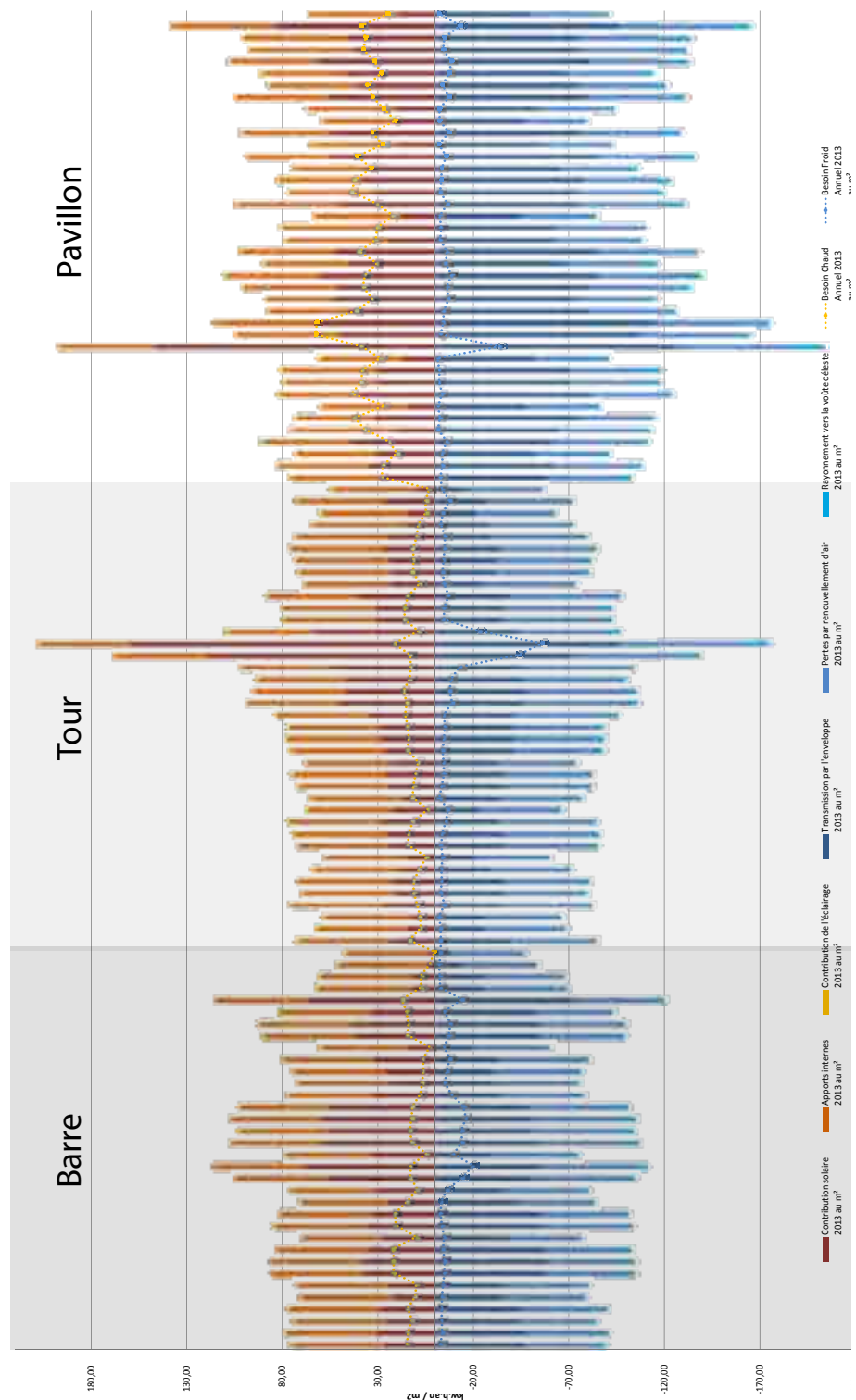
6 GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Quatrième rapport d'évaluation : *Changements climatiques 2007* ( rapport disponible sur [www.ipcc.ch/report/](http://www.ipcc.ch/report/)).

7 *Preparing cities for the age of declining oil*, Conf. à l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée

8 Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.

9 Carlo, Raydan Dana, Steemers Koen, "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate", *Energy and Buildings*, n°35, 2003.

10 Besoin en chaud, besoin en froid, 2013, 2050.



R-05

#### R-05. Contribution de chaque apport et perte

Graphe issu du tableur Excel récapitulatif

Document créé pour l'étude :

Réda Oussennan



Les premiers résultats sur **les performances énergétiques** confirment le fait qu'à Paris, le réchauffement climatique va davantage augmenter les besoins en froid en été qu'améliorer la situation en hiver. Actuellement, la précarité énergétique touche davantage les foyers en hiver qu'en été car les bâtiments ne bénéficient pas d'une isolation performante. Cependant, l'été pourrait devenir la période la plus problématique si la multiplication des apports solaires ne se voit pas contrecarrée par une bonne stratégie de réhabilitation.

Certaines typologies réagissent légèrement mieux aux changements climatiques<sup>11</sup>. En général, les tours se comportent donc mieux que les barres et les pavillons car la réaction de ces deux typologies à l'évolution du climat dépend fortement de leur orientation.

La différenciation des performances énergétiques se ressent lorsqu'on étudie les scénarios été et hiver séparément. Le phénomène inverse est observable en scénario estival pour lequel les maisons individuelles résistent mieux au réchauffement climatique. Néanmoins, les pavillons ne bénéficient pas de l'amélioration des conditions de confort en hiver contrairement aux autres typologies<sup>12</sup> car l'énergie emmagasinée se dissipe beaucoup plus rapidement dans ces petits volumes ouverts sur plusieurs orientations. Grâce aux résultats obtenus via l'étude détaillée des cas représentatifs, on remarque qu'il faut intervenir sur la diminution des pertes par transmission de l'enveloppe tout en régulant les apports solaires en hiver.

Par ailleurs, au sein de ses typologies, on remarque que la plupart des projets voient leurs besoins augmentés drastiquement à cause de la détérioration brutale des conditions de confort en été. En général, c'est la transformation globale de l'enveloppe qui provoque des risques de surchauffe non négligeables. Quant aux autres interventions, elles dépendent des typologies mais restent essentiellement préjudiciables. En prenant du recul, l'adaptation au climat semble révéler plus de résultats favorables que le bilan instantané des performances. La disparité intra-typologique des résultats en été nous porte à croire que des projets pertinents doivent pouvoir se dégager.

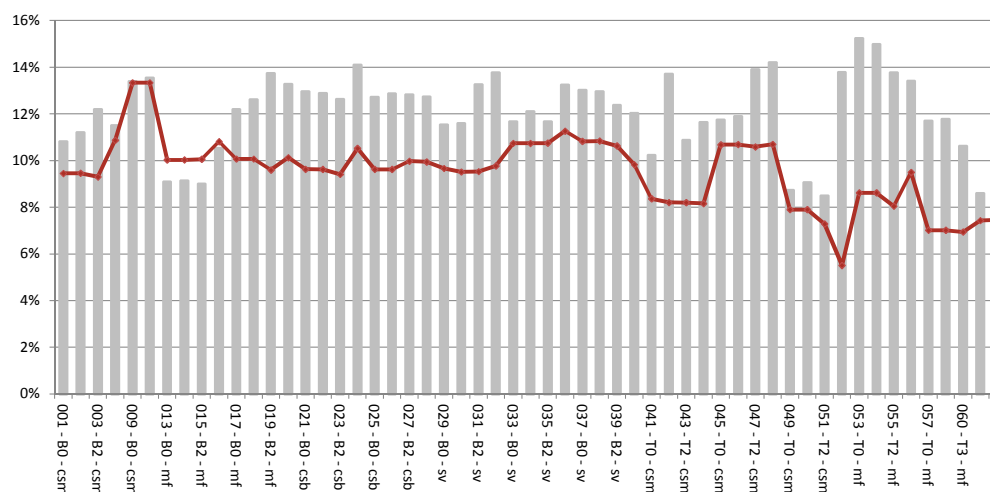
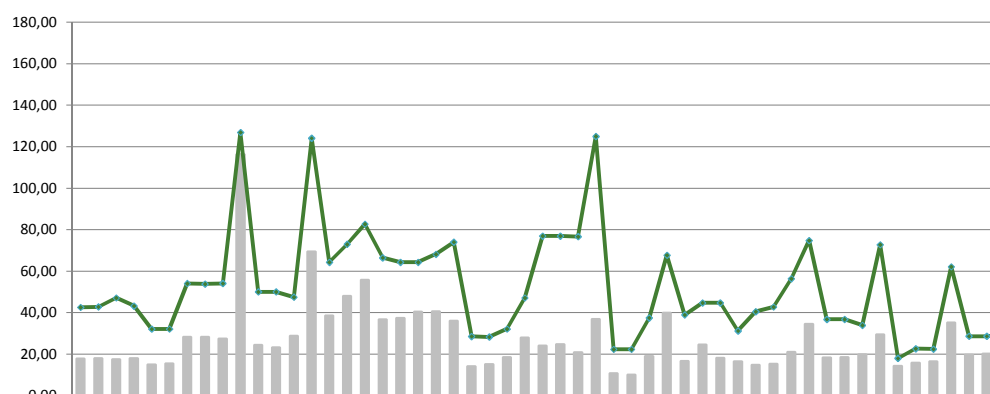
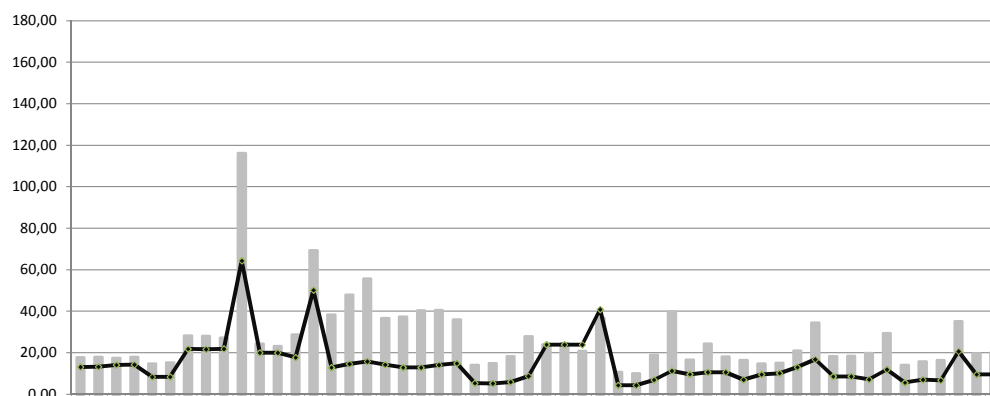
Somme toute, les barres, tours et pavillons possèdent des performances énergétiques très disparates qui évoluent très différemment sur le long terme. L'extrême variété des comportements énergétiques semble révélatrice de la disparité typo-morphologique, elle-même propre à l'habitat périurbain dominant sur la Dorsale Est.

La variabilité **des indicateurs morphologiques**, symptomatique de la diversité des logements, recèle un potentiel inestimable puisqu'ils ont tous une histoire à nous raconter sur l'identité formelle du bâtiment considéré. Les renseignements qu'ils apportent ne peuvent définir à eux seuls l'ensemble de la forme mais la complémentarité des indicateurs pallie leur faiblesse intrinsèque. En témoignent les nombreux indicateurs de compacité qui deviennent porteurs de sens lorsqu'on les considère ensemble.

---

11 11% d'augmentation des besoins pour la tour et respectivement 12% et 13% pour les barres et pavillons.

12 1% d'augmentation des besoins contre une diminution de 6% pour les logements collectifs.



R-06

#### R-06. Trois indicateurs morpho-énergétiques pertinents

Graphes issus du tableau Excel récapitulatif

Documents créés pour l'étude :

Réda Oussennan

Leur interdépendance dépend fortement de leur domaine d'application<sup>13</sup>, du sens physique sous-jacent<sup>14</sup> et des paramètres morphologiques de base qu'ils invoquent<sup>15</sup>. Par exemple, le coefficient de forme semble adapté aux comparaisons extra-typologiques mais dispose uniquement d'informations relatives à la géométrie pure du bâtiment sans considération des baies. L'indicateur de porosité volumique, conditionné par la proportion de vitrage, comble la lacune du coefficient de forme de bien belle manière. Par ailleurs, tous sont fondés sur un socle morphologique commun qui les lie inextricablement, d'où la redondance observable entre certains indicateurs. Un tri s'est donc imposé et a abouti à la sélection de dix indicateurs aux propriétés variés. Ces dix lauréats ont été mis en relation avec les résultats de performance énergétique afin de dévoiler leur incroyable potentiel de description morpho-énergétique.

### **La corrélation entre indicateurs morphologiques et résultats de performance énergétique**

représente la substantifique moelle de cette étude. Les résultats obtenus sont très probants puisque certains indicateurs suivent fidèlement les lois qui régissent le comportement énergétique des bâtiments. Plusieurs conclusions très éloquentes ont émergé du test des dix indicateurs. Deux grands enjeux se sont dégagés au cours même de l'investigation : approcher au mieux les variations de besoins instantanément obtenus après intervention architecturale et définir la capacité d'adaptation d'un bâtiment au phénomène du changement climatique grâce aux indicateurs. Le comportement énergétique en 2013 et 2050 se corrèle avec deux indicateurs de forme :

- la Porosité volumique<sup>16</sup> ;
- la Morphologie globale<sup>17</sup>.

Quant à l'augmentation relative des besoins sur les quarante prochaines années, elle est étroitement liée au Coefficient de forme<sup>18</sup>. La conclusion majeure qu'on peut tirer de ces résultats est que la performance énergétique du bâtiment dépend significativement de la proportion et répartition du vitrage sur l'enveloppe du bâtiment. En effet, la compacité ou le coefficient de forme, indicateurs sacrés de la littérature spécialisée, ne revêtent pas une grande pertinence pour les besoins de 2013 comparés aux indicateurs de porosité. Comme statué précédemment, les indicateurs morpho-énergétiques peuvent être pleinement exploités lorsqu'ils sont associés entre eux. Le prolongement légitime de cette investigation serait de pondérer cette complémentarité et de la corréler systématiquement aux résultats de performance énergétique. La fin ultime consisterait ainsi à trouver une combinaison qui soit la plus fidèle au comportement énergétique de n'importe quel bâtiment.

---

13 Domaine de validité extra ou intra-typologique.

14 Notion de taille, d'échange thermique et d'efficacité énergétique.

15 Surfaces déperditives, surfaces de baies, volume etc.

16 Indicateur défini par le rapport entre surface totale de baies et volume chauffé.

17 Indicateur dépendant de l'intégralité des paramètres morphologiques de base.

18 Indicateur exprimé par le rapport adimensionnel entre surfaces déperditives et volume.



R-07



R-08

**R-07. Comportement énergétique et morphologie**  
Schéma de principe  
*Salat, Serge, Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable, Paris, Hermann éditeurs, 2011.*

**R-08. Morphologie urbaine de Tolède**  
Carte mettant en valeur la porosité du tissu  
*Salat, Serge, Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable, Paris, Hermann éditeurs, 2011.*

D'autres recherches pourraient aider à compléter la démarche. Une étude à l'échelle urbaine des indicateurs morphologiques semble prolonger naturellement le sujet. Serge Salat<sup>19</sup> a déjà entamé l'évaluation des qualités urbaines. En extrapolant l'analyse à l'échelle urbaine, jouer avec ces indicateurs faciliterait ainsi la compréhension de l'interaction entre bâtiments et leur environnement. De plus, la Dorsale Est apparaît toujours comme un tissu très riche par sa variété typo-morphologique et pourrait faire l'objet d'études plus vastes.

Une autre piste serait celle amorcée par Laetitia Arantes<sup>20</sup> qui développe une recherche multicritère prenant en compte des paramètres de nature très diverse. Elle explicite les tenants de sa réflexion : « À l'échelle du bâtiment seul, une des limites identifiées est d'utiliser l'énergie comme seul indicateur de performance. L'outil simplifié développé pourrait être raffiné en y intégrant d'autres critères de performance, la difficulté étant de déterminer ces critères et d'en donner une évaluation simple et rapide, dans un souci d'appréciation de la performance globale des bâtiments. » L'appréciation des performances globales paraît plus complexe à mettre en œuvre mais apporte une certaine relativité au jeu des paramètres intervenant dans le bilan énergétique global des bâtiments.

---

19 Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.

20 Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.

# Annexes

## 1.1 Précautions d'emploi sur les indicateurs

### 1.1.1 Recommandations sur la recherche d'indicateurs

Les indicateurs ne doivent pas être considérés comme des règles mais des préconisations :  
ils donnent un ordre de grandeur à l'instar des pré-dimensionnements structurels  
Corrélation entre les indicateurs à identifier / relation forme-énergie à identifier

Vérifier les aberrations liées aux erreurs de modélisation, à la reconnaissance de la modélisation par archiwizard, au choix de certaines hypothèses (pour les maisons par exemple).

### 1.1.2 Classification des indicateurs

Classification des indicateurs par nature :  
Intensité, diversité, proximité, complexité, forme, connectivité, distribution (Serge Salat, Les villes et les formes, définition p. 488)  
Les indicateurs d'intensité, de distribution spatiale et surtout de forme seront priorisés.

#### • Classification des indicateurs par thème :

bioclimatique, urbain, morphologique, thermique, lumineux, énergétique  
La corrélation entre indicateurs nous incite à les étudier comme un ensemble d'indicateurs plutôt que comme une valeur absolue fallacieusement intrinsèque. En effet, tout indicateur est de nature extrinsèque et sa variation induit la modification d'autres paramètres. En ce sens, l'optimum est difficile à atteindre (surtout quand d'autres paramètres plus qualitatifs entrent en jeu comme la sensation architectural ou le confort ressenti). Ainsi, on parle plus d'équilibre que d'optimum.

### 1`1`3 Variabilité des indicateurs

- **L'importance du cadre spatial et temporel**

**Espace :** Les indicateurs sont calculés de la même façon quel que soit le lieu considéré. Cependant, leur interprétation diffère fortement car les exigences ne sont pas les mêmes.

> La définition de benchmark (étalonnage, seuil) en fonction du lieu considéré est une manière plus juste d'appréhender les indicateurs. Il faut notamment relever toutes les données climatiques du lieu étudié pour pouvoir tirer des conclusions pertinentes et particulières.

Ces interprétations seront généralisables à d'autres cas où les conditions s'apparentent au lieu considéré ; l'extrapolation des besoins en confort et énergie étant sensiblement similaires.

**Temps :** La pertinence des indicateurs peut aussi varier en fonction du temps :

- Sur des durées courtes,

on peut définir des situations été/hiver

- Sur des durées très longues,

on peut définir des scénarios climatiques extrêmes (GIEC etc)

- **L'importance de l'échelle d'observation de l'objet**

L'échelle associée à l'indicateur est tout aussi importante. Etudier un bâtiment ne peut être assimilé à l'étude d'un quartier et vice versa.

Les échelles :

- Territoire

- Ville

- Quartier

- Voisinage

- Ilot

- Bâtiment

- Lieu de vie

#### 1`1`4 Données climatiques préalables

- **Gisement solaire (ou irradiance ou rayonnement) : [ ]**

Donnée relative à l'intensité des échanges entre extérieur et intérieur et donc liée aux calculs des Apports solaires et déperditions thermiques.

- **Constante solaire  $I_0$  : [kW/m<sup>2</sup>]**

Cette constante est l'irradiance ou encore le flux d'énergie lumineuse issu du soleil. La variation de cette valeur est fonction de la distance terre-soleil provenant de l'excentricité de l'orbite de la terre.

- **Irradiation solaire extra terrestre IGO : [kWh/m<sup>2</sup>]**

C'est l'énergie lumineuse reçue du soleil à la surface de la terre sans atmosphère, durant une journée (ou un mois). Cette valeur est calculée en fonction de la constante solaire, de la latitude du lieu considéré et de la date choisie.

- **Irradiation Global Horizontal IGH : [kWh/m<sup>2</sup>]**

C'est l'énergie lumineuse réelle reçue du soleil à la surface de la terre, durant une journée (ou un mois) en tenant compte des phénomènes météorologiques. Cette valeur peut être mesurée ou estimée à partir de la fraction solaire

- **Indice de Clarté  $K_T$  : [adim]**

L'indice de clarté est le rapport entre l'Irradiation Global Horizontal (IGH) et Irradiation solaire extra terrestre (IGO). C'est l'équivalent de la fraction solaire mais en énergie plutôt qu'en heure d'ensoleillement.

- **Rapport IDH/IGH : [adim]**

Ce rapport est estimé à partir de l'indice de clarté  $K_T$  et permet de déterminer l'irradiation diffuse Horizontale, notée IDH, et l'irradiation Directe Horizontale, notée IBH, sachant que  $IGH = IDH + IBH$ , nécessaire pour calculer l'irradiation solaire suivant une inclinaison et une orientation déterminées.

- **Durée d'ensoleillement : [heure]**

% d'ensoleillement x nombre d'heure de jour

Durée pendant laquelle une surface élémentaire reçoit directement les rayons du soleil.

- **Fraction Solaire : [%]**

Rapport entre la durée d'ensoleillement et la durée du jour. La durée d'ensoleillement est mesurée par un héliographe avec un seuil de 120 watts par mètre carré sur l'intensité du rayonnement lumineux.



- **Insolation : [heure]**

La durée d'insolation désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe est soumis au rayonnement solaire direct, c'est à dire par la présence d'ombres portées nettement dessinées. On considère alors que la production de telles ombres est possible lorsque l'éclairement par le Soleil a une valeur au moins égale à 120 watts par mètre carré, ce qui permet de déterminer à chaque instant s'il y a ou non insolation.

- **Durée moyenne d'ensoleillement : [heure]**

Sur un site donné ou sur une façade donnée, on peut calculer la durée moyenne d'ensoleillement. Elle permet d'évaluer le potentiel d'ensoleillement d'un objet plus global

$D$  = moyenne des durées d'ensoleillement de chaque surface élémentaire pondérées par les surfaces élémentaires

### **1`1`5 Indicateurs urbains ?**

Identifier les vides : Doit-on les occuper ? Comment les occuper ?

Quel impact sur l'environnement direct ?

Identifier des indicateurs de type urbain

### **1`1`6 Sources bibliographiques**

Météo ciel, Météo France, Windfinder, Calsol gisement solaire et données climatiques

Indicateurs de l'Agence d'Ecologie Urbaine de Barcelone

Indicateurs de Canada Mortgage and Housing Corporation,

Indicateurs de l'University of British Columbia

## 1.2 Hypothèses d'analyse originales

### 1.2.1 Hypothèses géographiques et temporelles

- **Géographie**

Région parisienne

Latitude : 48°48' N

Longitude : 2°19' E

Altitude Station : 75m

Fuseau horaire : GMT +1

- **Scénarios climatiques**

Base de données météorologiques

Les fichiers météorologiques ont été obtenus à partir du logiciel Météonorm© :

Logiciel édité par la société Meteotest

Version : 7

Les bases de données exploitées :

GEBA - Global Energy Balance Archive

WMO - World Meteorological Organization

Swiss database - Meteoswiss

Les données couvrent les périodes climatologiques de 1961-1990 et 2000-2009 pour les paramètres :

Température, humidité, vitesse du vent et précipitation.

Elles couvrent les périodes climatologiques 1981-1990 et 1986-2005 pour les paramètres suivants :

Irradiation solaire, durée d'ensoleillement

Station météorologique : Paris-Montsouris

- **Scénarios climatiques 2012 et 2050 A2 (prospectives du GIEC)**

Les scénarios climatiques 2012 et 2050 sont inspirés des observations et des rapports prospectivistes établies par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ( GIEC )

Le GIEC a dressé plusieurs rapports disponibles sur leur site internet [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_other.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_other.shtml)

1990 - Premier rapport d'évaluation :

1995 - Deuxième rapport d'évaluation : «Changements climatiques 1995»

2001 - Troisième rapport d'évaluation : «Bilan 2001 des changements climatiques»

2007 - Quatrième rapport d'évaluation : «Changements climatiques 2007»

Les scénarios climatiques sont classés en quatre familles selon les hypothèses :

Scénario A1 - Croissance économique rapide (monde homogène)

Scénario A2 - Développement économique avec une orientation régionale (monde hétérogène)

Scénario B1 - Durabilité environnementale globale (monde homogène)

Scénario B2 - Durabilité environnementale locale (monde hétérogène)

La base de données établies par le GIEC est disponible sur le site du Data Distribution Centre :

[www.ipcc-data.org](http://www.ipcc-data.org)

## **1`2`2 Outil de modélisation : Sketchup**

Logiciel édité par la société Google

Version : 8.0.3

Date : 25 / 10 / 2013

L'outil de modélisation 3D, à savoir Sketchup, est compatible avec le logiciel de simulation thermique Archiwizard. Ce logiciel permet de construire des modèles 3D rapidement selon une charte graphique adaptée à Archiwizard, id est seuls l'enveloppe, les planchers et les baies (surface vitrée et menuiseries incluses) sont représentés. La composition matérielle des parois et des baies, ainsi que les conditions climatiques, seront définies sur le logiciel de simulation thermique. Conformément à la méthode du lancer de rayon, la détection des « pièces » par le logiciel Archiwizard exige impérativement de clore l'ensemble des volumes chauffés sous peine de ne pas être pris en compte lors des calculs.

Les projets ont été modélisés à partir des données récupérées auprès des étudiants de 4ème année du Master « Matières à penser » (Deuxième semestre 2012-2013).

Chaque modélisation est contextualisée : les abords du projet sont présents afin que l'impact de l'environnement bâti du projet soit pris en compte au cours des analyses thermiques. L'importation des fichiers est effectuée en deux étapes : tout d'abord, le bâtiment étudié (001 - B0 - csm - Typologie par exemple) et ensuite ses abords (001 - B0 - csm - Abords). L'orientation et l'état existant des projets sont conformes à la réalité.

- Abords : Default
- Parois opaques : Default
- Vitrage : Translucent\_Glass\_Gray
- Menuiserie : Default
- Pas de menuiseries : 8 cm en existant et 5 cm en scénario d'intervention

### 1`2`3 Outil d'étude : Archiwizard©

Date : 12 / 09 / 2013

Version : 2.7.1 (version certifiée : 2.5.3)

Version du moteur de calcul du CSTB : 1.1.6.3 ( Version certifiée du moteur de calcul Th-BCE : 1.1.5.1)

Logiciel édité par la société RayCREATIS, groupe HPS-CA

Logiciel certifié conforme aux calculs du Cep, Cep\_max, Bbio, Bbio\_max, Tic, Ticref, de la RT 2012

### 1`2`4 Usage et Date de construction

Ce paramétrage arbitraire sera effectué sur le logiciel Archiwizard dans un souci d'uniformisation des hypothèses. Une configuration uniforme facilite la comparaison des résultats :

On considère comme usage du bâtiment : **Logement collectif**

On considère comme date de construction : **Neuf 2012**

En effet, tous les projets sont étudiés comme étant réhabilités préalablement. Les éléments constitutifs de l'enveloppe (parois et baies) possèdent ainsi des caractéristiques alignées sur les standards de 2012.

Nota Bene : L'échelle = 1

Nota Bene : Dans un souci de comparaison, tous les projets seront importés selon cette configuration.

Par ailleurs, le nombre maximal d'occupants par logement est de : 3

En scénario chaud, la consigne de température moyenne est de : 16 °C

En scénario froid, la consigne de température moyenne est de : 30 °C

La température de confort est estimé à : 26 °C

Les hypothèses relatives aux éléments constitutifs de l'enveloppe qui vont suivre ne sont pas les hypothèses définitives. Les hypothèses seront affinées au cours de l'analyse critique des résultats afin de minimiser les aberrations liées au traitement des modélisations 3D par Archiwizard (calcul particulier pour les projets de serre etc).

## 1`2`5 Hypothèses sur les éléments constitutifs

- **Logement collectif**

### **Configurateur des parois**

#### a) Murs déperditifs

Composition : Mur bois ITE

Epaisseur : 37 cm

Résistance :  $4,42 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

U :  $0,226 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Composition des strates :

Extérieur

Enduit ciment > 1,00 cm >  $0,950 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Polystyrène expansé > 15,00 cm >  $0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Béton armé > 20,00 cm >  $2,300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm >  $0,325 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Intérieur

#### b) Murs intérieurs

Composition : Cloison bois

Epaisseur : 7 cm

Résistance :  $0,22 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

U :  $4,636 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Composition des strates :

Extérieur

Enduit plâtre > 1,00 cm >  $0,560 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Structure bois non isolée > 5,00 cm >  $0,278 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Enduit plâtre > 1,00 cm >  $0,560 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Intérieur

#### c) Planchers bas élevés

Composition : Pl béton IT inf

Epaisseur : 35 cm

Résistance :  $4,79 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

U :  $0,209 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Composition des strates :

Dessus

Chape traditionnelle > 5,00 cm >  $1,200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Béton > 15,00 cm > 2,299 W/(m.K)  
Polystyrène extrudé > 15,00 cm > 0,032 W/(m.K)  
Dessous

d) Planchers intermédiaires

Composition : Pl hourdis isolants  
Epaisseur : 24 cm  
Résistance : 2,37 m<sup>2</sup>.K/W  
U : 0,422 W/(m<sup>2</sup>.K)

Composition des strates :  
Chape traditionnelle > 5,00 cm > 1,200 W/(m.K)  
Dalle 19 cm hourdis isolants à languette > 19,00 cm > 0,082 W/(m.K)

e) Toitures déperditives

Composition : Toit charpente bois, CT 200 + LDV 60 mm Ext  
Epaisseur : 31 cm  
Résistance : 4,84 m<sup>2</sup>.K/W  
U : 0,207 W/(m<sup>2</sup>.K)

Composition des strates :  
Dessus  
Complément isolation laine de verre Fermette > 6,00 cm > 0,055 W/(m.K)  
Charpente traditionnelle 200 mm de LDV - CT 200 > 24,00 cm > 0,065 W/(m.K)  
Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm > 0,325 W/(m.K)  
Dessous

f) Toitures terrasses

Composition : Toit terrasse béton ITE  
Epaisseur : 36 cm  
Résistance : 4,41 m<sup>2</sup>.K/W  
U : 0,227 W/(m<sup>2</sup>.K)

Composition des strates :  
Dessus  
Polystyrène extrudé > 15,00 cm > 0,035 W/(m.K)  
Béton armé > 20,00 cm > 2,300 W/(m.K)  
Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm > 0,325 W/(m.K)  
Dessous

## 1`2`6 Configurateur des baies

### a) Configuration

Composition : Logements neuf 2012

Vitrage : Double vitrage isolation élevée (Argon)

- Transmission lumineuse : 80%
- Réflexion lumineuse : 12%
- Transmission solaire : 53%
- Réflexion solaire : 24%
- Facteur solaire : 58%
- Ug : 1,10 W/(m<sup>2</sup>.K)

Opaque : Sandwich isolant en PVC

- Réflexion lumineuse : 70%
- Réflexion solaire : 70%
- Up : 0,60 W/(m<sup>2</sup>.K)

Protection : Volet roulant PVC 20mm avec coffre

- Surface : 0,30 m<sup>2</sup>
- Réflexion solaire : 50%
- Transmission thermique Uc : 1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)

Cadre : Cadre en PVC très performant

- Matériau : PVC
- Transmission thermique Uf : 1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Réflexion lumineuse : 50%
- Réflexion solaire : 60%
- Psi Cadre / Vitrage : 0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Psi Cadre / Opaque : 0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Mode de pose : Tunnel

### b) Physique (fonction de la fenêtre considérée)

Transmission thermique

Sans fermeture Uw : entre 1,30 et 1,40 W/(m<sup>2</sup>.K)

Avec fermeture Ujn : entre 1,10 et 1,30 W/(m<sup>2</sup>.K)

Facteur solaire

Sans protection Swsp : entre 40 et 50%

Avec protection Swap : entre 40 et 50%

Transmission lumineuse

Sans protection Tsp : entre 50 et 60%

Avec protection Tap : entre 50 et 60%

Taux moyen annuel d'occultation : entre 0 et 10%

## 1.3 Hypothèses d'analyse corrigées

### 1.3.1 Indications préalables

Les projets pourvus d'un espace tampon (loggia, serre, etc) ont été traités différemment suite à des aberrations observées lors des calculs de performance énergétique (besoins en chaud, besoins en froid). En effet, le logiciel Archiwizard considère ce type d'espace comme une pièce autonome et chauffée si aucune précision n'est apportée lors de l'analyse thermique du projet. De ce fait, le grand pourcentage de surface vitrée, caractéristique de ces espaces tampons, entraîne une augmentation exponentielle des besoins en froid et une altération, certes moindre mais non négligeable, des besoins en chaud. Ce phénomène est dû à la non considération par défaut de stores sur le logiciel Archiwizard. Les apports solaires ne sont donc pas régulés par des protections solaires adéquates et, a fortiori, les besoins en froid explosent en période estivale. Nonobstant leur aberrance, ces résultats nous avertissent tout de même d'un éventuel risque de surchauffe.

Les hypothèses de base quant à la constitution des parois et des baies ne suffisaient donc plus à la définition de ce genre de projet assez particulier. Un paramétrage correctif a donc été élaboré pour palier ces aberrations. Il a tout de même été appliqué sur l'ensemble des projets toujours conformément au souci d'uniformisation des résultats à comparer.

Les analyses thermiques ont été reproduites avec et sans considération des besoins propres à l'espace tampon afin de comparer l'impact de celui-ci. De plus, le volume de cet espace n'est désormais plus considéré dans le calcul des performances énergétiques de manière à pouvoir confronter les résultats avec ceux obtenus dans le cas de l'état existant du bâtiment étudié.

Ainsi, deux modifications d'hypothèses ont été effectuées en cours d'analyse thermique (via la configuration de paramètres sur Archiwizard) et répercutées sur l'ensemble du corpus d'étude :

- changement de protections solaires
- création et configuration d'un espace tampon



## 1` 3` 2 Modification des hypothèses

- **Configurateur des baies**

a) Configuration

Composition : Logements neuf 2012

Vitrage : Double vitrage isolation élevée (Argon)

- Transmission lumineuse : 80%
- Réflexion lumineuse : 12%
- Transmission solaire : 53%
- Réflexion solaire : 24%
- Facteur solaire : 58%
- Ug : 1,10 W/(m<sup>2</sup>.K)

Opaque : Sandwich isolant en PVC

- Réflexion lumineuse : 70%
- Réflexion solaire : 70%
- Up : 0,60 W/(m<sup>2</sup>.K)

Protection : Volet roulant aluminium avec coffre

- Surface : 0,20 m<sup>2</sup>
- Réflexion solaire : 60%
- Transmission thermique Uc : 2,50 W/(m<sup>2</sup>.K)

Activation du Store :

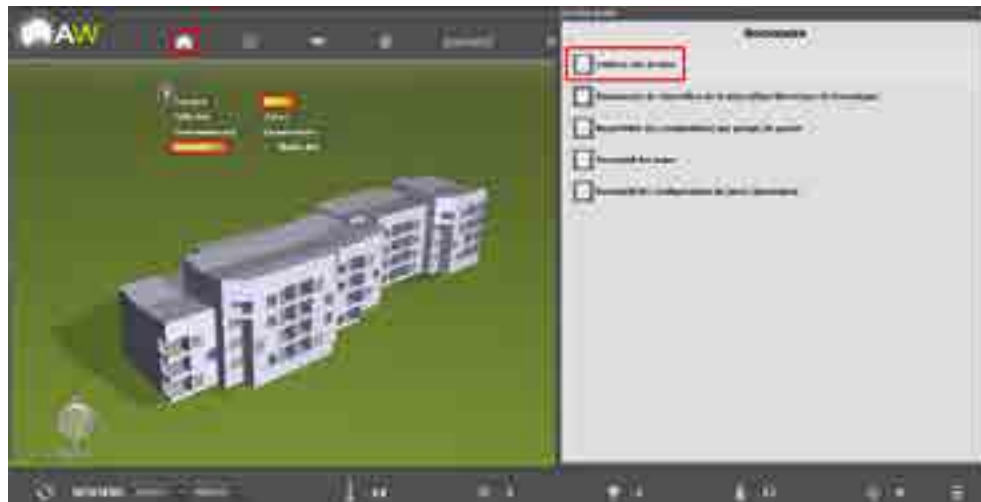
- Position : Extérieur
- Distance : 3,00 cm
- Transmission lumineuse : 0%
- Réflexion lumineuse : 40%
- Transmission solaire : 0%
- Réflexion solaire : 40%
- Emissivité thermique : 80%

- **Création d'une zone tampon**

Dans le but de différencier la zone tampon du reste du bâtiment, il est nécessaire de créer une « zone » sur le logiciel Archiwizard ( « bâtiment » > « zone » > «+» ). Ensuite, il suffit de sélectionner les « pièces » concernées et de les associer à la nouvelle zone. Les données et résultats propres à l'espace tampon pourront ainsi être extraits du calcul global.

#### 14 Provenance des informations extraites sur Archiwizard

### 1`4`1 Informations morphologiques de base



## 1'4'2 Besoins en chaud et en froid



### 1'4'3 Orientation des baies



### 1'4'4 Tableau des données extraites

| Surface et volume | Orientation des baies | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   | 41   | 42   | 43   | 44   | 45   | 46   | 47   | 48   | 49   | 50   | 51   | 52   | 53   | 54   | 55   | 56   | 57   | 58   | 59   | 60   | 61   | 62   | 63   | 64   | 65   | 66   | 67   | 68   | 69   | 70   | 71   | 72   | 73   | 74   | 75   | 76   | 77   | 78   | 79   | 80   | 81   | 82   | 83   | 84   | 85   | 86   | 87   | 88   | 89   | 90   | 91   | 92   | 93   | 94   | 95   | 96   | 97   | 98   | 99   | 100   |
|-------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Surface           | Orientation des baies | 1.2 | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.1 | 6.1 | 7.1 | 8.1 | 9.1 | 10.1 | 11.1 | 12.1 | 13.1 | 14.1 | 15.1 | 16.1 | 17.1 | 18.1 | 19.1 | 20.1 | 21.1 | 22.1 | 23.1 | 24.1 | 25.1 | 26.1 | 27.1 | 28.1 | 29.1 | 30.1 | 31.1 | 32.1 | 33.1 | 34.1 | 35.1 | 36.1 | 37.1 | 38.1 | 39.1 | 40.1 | 41.1 | 42.1 | 43.1 | 44.1 | 45.1 | 46.1 | 47.1 | 48.1 | 49.1 | 50.1 | 51.1 | 52.1 | 53.1 | 54.1 | 55.1 | 56.1 | 57.1 | 58.1 | 59.1 | 60.1 | 61.1 | 62.1 | 63.1 | 64.1 | 65.1 | 66.1 | 67.1 | 68.1 | 69.1 | 70.1 | 71.1 | 72.1 | 73.1 | 74.1 | 75.1 | 76.1 | 77.1 | 78.1 | 79.1 | 80.1 | 81.1 | 82.1 | 83.1 | 84.1 | 85.1 | 86.1 | 87.1 | 88.1 | 89.1 | 90.1 | 91.1 | 92.1 | 93.1 | 94.1 | 95.1 | 96.1 | 97.1 | 98.1 | 99.1 | 100.1 |
| Volume            | Orientation des baies | 1.2 | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.1 | 6.1 | 7.1 | 8.1 | 9.1 | 10.1 | 11.1 | 12.1 | 13.1 | 14.1 | 15.1 | 16.1 | 17.1 | 18.1 | 19.1 | 20.1 | 21.1 | 22.1 | 23.1 | 24.1 | 25.1 | 26.1 | 27.1 | 28.1 | 29.1 | 30.1 | 31.1 | 32.1 | 33.1 | 34.1 | 35.1 | 36.1 | 37.1 | 38.1 | 39.1 | 40.1 | 41.1 | 42.1 | 43.1 | 44.1 | 45.1 | 46.1 | 47.1 | 48.1 | 49.1 | 50.1 | 51.1 | 52.1 | 53.1 | 54.1 | 55.1 | 56.1 | 57.1 | 58.1 | 59.1 | 60.1 | 61.1 | 62.1 | 63.1 | 64.1 | 65.1 | 66.1 | 67.1 | 68.1 | 69.1 | 70.1 | 71.1 | 72.1 | 73.1 | 74.1 | 75.1 | 76.1 | 77.1 | 78.1 | 79.1 | 80.1 | 81.1 | 82.1 | 83.1 | 84.1 | 85.1 | 86.1 | 87.1 | 88.1 | 89.1 | 90.1 | 91.1 | 92.1 | 93.1 | 94.1 | 95.1 | 96.1 | 97.1 | 98.1 | 99.1 | 100.1 |
| Surface           | Orientation des baies | 1.2 | 2.1 | 3.1 | 4.1 | 5.1 | 6.1 | 7.1 | 8.1 | 9.1 | 10.1 | 11.1 | 12.1 | 13.1 | 14.1 | 15.1 | 16.1 | 17.1 | 18.1 | 19.1 | 20.1 | 21.1 | 22.1 | 23.1 | 24.1 | 25.1 | 26.1 | 27.1 | 28.1 | 29.1 | 30.1 | 31.1 | 32.1 | 33.1 | 34.1 | 35.1 | 36.1 | 37.1 | 38.1 | 39.1 | 40.1 | 41.1 | 42.1 | 43.1 | 44.1 | 45.1 | 46.1 | 47.1 | 48.1 | 49.1 | 50.1 | 51.1 | 52.1 | 53.1 | 54.1 | 55.1 | 56.1 | 57.1 | 58.1 | 59.1 | 60.1 | 61.1 | 62.1 | 63.1 | 64.1 | 65.1 | 66.1 | 67.1 | 68.1 | 69.1 | 70.1 | 71.1 | 72.1 | 73.1 | 74.1 | 75.1 | 76.1 | 77.1 | 78.1 | 79.1 | 80.1 | 81.1 | 82.1 | 83.1 | 84.1 | 85.1 | 86.1 | 87.1 | 88.1 | 89.1 | 90.1 | 91.1 | 92.1 | 93.1 | 94.1 | 95.1 | 96.1 | 97.1 | 98.1 | 99.1 | 100.1 |

- 1 - Informations générales
- 2 - Orientation des baies
- 3 - Besoins en 2013
- 4 - Besoins en 2050

## 1.5 Catalogue de projets

Ce catalogue a été conçu conjointement avec un des membres de l'équipe du programme de recherche *Ignis Mutat Res* : Guillaume Menier.

|       |                | Groupe    | Typologie | Site             | Zone tampon |
|-------|----------------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| Barre | 001 - B0 - csm | Groupe 1  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|       | 002 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|       | 003 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|       | 004 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|       | 005 - B0 - csm | Groupe 2  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|       | 006 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|       | 007 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|       | 008 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|       | 009 - B0 - csm | Groupe 3  | Barre     | Champs sur Marne |             |
|       | 010 - B1 - csm |           |           |                  |             |
|       | 011 - B2 - csm |           |           |                  |             |
|       | 012 - B3 - csm |           |           |                  |             |
|       | 013 - B0 - mf  | Groupe 4  | Barre     | Montfermeil      |             |
|       | 014 - B1 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 015 - B2 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 016 - B3 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 017 - B0 - mf  | Groupe 5  | Barre     | Montfermeil      |             |
|       | 018 - B1 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 019 - B2 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 020 - B3 - mf  |           |           |                  |             |
|       | 021 - B0 - csb | Groupe 6  | Barre     | Clichy sous Bois |             |
|       | 022 - B1 - csb |           |           |                  |             |
|       | 023 - B2 - csb |           |           |                  |             |
|       | 024 - B3 - csb |           |           |                  |             |
|       | 025 - B0 - csb | Groupe 7  | Barre     | Clichy sous Bois |             |
|       | 026 - B1 - csb |           |           |                  |             |
|       | 027 - B2 - csb |           |           |                  |             |
|       | 028 - B3 - csb |           |           |                  |             |
|       | 029 - B0 - sv  | Groupe 8  | Barre     | Sevran           |             |
|       | 030 - B1 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 031 - B2 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 032 - B3 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 033 - B0 - sv  | Groupe 9  | Barre     | Sevran           |             |
|       | 034 - B1 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 035 - B2 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 036 - B3 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 037 - B0 - sv  | Groupe 10 | Barre     | Sevran           |             |
|       | 038 - B1 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 039 - B2 - sv  |           |           |                  |             |
|       | 040 - B3 - sv  |           |           |                  |             |

|      |                |           |      |                  |  |
|------|----------------|-----------|------|------------------|--|
| Tour | 041 - T0 - csm | Groupe 1  | Tour | Champs sur Marne |  |
|      | 042 - T1 - csm |           |      |                  |  |
|      | 043 - T2 - csm |           |      |                  |  |
|      | 044 - T3 - csm |           |      |                  |  |
|      | 045 - T0 - csm | Groupe 2  | Tour | Champs sur Marne |  |
|      | 046 - T1 - csm |           |      |                  |  |
|      | 047 - T2 - csm |           |      |                  |  |
|      | 048 - T3 - csm |           |      |                  |  |
|      | 049 - T0 - csm | Groupe 3  | Tour | Champs sur Marne |  |
|      | 050 - T1 - csm |           |      |                  |  |
|      | 051 - T2 - csm |           |      |                  |  |
|      | 052 - T3 - csm |           |      |                  |  |
|      | 053 - T0 - mf  | Groupe 4  | Tour | Montfermeil      |  |
|      | 054 - T1 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 055 - T2 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 056 - T3 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 057 - T0 - mf  | Groupe 5  | Tour | Montfermeil      |  |
|      | 058 - T1 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 059 - T2 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 060 - T3 - mf  |           |      |                  |  |
|      | 061 - T0 - csb | Groupe 6  | Tour | Clichy sous Bois |  |
|      | 062 - T1 - csb |           |      |                  |  |
|      | 063 - T2 - csb |           |      |                  |  |
|      | 064 - T3 - csb |           |      |                  |  |
|      | 065 - T0 - csb | Groupe 7  | Tour | Clichy sous Bois |  |
|      | 066 - T1 - csb |           |      |                  |  |
|      | 067 - T2 - csb |           |      |                  |  |
|      | 068 - T3 - csb |           |      |                  |  |
|      | 069 - T0 - sv  | Groupe 8  | Tour | Sevran           |  |
|      | 070 - T1 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 071 - T2 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 072 - T3 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 073 - T0 - sv  | Groupe 9  | Tour | Sevran           |  |
|      | 074 - T1 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 075 - T2 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 076 - T3 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 077 - T0 - sv  | Groupe 10 | Tour | Sevran           |  |
|      | 078 - T1 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 079 - T2 - sv  |           |      |                  |  |
|      | 080 - T3 - sv  |           |      |                  |  |

|          |                |           |          |                  |  |
|----------|----------------|-----------|----------|------------------|--|
| Pavillon | 081 - P0 - csm | Groupe 1  | Pavillon | Champs sur Marne |  |
|          | 082 - P1 - csm |           |          |                  |  |
|          | 083 - P2 - csm |           |          |                  |  |
|          | 084 - P3 - csm |           |          |                  |  |
|          | 085 - P0 - csm | Groupe 2  | Pavillon | Champs sur Marne |  |
|          | 086 - P1 - csm |           |          |                  |  |
|          | 087 - P2 - csm |           |          |                  |  |
|          | 088 - P3 - csm |           |          |                  |  |
|          | 089 - P0 - csm | Groupe 3  | Pavillon | Champs sur Marne |  |
|          | 090 - P1 - csm |           |          |                  |  |
|          | 091 - P2 - csm |           |          |                  |  |
|          | 092 - P3 - csm |           |          |                  |  |
|          | 093 - P0 - mf  | Groupe 4  | Pavillon | Montfermeil      |  |
|          | 094 - P1 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 095 - P2 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 096 - P3 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 097 - P0 - mf  | Groupe 5  | Pavillon | Montfermeil      |  |
|          | 098 - P1 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 099 - P2 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 100 - P3 - mf  |           |          |                  |  |
|          | 101 - P0 - csb | Groupe 6  | Pavillon | Clichy sous Bois |  |
|          | 102 - P1 - csb |           |          |                  |  |
|          | 103 - P2 - csb |           |          |                  |  |
|          | 104 - P3 - csb |           |          |                  |  |
|          | 105 - P0 - csb | Groupe 7  | Pavillon | Clichy sous Bois |  |
|          | 106 - P1 - csb |           |          |                  |  |
|          | 107 - P2 - csb |           |          |                  |  |
|          | 108 - P3 - csb |           |          |                  |  |
|          | 109 - P0 - sv  | Groupe 8  | Pavillon | Sevran           |  |
|          | 110 - P1 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 111 - P2 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 112 - P3 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 113 - P0 - sv  | Groupe 9  | Pavillon | Sevran           |  |
|          | 114 - P1 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 115 - P2 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 116 - P3 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 117 - P0 - sv  | Groupe 10 | Pavillon | Sevran           |  |
|          | 118 - P1 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 119 - P2 - sv  |           |          |                  |  |
|          | 120 - P3 - sv  |           |          |                  |  |

---

## **Hypothèses des analyses sous Archiwizard**



# 0` Hypothèses géographiques et temporelles

## 0` 1) Géographie

### 0` 1` 1) Région parisienne

Latitude : 48°48' N

Longitude : 2°19' E

Altitude Station : 75m

Fuseau horaire : GMT +1

## 0` 2) Scénarios climatiques

### 0` 2` 1) Base de données météorologiques

Les fichiers météorologiques ont été obtenus à partir du logiciel **Météonorm**® :

Logiciel édité par la société **Meteotest**

**Version : 7**

**Station météorologique** : Paris-Montsouris



### 0` 2` 2) Scénarios climatiques 2012 et 2050 A2 (prospectives du GIEC)

2007 - Quatrième rapport d'évaluation : "*Changements climatiques 2007*"

Scénario A2 - Développement économique avec une orientation régionale (monde hétérogène)

## 0` 3) Outils d'étude : Archiwizard®

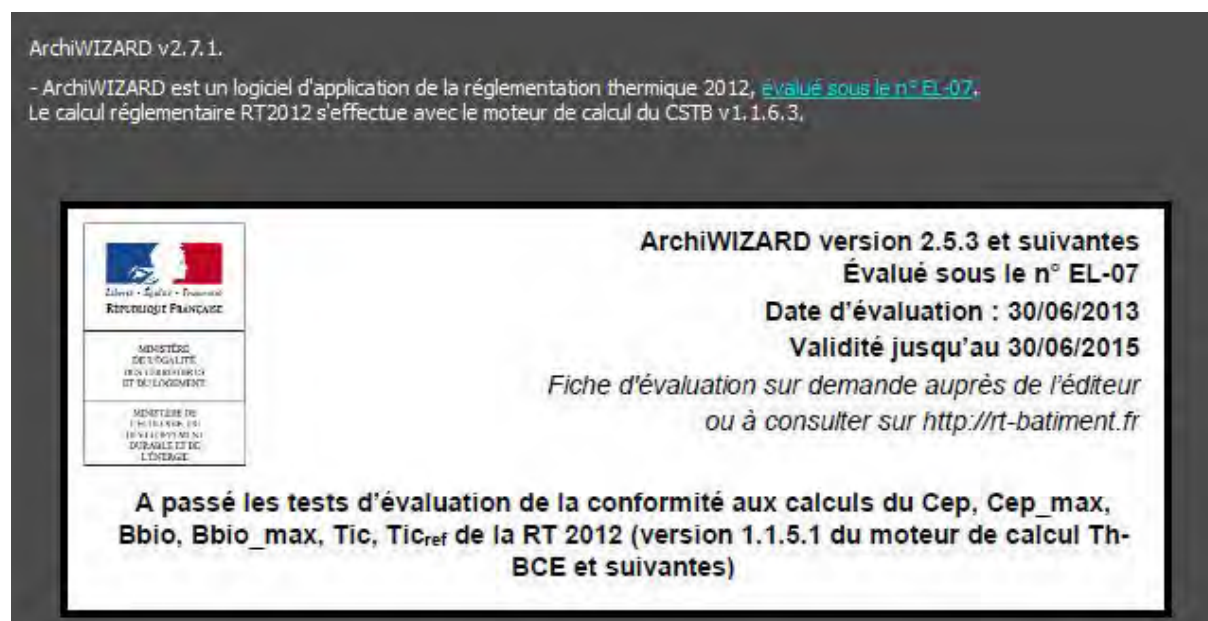
**Date : 12 / 09 / 2013**

**Version : 2.7.1** (version certifiée : 2.5.3)

**Version du moteur de calcul du CSTB : 1.1.6.3** ( Version certifiée du moteur de calcul Th-BCE : 1.1.5.1)

Logiciel édité par la société **RayCREATIS**, groupe **HPS-CA**

Logiciel certifié conforme aux calculs du Cep, Cep\_max, Bbio, Bbio\_max, Tic, Tic\_ref, de la RT 2012



## 0` 4) Usage et Date de construction

On considère comme **usage du bâtiment** : Logement collectif

On considère comme **date de construction** : Neuf 2012

**L'échelle = 1**

Par ailleurs, le **nombre maximal d'occupants par logement** est de : 3

En scénario **chaud**, la **consigne de température moyenne** est de : 16 °C

En scénario **froid**, la **consigne de température moyenne** est de : 30 °C

**La température de confort** est estimé à : 26 °C

# 1` Hypothèses sur les éléments constitutifs

## 1` 2) Logement collectif

### 1` 2` 1) Configurateur des parois

#### a) Murs déperditifs

*Composition* : Mur bois ITE

*Epaisseur* : 37 cm

*Résistance* : 4,42 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 0,226 W/(m<sup>2</sup>.K)

#### Composition des strates :

##### Extérieur

Enduit ciment > 1,00 cm > 0,950 W/(m.K)

Polystyrène expansé > 15,00 cm > 0,035 W/(m.K)

Béton armé > 20,00 cm > 2,300 W/(m.K)

Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm > 0,325 W/(m.K)

##### Intérieur

#### b) Murs intérieurs

*Composition* : Cloison bois

*Epaisseur* : 7 cm

*Résistance* : 0,22 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 4,636 W/(m<sup>2</sup>.K)

#### Composition des strates :

##### Extérieur

Enduit plâtre > 1,00 cm > 0,560 W/(m.K)

Structure bois non isolée > 5,00 cm > 0,278 W/(m.K)

Enduit plâtre > 1,00 cm > 0,560 W/(m.K)

##### Intérieur

#### c) Planchers bas élevés

*Composition* : Pl béton IT inf

*Epaisseur* : 35 cm

*Résistance* : 4,79 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 0,209 W/(m<sup>2</sup>.K)

#### Composition des strates :

##### Dessus

Chape traditionnelle > 5,00 cm > 1,200 W/(m.K)

Béton > 15,00 cm > 2,299 W/(m.K)

Polystyrène extrudé > 15,00 cm > 0,032 W/(m.K)

##### Dessous

#### **d) Planchers intermédiaires**

*Composition* : Pl hourdis isolants

*Epaisseur* : 24 cm

*Résistance* : 2,37 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 0,422 W/(m<sup>2</sup>.K)

##### **Composition des strates :**

Chape traditionnelle > 5,00 cm > 1,200 W/(m.K)

Dalle 19 cm hourdis isolants à languette > 19,00 cm > 0,082 W/(m.K)

#### **e) Toitures déperditives**

*Composition* : Toit charpente bois, CT 200 + LDV 60 mm Ext

*Epaisseur* : 31 cm

*Résistance* : 4,84 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 0,207 W/(m<sup>2</sup>.K)

##### **Composition des strates :**

###### **Dessus**

Complément isolation laine de verre Fermette > 6,00 cm > 0,055 W/(m.K)

Charpente traditionnelle 200 mm de LDV - CT 200 > 24,00 cm > 0,065 W/(m.K)

Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm > 0,325 W/(m.K)

###### **Dessous**

#### **f) Toitures terrasses**

*Composition* : Toit terrasse béton ITE

*Epaisseur* : 36 cm

*Résistance* : 4,41 m<sup>2</sup>.K/W

*U* : 0,227 W/(m<sup>2</sup>.K)

##### **Composition des strates :**

###### **Dessus**

Polystyrène extrudé > 15,00 cm > 0,035 W/(m.K)

Béton armé > 20,00 cm > 2,300 W/(m.K)

Panneau placoplâtre BA 13 > 1,30 cm > 0,325 W/(m.K)

###### **Dessous**

### **1` 2` 2) Configurateur des baies**

#### **a) Configuration**

*Composition* : Logements neuf 2012

*Vitrage* : Double vitrage isolation élevée (Argon)

- Transmission lumineuse : 80%

- Réflexion lumineuse : 12%

- Transmission solaire : 53%
- Réflexion solaire : 24%
- Facteur solaire : 58%
- Ug : 1,10 W/(m<sup>2</sup>.K)

*Opaque* : Sandwich isolant en PVC

- Réflexion lumineuse : 70%
- Réflexion solaire : 70%
- Up : 0,60 W/(m<sup>2</sup>.K)

*Protection* : Volet roulant PVC 20mm avec coffre

- Surface : 0,30 m<sup>2</sup>
- Réflexion solaire : 50%
- Transmission thermique Uc : 1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)

*Cadre* : Cadre en PVC très performant

- Matériau : PVC
- Transmission thermique Uf : 1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Réflexion lumineuse : 50%
- Réflexion solaire : 60%
- Psi Cadre / Vitrage : 0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Psi Cadre / Opaque : 0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)
- Mode de pose : Tunnel

## **b) Géométrie**

Correspond à la géométrie de la modélisation Sketchup

## **c) Physique (fonction de la fenêtre considérée)**

*Transmission thermique*

*Sans fermeture* Uw : entre 1,30 et 1,40 W/(m<sup>2</sup>.K)

*Avec fermeture* Ujn : entre 1,10 et 1,30 W/(m<sup>2</sup>.K)

*Facteur solaire*

*Sans protection* Sw<sup>sp</sup> : entre 40 et 50%

*Avec protection* Sw<sup>ap</sup> : entre 40 et 50%

*Transmission lumineuse*

*Sans protection* T<sup>sp</sup> : entre 50 et 60%

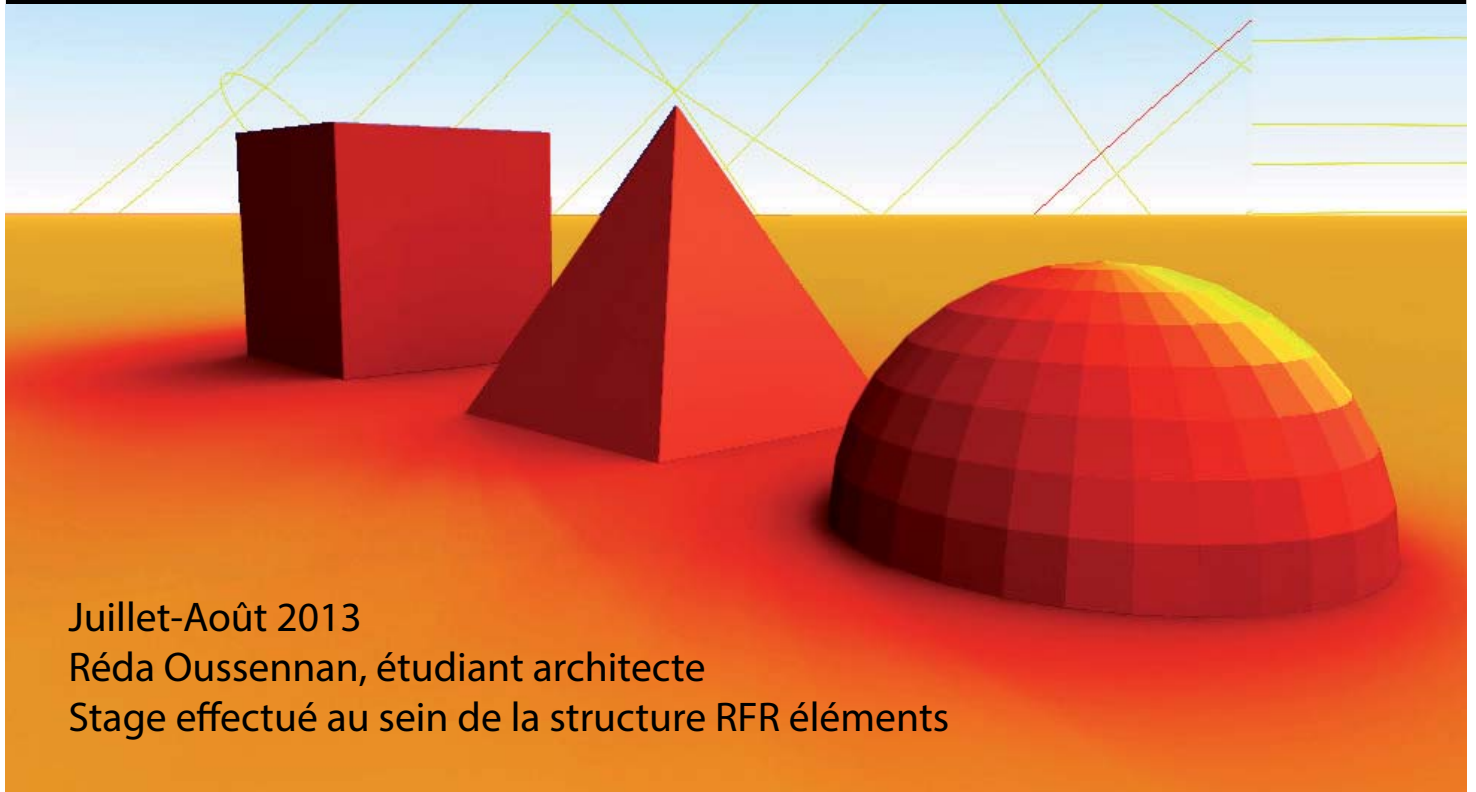
*Avec protection* T<sup>ap</sup> : entre 50 et 60%

*Taux moyen annuel d'occultation* : entre 0 et 10%

**Pour toutes les autres hypothèses (scénarios d'éclairage, débits ventilation...) se reporter aux annexes de « Méthodes de calcul », documentation Archiwizard version ISO-2012-11-06/NRJ rév.2 en date du 06/11/2012**

# Etude Morpho-énergétique

dans le cadre de la recherche *Ignis Mutat Res*



Juillet-Août 2013

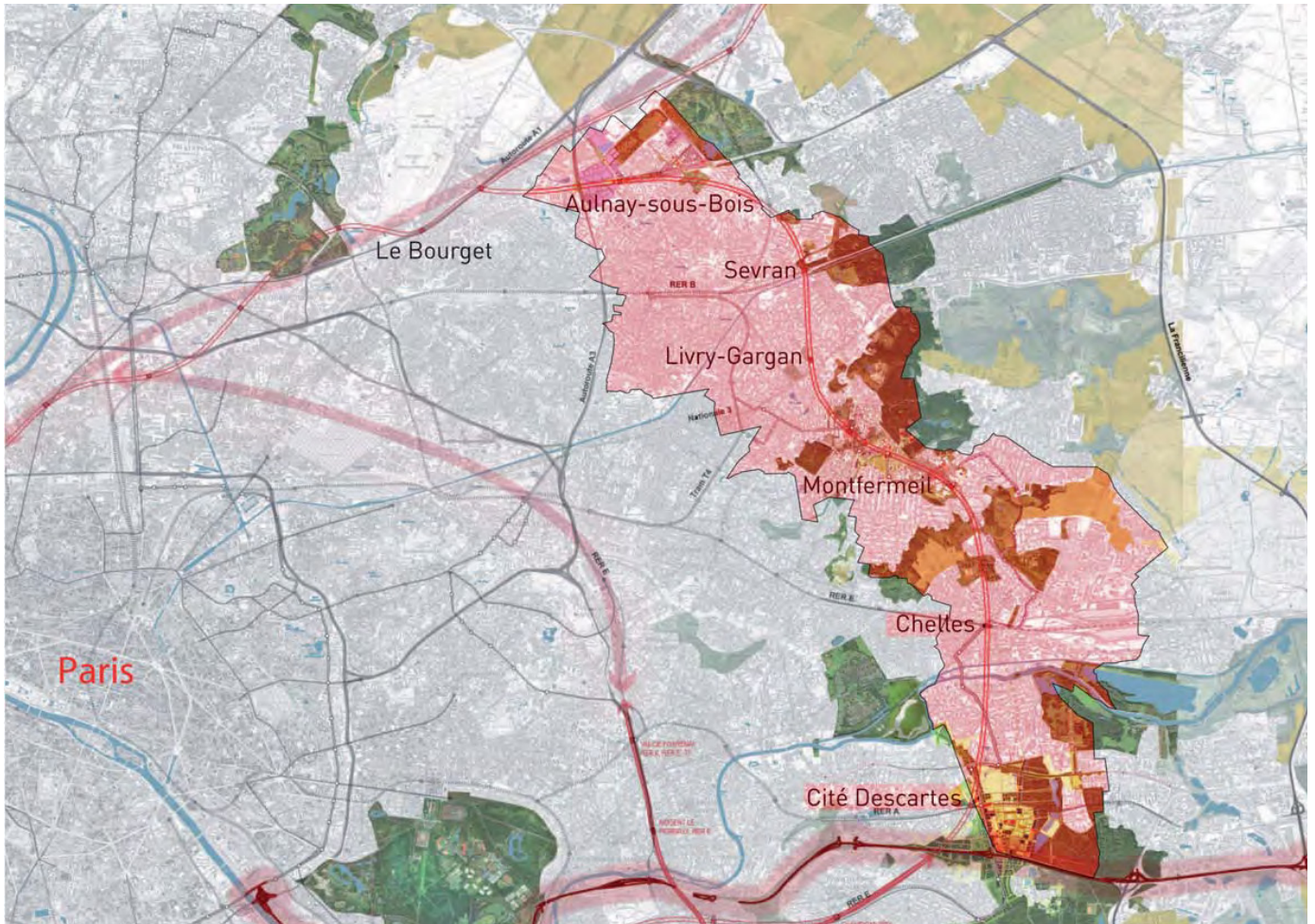
Réda Oussennan, étudiant architecte

Stage effectué au sein de la structure RFR éléments

## Dorsale-Est

Un territoire au fort potentiel





Faire la ville de 400 000 habitants

## Une ville de 400 000 habitants



### DORSALE EST

64 km<sup>2</sup>  
305 000 hab  
18 lgt/ha



### LYON

47,9 km<sup>2</sup>  
470 000 hab  
55 lgt/ha



### STRASBOURG

78,3 km<sup>2</sup>  
272 000 hab  
18 lgt/ha



### TOULOUSE

118,3 km<sup>2</sup>  
440 000 hab  
21 lgt/ha



### NICE

71,9 km<sup>2</sup>  
345 000 hab  
30 lgt/ha

### OBJECTIFS

+100 000 habitants  
+37 000 logements

405 000 hab  
23 lgt/ha





Une mixité sociale

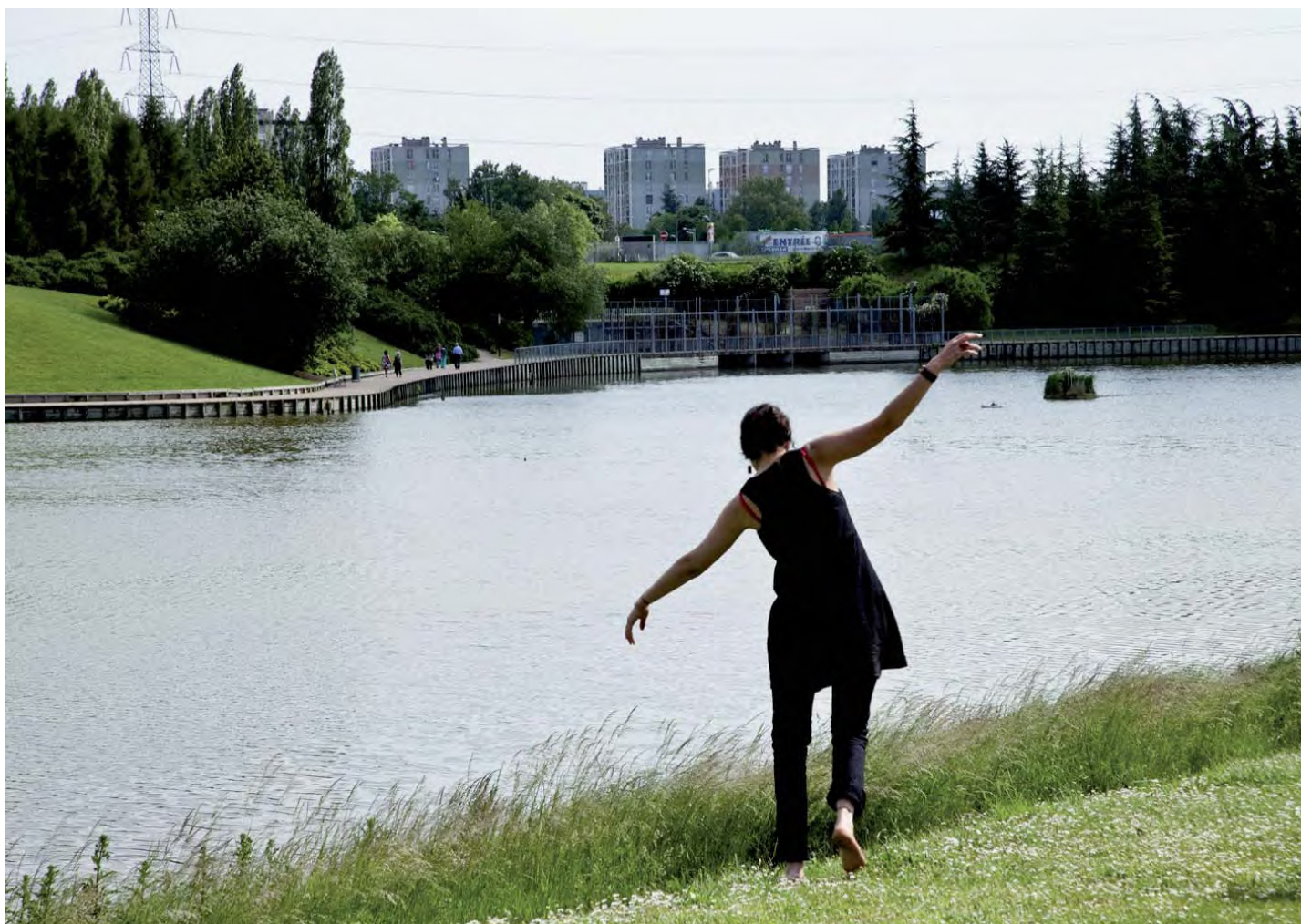
Une économie dynamique





Des paysages à préserver

Un patrimoine à sauvegarder





Des espaces délaissés à requalifier

Des mutations à envisager



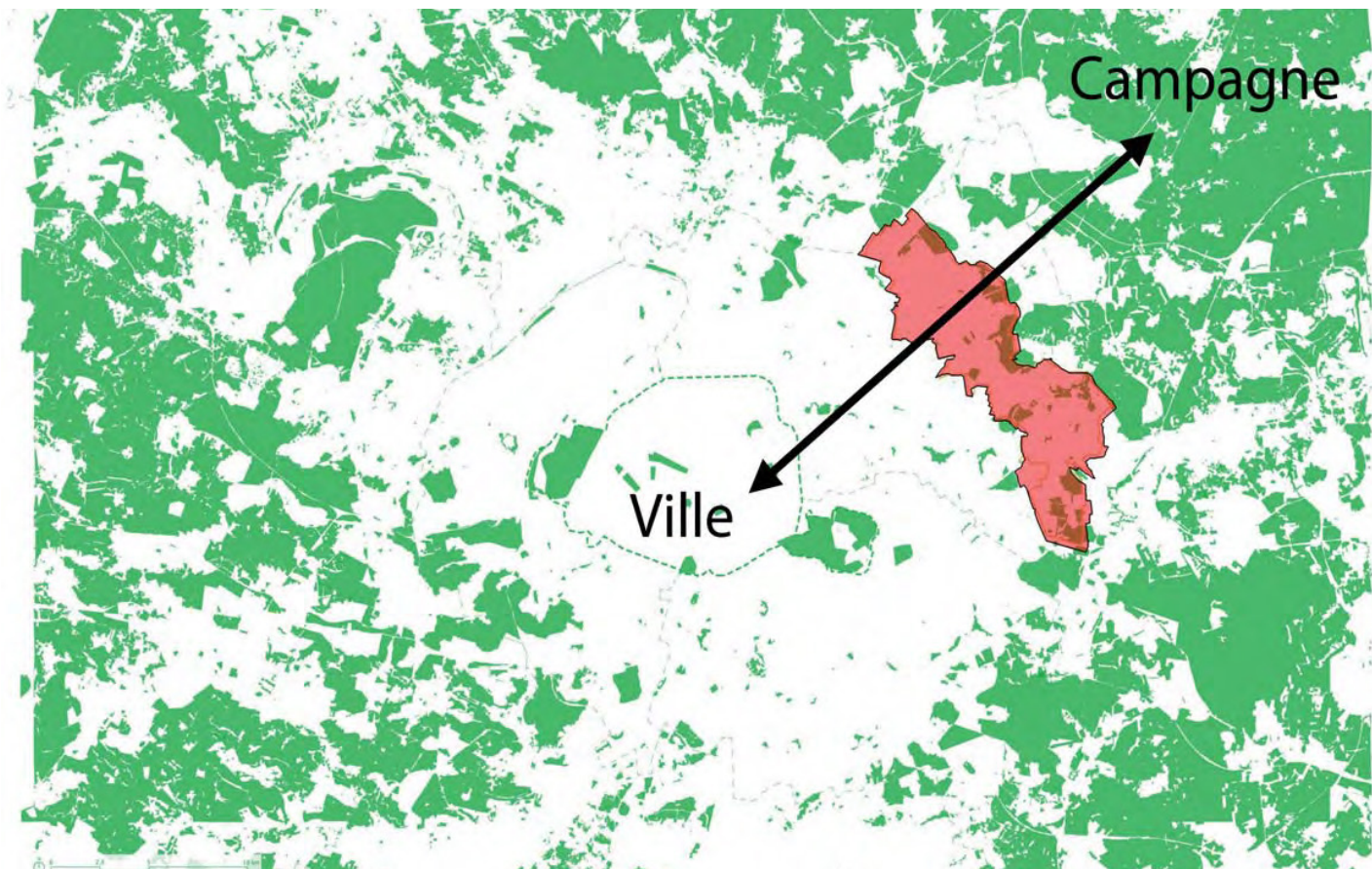




Une situation stratégique...

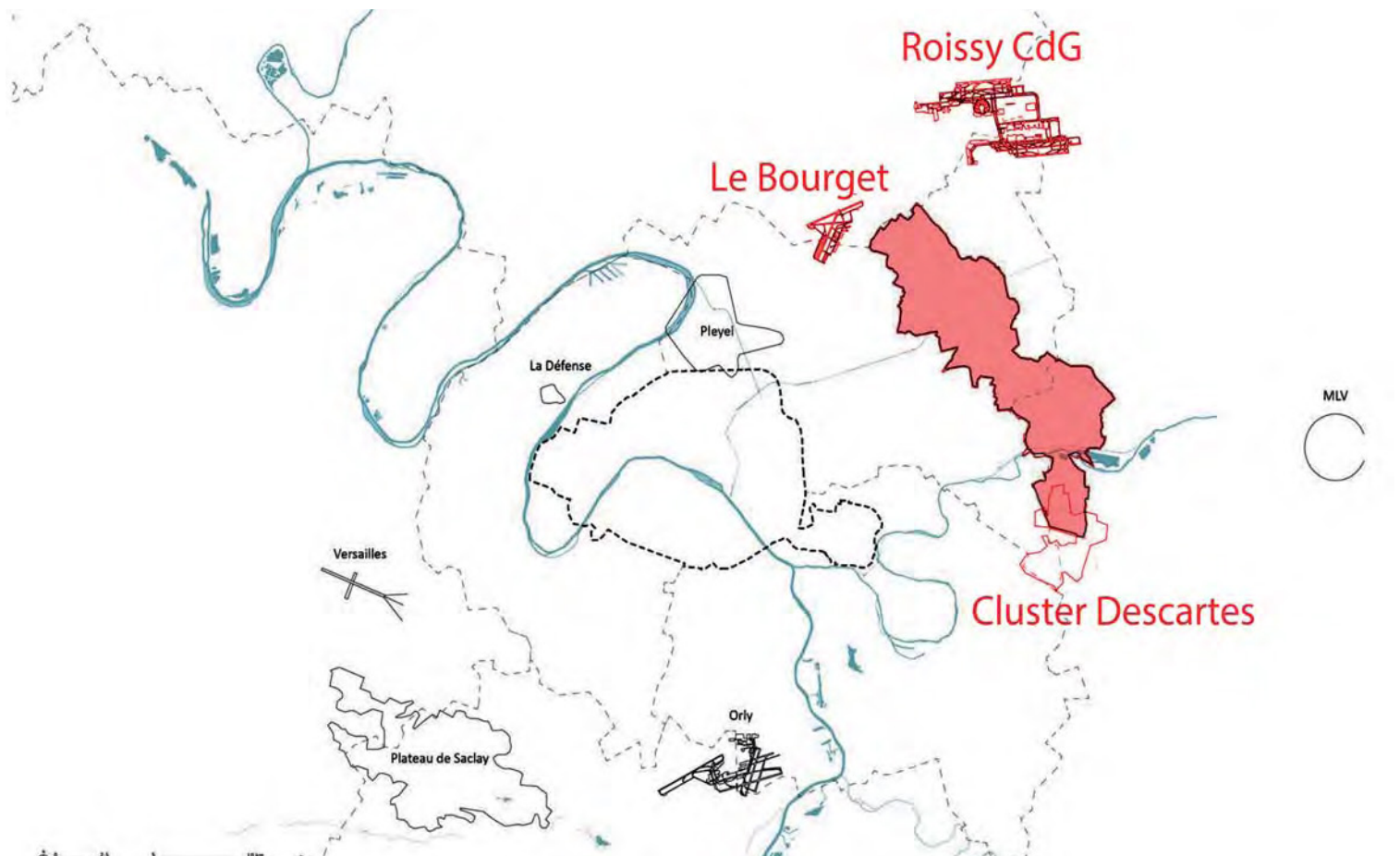
à la lisière métropolitaine





Une situation stratégique...

entre des pôles de fortes activités

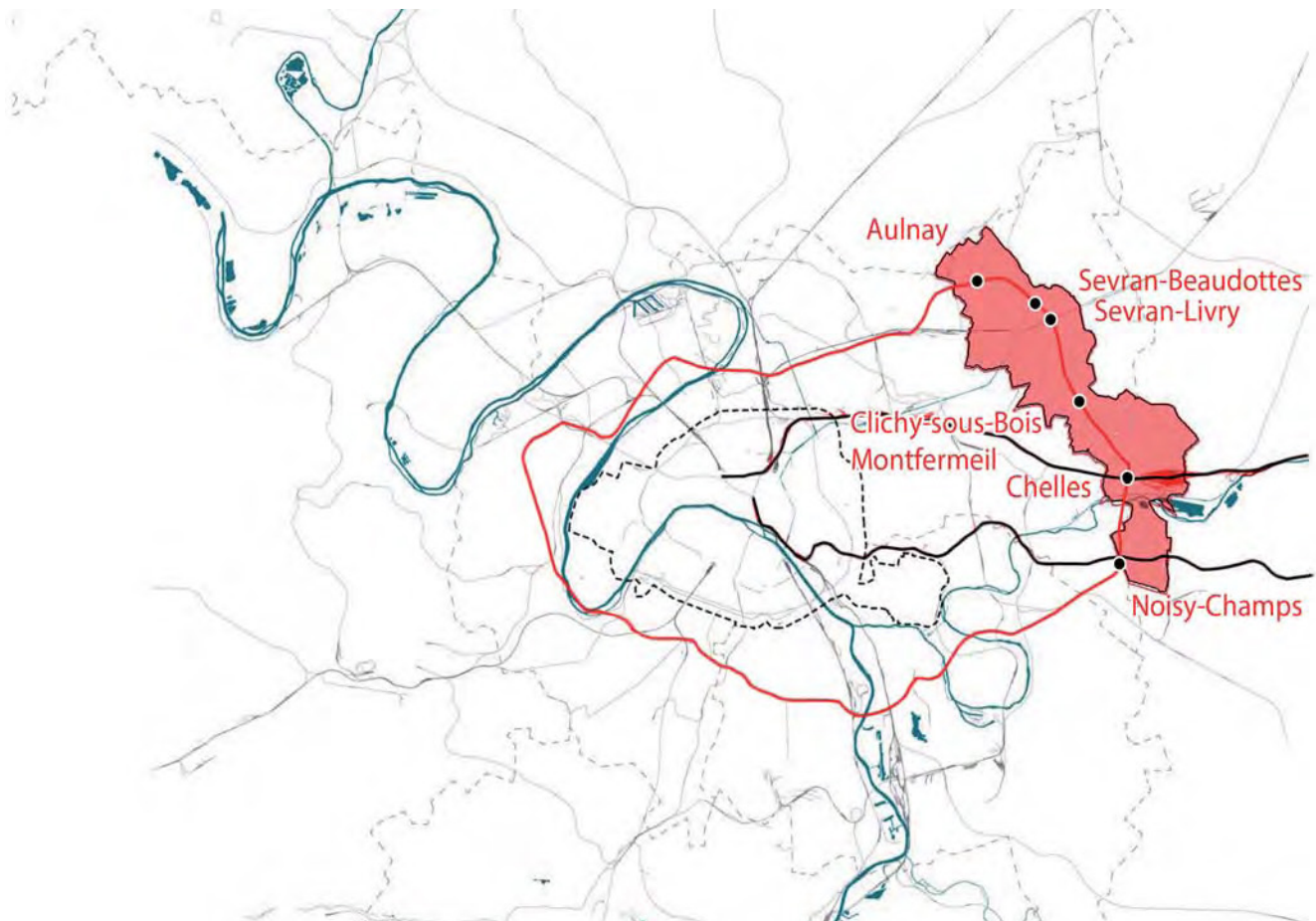
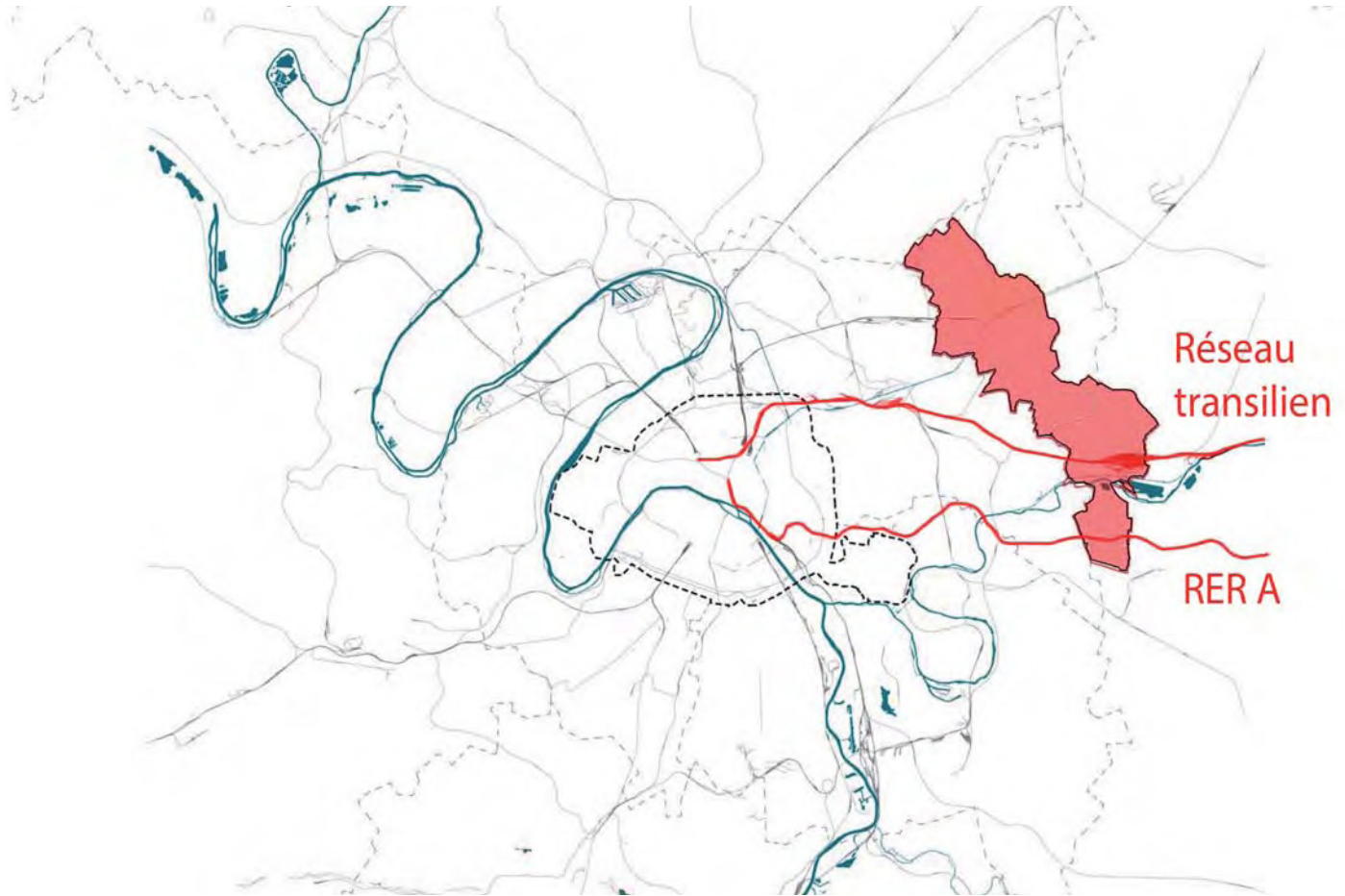






Une situation stratégique...

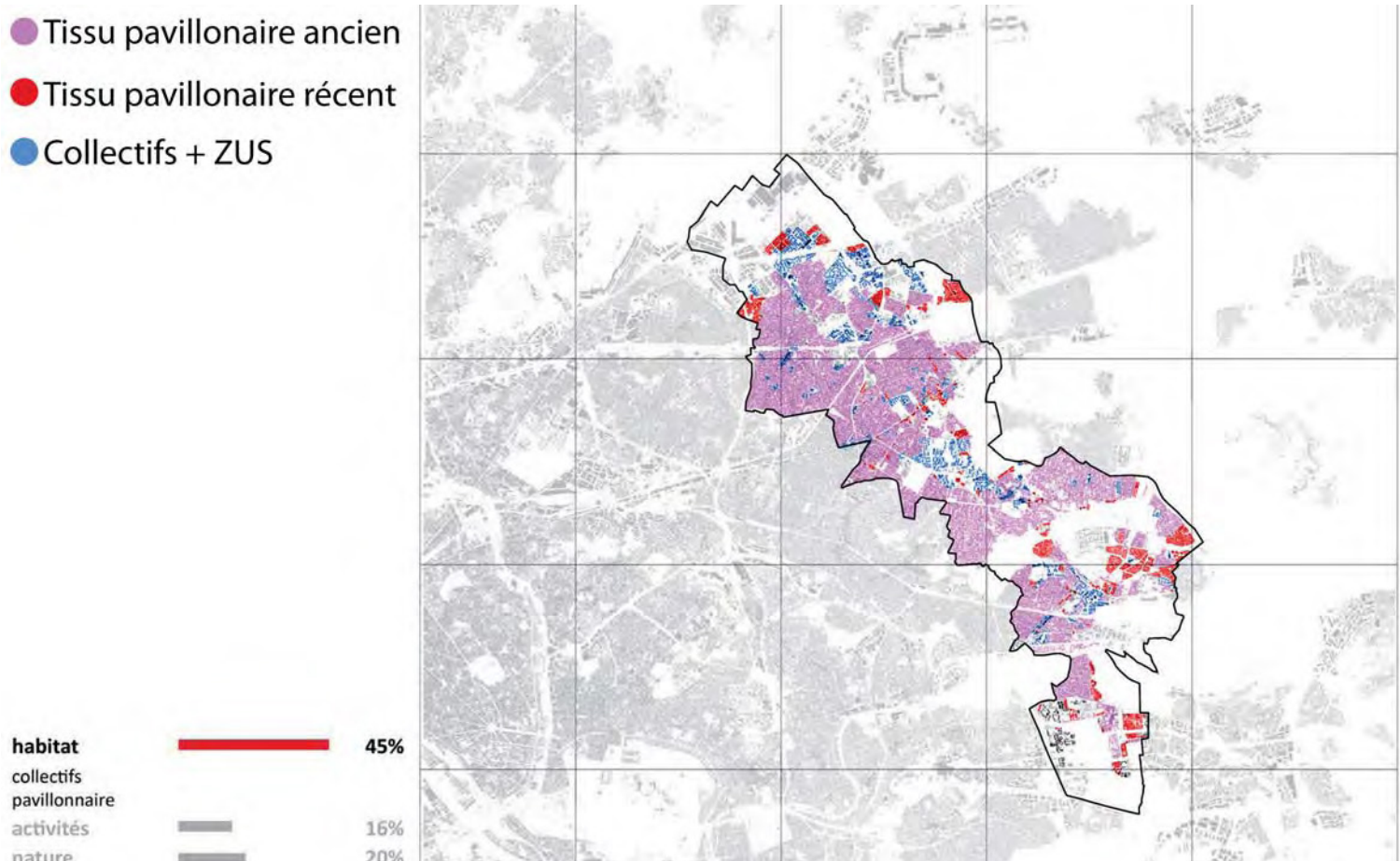
au regard du futur *Grand Paris*



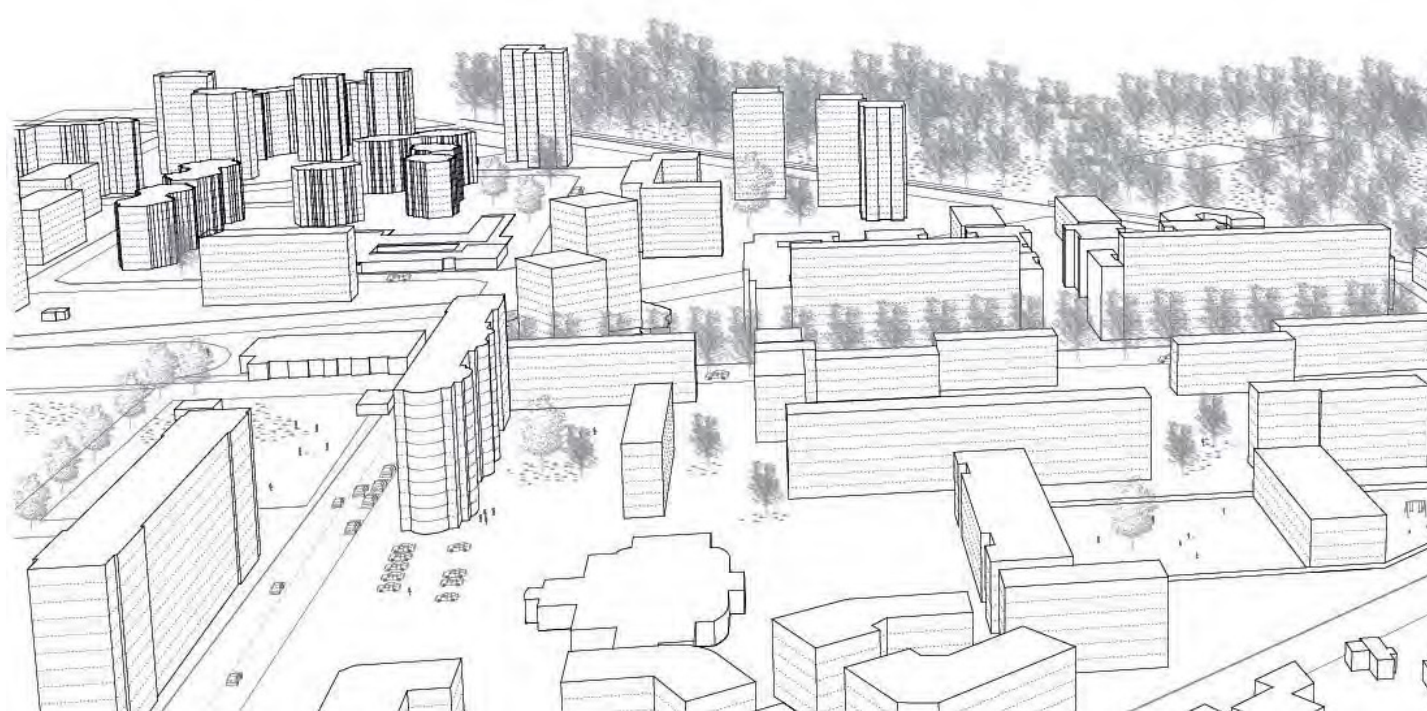


## Un parc immobilier vieillissant

## Une diversité typo à fort potentiel



## Des Grands Ensembles...





...au tissu pavillonnaire étalé









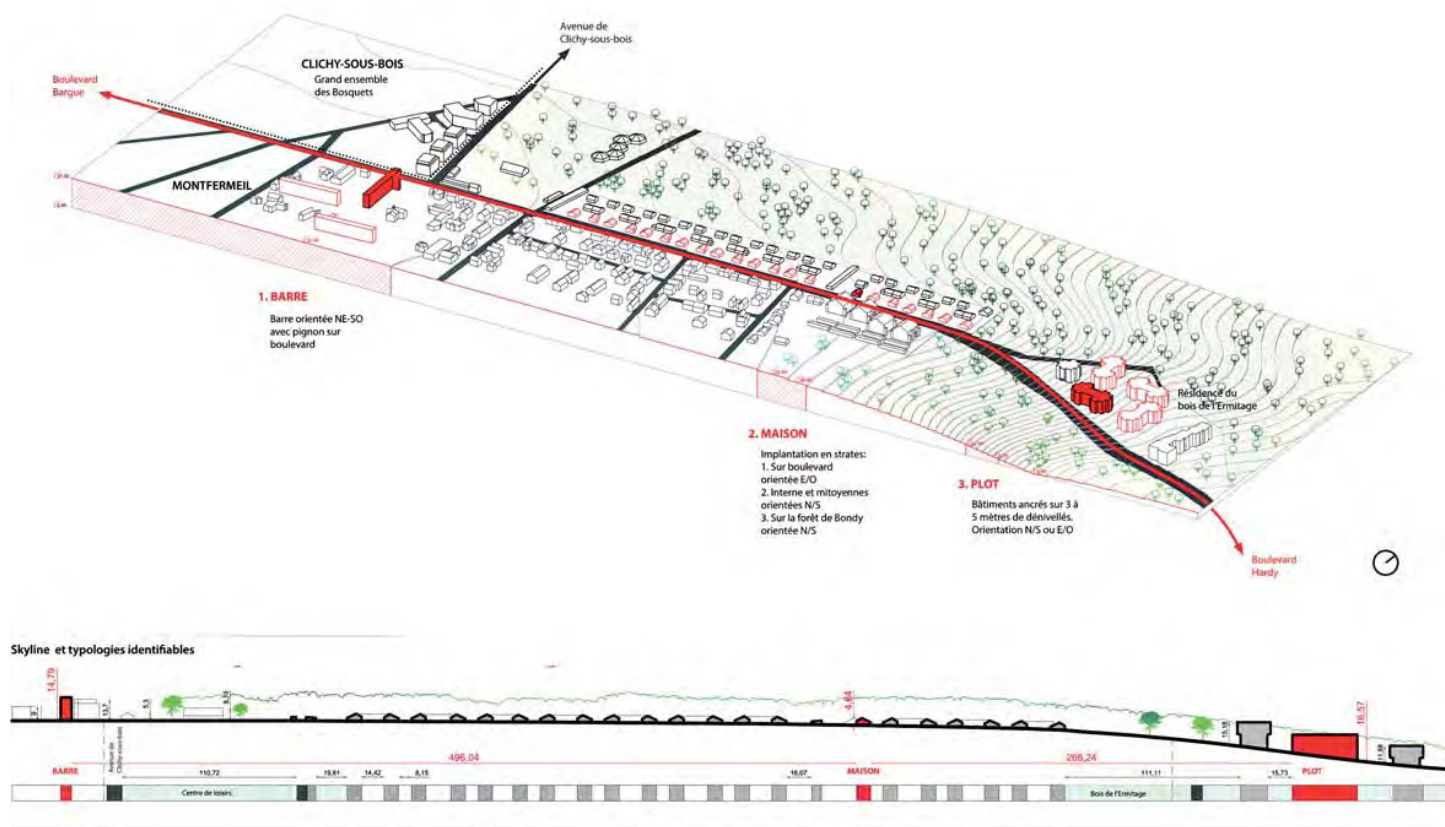
# 120 projets d'étudiants

De l'analyse de site aux propositions d'intervention

3 typologies existantes à étudier

L'analyse urbaine





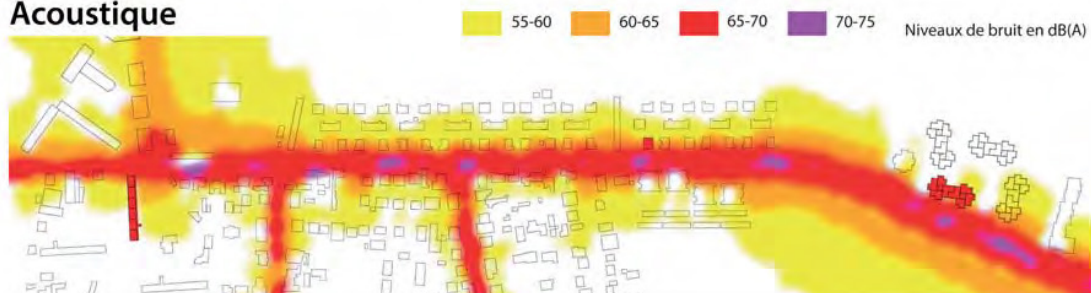
## Végétation



## Bâti/Vide



## Acoustique



## 3 typologies à étudier

## L'analyse climatique et morphologique

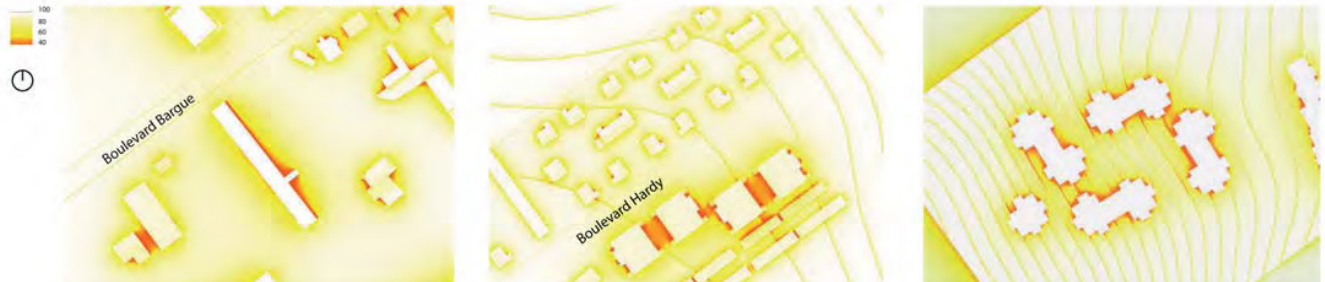
Ensoleillement - Décembre



Ensoleillement - Juin

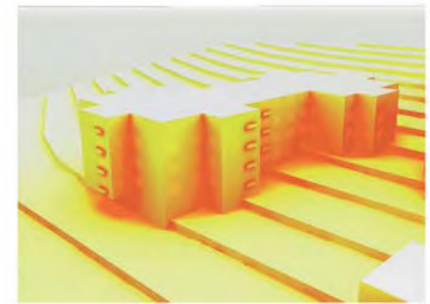
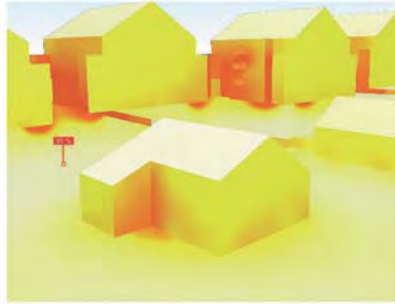
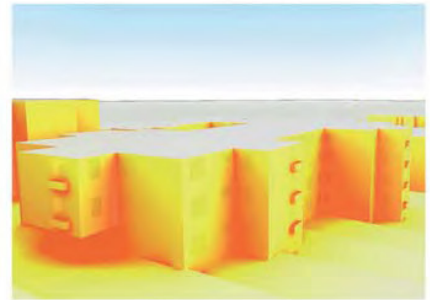
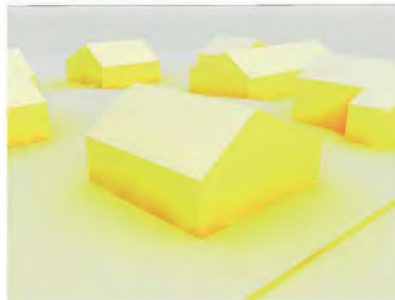
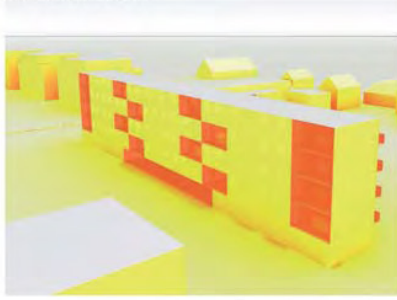


Lumière naturelle

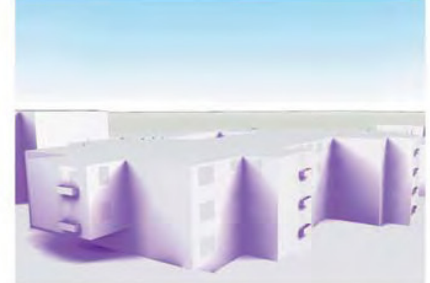
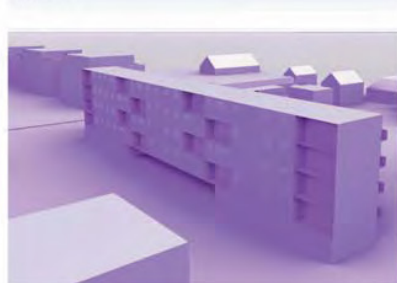




## Lumière naturelle



## Irradiation

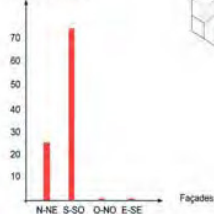


### Barre



Compacité  $S/V^{2/3}$

Surfaces vitrées (%)



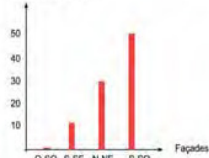
8.4

### Maison



Compacité  $S/V^{2/3}$

Surfaces vitrées (%)



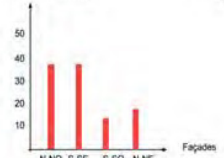
5.8

### Plot



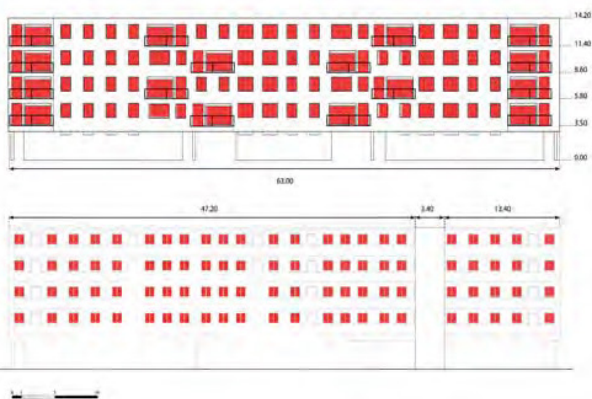
Compacité  $S/V^{2/3}$

Surfaces vitrées (%)

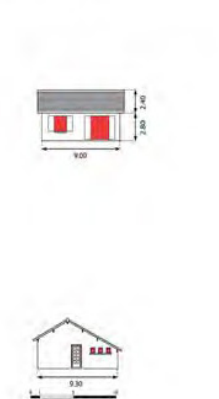


14.9

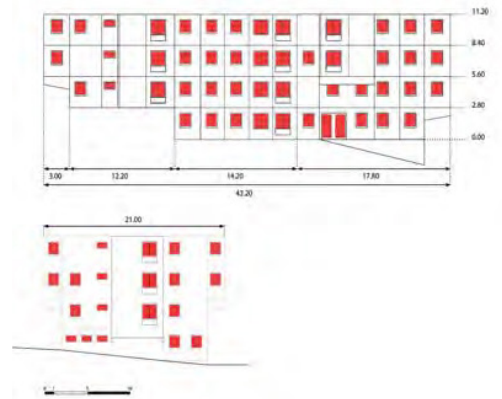
### Elevations façades S-SO et N-Ne



### Elevations façades S-SO et S-SE



### Elevations façades S-SE et S-SO



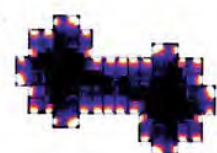
### Facteur Lumière Jour



### Facteur Lumière Jour



### Facteur Lumière Jour



# 3 typologies à étudier

## pour 3 propositions d'intervention

### Barre



#### Initial

- Barre très fine
- Distribution sombre et exiguïté des escaliers
- Typologie unique
- Inégalité des espaces extérieurs



### Maison



- Faible densité
- + Habitation compacte
- + Combles chauffés
- Standardisation/ homogénéité



### Plot



- Jardinières encombrées
- Uniformité des fenêtres
- Volumétrie complexe
- Aucun espace extérieur



#### A minima

##### Gagner en luminosité

1. Supprimer les garde-corps en béton
2. Ajouter des garde-corps filaires
3. Intégrer des panneaux à inertie thermique transilluminés ou peints pour identifier et varier les usages sur la couronne

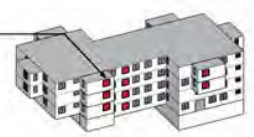


1. Convertir les 3 modules de fenêtres en une large ouverture
- Conclusion**  
Nouveaux volumes importants nécessitant menuiserie coûteuse



##### Désencombrer / Habiter le mur

1. Suppression des jardinières pour désencombrer la façade
2. Protections solaires adaptées aux orientations
3. Isolation et réduction des ponts thermiques encastrés dans le cadre
4. Largeur du cadre adaptée aux orientations et usages

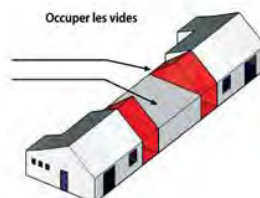


#### Plug-in

1. Création de balcon pour les logements ne possédant pas d'espaces extérieurs
- Conclusion**  
Baisse de la compacité, ombres portées sur les loggias



1. Création de serres sur les murs pignons
2. Densification entre serres. Le nouveau volume peut constituer une nouvelle habitation ou une extension d'une des deux maisons.



##### Occuper les vides

- Suppression des redans pour simplifier la volumétrie
- + Compacité améliorée (réduction du nombre de façade et des dispersés)
  - + Ombres projetées réduites
  - + Façades éclairées
  - + Recomposition typologique

##### Simplifier la volumétrie



#### Enveloppe

##### Exploiter les façades irradiées

1. Déplacer les escaliers sur les deux pignons
2. Alternance des couleurs un étage sur deux et création de duplex
3. Intervention sur la façade S-E.



1. Prolongement de la toiture et changement de matériaux pour profiter des rayonnements solaires
2. Création d'un nouveau volume encastré pour étendre les pièces de vie.



##### Prolonger/ Eclairer

1. Densification en toiture
- + surface habitable redistribuée
- + nouvelle typologie (duplex et studio)
2. Epaveur en façade sud prolongeant les pièces de vie. Multifonctionnalité (pièce intérieure ou extérieure) et ouverture bénéficiant d'une irradiation à ~ 80%

##### Prolonger/ Densifier



# Recherche morpho-énergétique

Méthodologie, hypothèses et résultats

Constitution d'une base de données

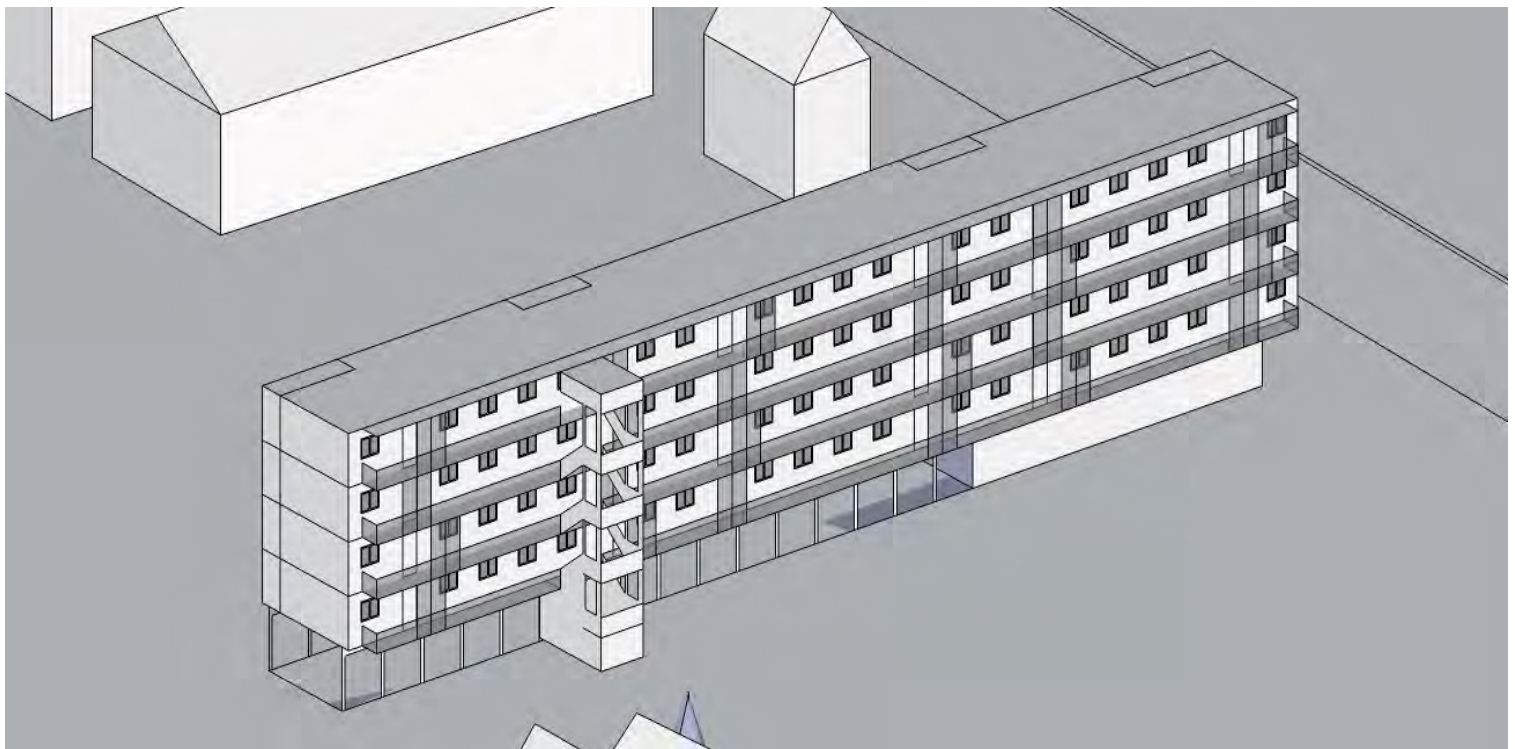
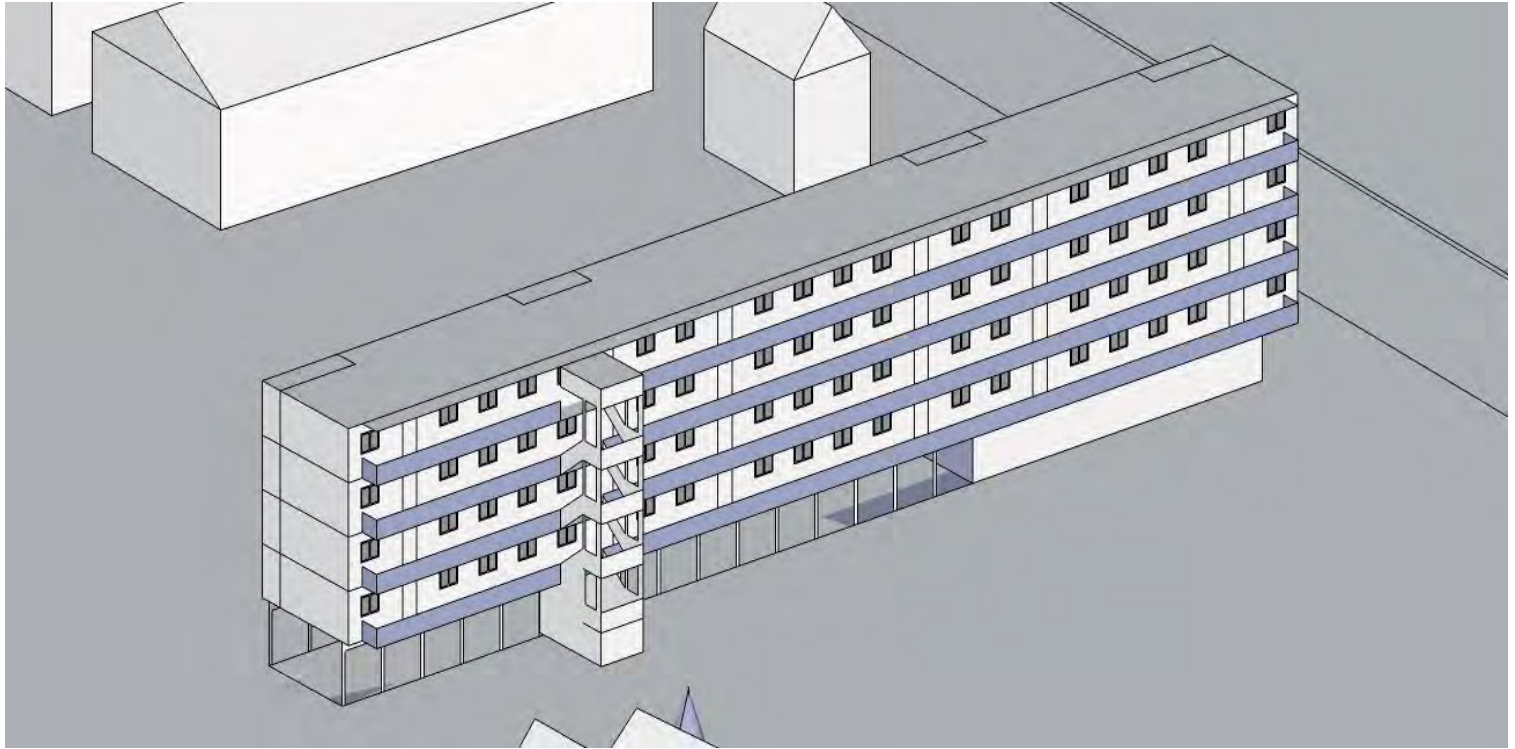
120 projets à modéliser et analyser

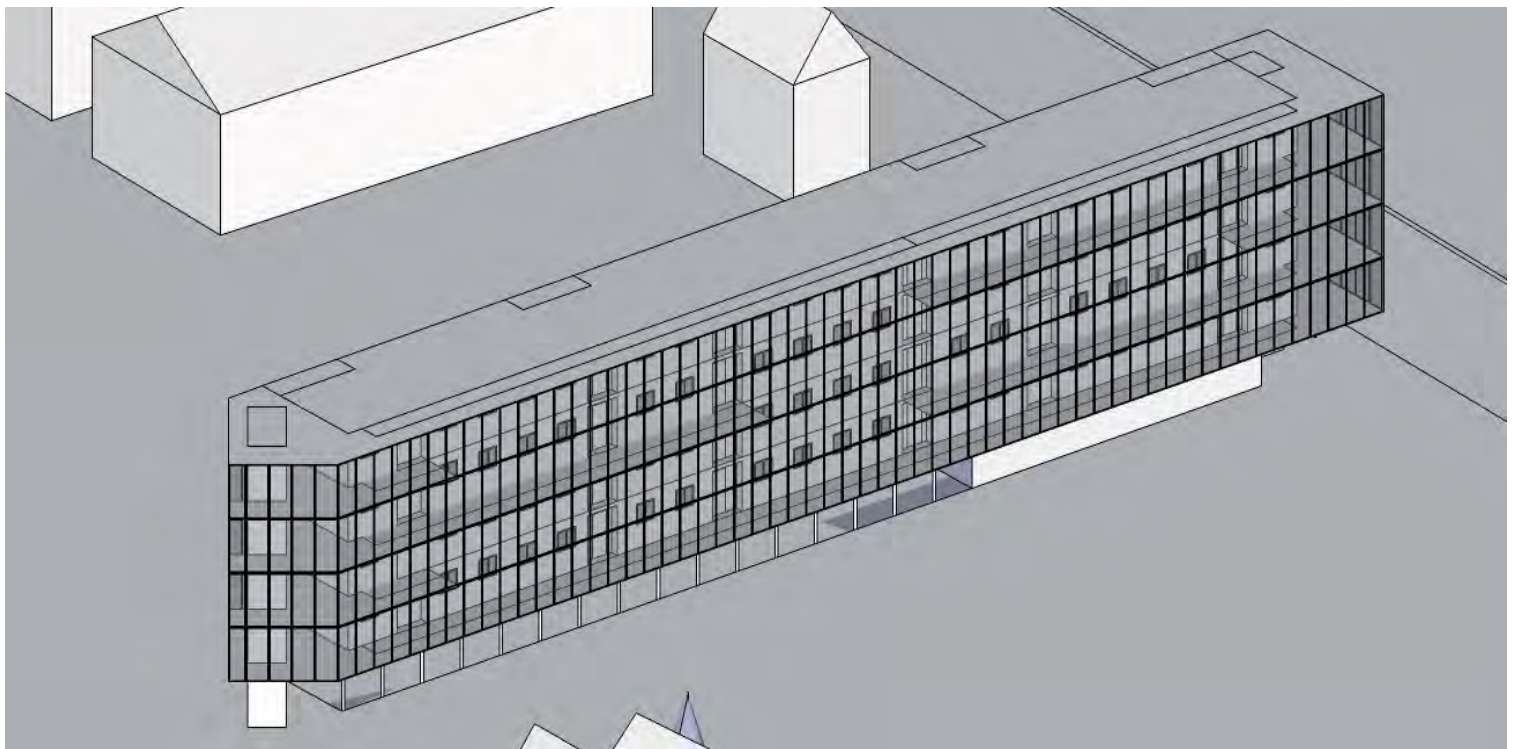
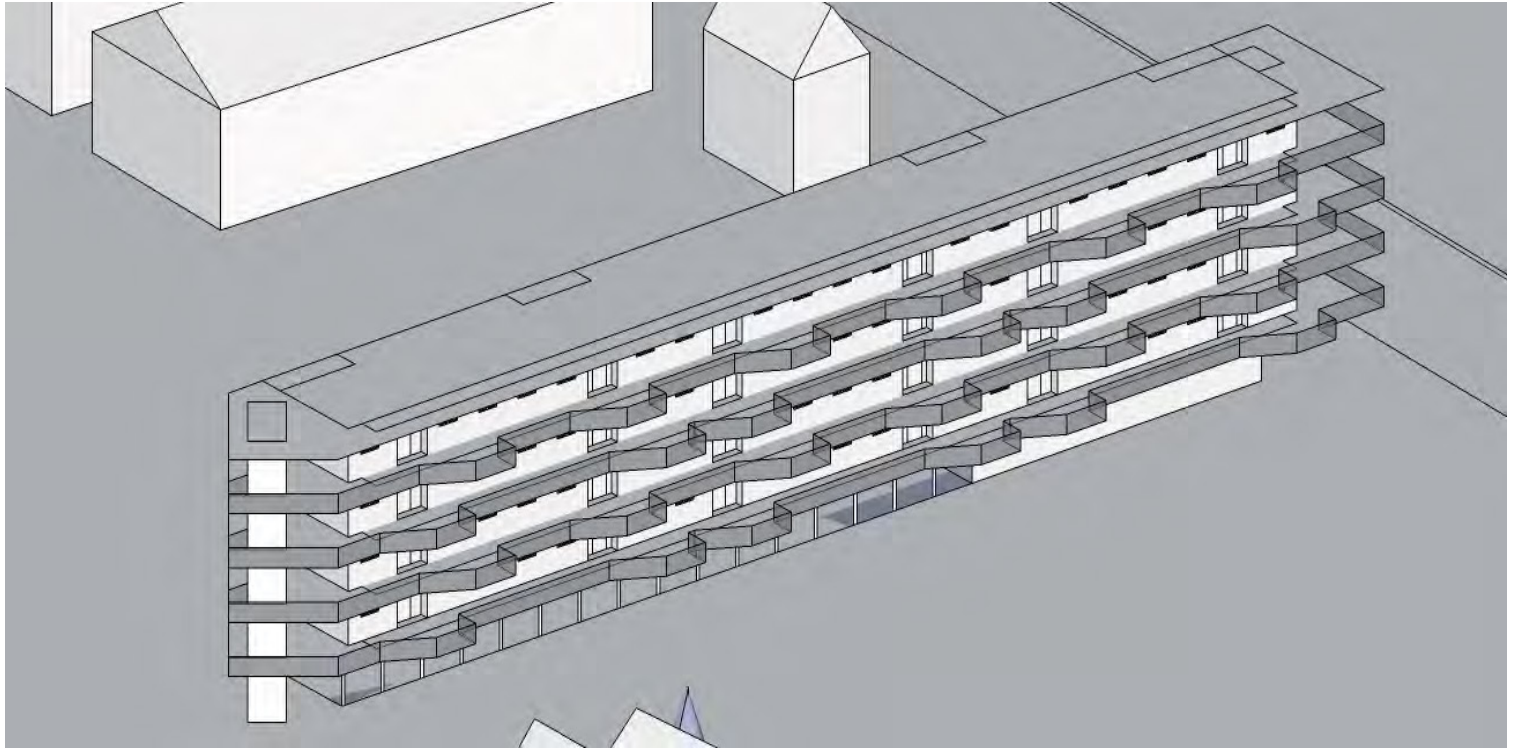


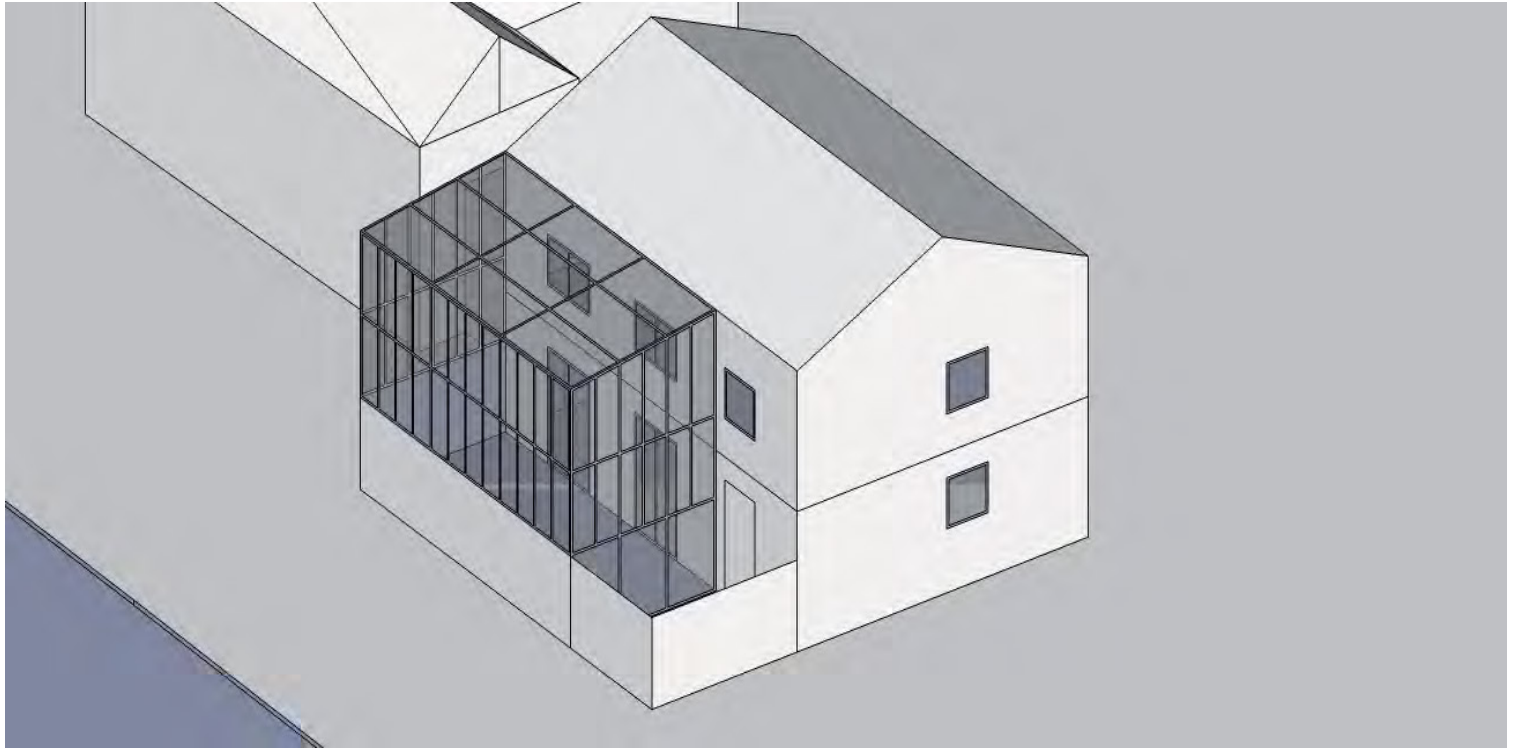
















 1 - Documents graphiques

-  001 - B0 - csm - Abords.skp
-  001 - B0 - csm - Typologie.skp

 2 - Documents analytiques

-  001 - B0 - csm - Paris 2050 A2.awz
-  001 - B0 - csm - Paris actuel.awz
-  001 - B0 - csm.xls



## Définition d'hypothèses d'analyse

## Localisation, climat et matériaux

### Localisation

Région parisienne

Latitude : 48°48' N

Longitude : 2°19' E

Altitude Station : 75m

Fuseau horaire : GMT +1

# Scénarios climatiques

## Base de données météorologiques

Les fichiers météorologiques ont été obtenus à partir de **Météonorm 7** :  
Station météorologique : **Paris-Montsouris**



# Scénarios climatiques

## Scénarios climatiques 2012 et 2050 A2 (prospectives du GIEC)

Les scénarios climatiques 2012 et 2050 sont inspirés des observations et des rapports prospectivistes établies par le  
**Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ( GIEC )**

Le GIEC a dressé plusieurs rapports disponibles sur [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)  
**2007 - Quatrième rapport d'évaluation : "Changements climatiques 2007"**

Les scénarios sont classés en 4 familles selon les hypothèses formulées :  
**Scénario A2 - Développement économique  
avec une orientation régionale (monde hétérogène)**

La base de données établies par le GIEC est disponible sur [www.ipcc-data.org](http://www.ipcc-data.org)

# Usage et date de construction

## Paramétrage Archiwizard

On considère comme usage du bâtiment : **Logement collectif**

On considère comme date de construction : **Neuf 2012**

Afin de comparer morphologiquement les projets, l'ensemble du corpus a été testé selon ces hypothèses. Le choix de ces hypothèses a été fait afin de minimiser l'impact du vitrage sur les déperditions. Par ailleurs, la composition des éléments de parois et des baies devait être représentative du parc immobilier actuel.

Le nombre maximal d'occupants par logement est de : **3**

En scénario chaud, la consigne de température moyenne est de : **16 °C**

En scénario froid, la consigne de température moyenne est de : **30 °C**

La température de confort est estimé à : **26 °C**

## Hypothèses sur les éléments constitutifs

### Composition des parois

#### a) Murs déperditifs

Composition : **Mur bois ITE**

Epaisseur : **37 cm**

Résistance : **4,42 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **0,226 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Extérieur**

|               |           |                 |
|---------------|-----------|-----------------|
| Enduit ciment | > 1,00 cm | > 0,950 W/(m.K) |
|---------------|-----------|-----------------|

|                     |            |                 |
|---------------------|------------|-----------------|
| Polystyrène expansé | > 15,00 cm | > 0,035 W/(m.K) |
|---------------------|------------|-----------------|

|            |            |                 |
|------------|------------|-----------------|
| Béton armé | > 20,00 cm | > 2,300 W/(m.K) |
|------------|------------|-----------------|

|                           |           |                 |
|---------------------------|-----------|-----------------|
| Panneau placoplâtre BA 13 | > 1,30 cm | > 0,325 W/(m.K) |
|---------------------------|-----------|-----------------|

#### **Intérieur**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des parois

### b) Murs intérieurs

Composition : **Cloison bois**

Epaisseur : **7 cm**

Résistance : **0,22 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **4,636 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Extérieur**

|               |           |                 |
|---------------|-----------|-----------------|
| Enduit plâtre | > 1,00 cm | > 0,560 W/(m.K) |
|---------------|-----------|-----------------|

|                           |           |                 |
|---------------------------|-----------|-----------------|
| Structure bois non isolée | > 5,00 cm | > 0,278 W/(m.K) |
|---------------------------|-----------|-----------------|

|               |           |                 |
|---------------|-----------|-----------------|
| Enduit plâtre | > 1,00 cm | > 0,560 W/(m.K) |
|---------------|-----------|-----------------|

#### **Intérieur**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des parois

### c) Planchers bas élevés

Composition : **Pl béton IT inf**

Epaisseur : **35 cm**

Résistance : **4,79 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **0,209 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Dessus**

|                      |           |                 |
|----------------------|-----------|-----------------|
| Chape traditionnelle | > 5,00 cm | > 1,200 W/(m.K) |
|----------------------|-----------|-----------------|

|       |            |                 |
|-------|------------|-----------------|
| Béton | > 15,00 cm | > 2,299 W/(m.K) |
|-------|------------|-----------------|

|                     |            |                 |
|---------------------|------------|-----------------|
| Polystyrène extrudé | > 15,00 cm | > 0,032 W/(m.K) |
|---------------------|------------|-----------------|

#### **Dessous**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des parois

### d) Planchers intermédiaires

Composition : **PI hourdis isolants**

Epaisseur : **24 cm**

Résistance : **2,37 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **0,422 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Dessus**

|                      |           |                 |
|----------------------|-----------|-----------------|
| Chape traditionnelle | > 5,00 cm | > 1,200 W/(m.K) |
|----------------------|-----------|-----------------|

|                              |            |                 |
|------------------------------|------------|-----------------|
| Dalle 19 cm hourdis isolants | > 19,00 cm | > 0,082 W/(m.K) |
|------------------------------|------------|-----------------|

#### **Dessous**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des parois

### e) Toitures déperditives

Composition : **Toit charpente bois, CT 200 + LDV 60 mm Ext**

Epaisseur : **31 cm**

Résistance : **4,84 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **0,207 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Dessus**

|                          |           |                 |
|--------------------------|-----------|-----------------|
| Complément isolation LDV | > 6,00 cm | > 0,055 W/(m.K) |
|--------------------------|-----------|-----------------|

|                              |            |                 |
|------------------------------|------------|-----------------|
| Charpente traditionnelle LDV | > 24,00 cm | > 0,065 W/(m.K) |
|------------------------------|------------|-----------------|

|                           |           |                 |
|---------------------------|-----------|-----------------|
| Panneau placoplâtre BA 13 | > 1,30 cm | > 0,325 W/(m.K) |
|---------------------------|-----------|-----------------|

#### **Dessous**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des parois

### f) Toitures terrasses

Composition : **Toit terrasse béton ITE**

Epaisseur : **36 cm**

Résistance : **4,41 m<sup>2</sup>.K/W**

U : **0,227 W/(m<sup>2</sup>.K)**

#### **Dessus**

|                     |            |                 |
|---------------------|------------|-----------------|
| Polystyrène extrudé | > 15,00 cm | > 0,035 W/(m.K) |
|---------------------|------------|-----------------|

|            |            |                 |
|------------|------------|-----------------|
| Béton armé | > 20,00 cm | > 2,300 W/(m.K) |
|------------|------------|-----------------|

|                           |           |                 |
|---------------------------|-----------|-----------------|
| Panneau placoplâtre BA 13 | > 1,30 cm | > 0,325 W/(m.K) |
|---------------------------|-----------|-----------------|

#### **Dessous**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des baies

### a) Vitrage : Double vitrage isolation élevée (Argon)

Transmission lumineuse : **80%**

Réflexion lumineuse : **12%**

Transmission solaire : **53%**

Réflexion solaire : **24%**

Facteur solaire : **58%**

Ug : **1,10 W/(m<sup>2</sup>.K)**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des baies

b) Opaque : Sandwich isolant en PVC

Réflexion lumineuse : **70%**

Réflexion solaire : **70%**

Up : **0,60 W/(m<sup>2</sup>.K)**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des baies

c) Protection : Volet roulant PVC 20mm avec coffre

Surface : **0,30 m<sup>2</sup>**

Réflexion solaire : **50%**

Transmission thermique Uc : **1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des baies

d) Cadre : Cadre en PVC très performant

Matériau : **PVC**

Transmission thermique  $U_f$  : **1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)**

Réflexion lumineuse : **50%**

Réflexion solaire : **60%**

Psi Cadre / Vitrage : **0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)**

Psi Cadre / Opaque : **0,040 W/(m<sup>2</sup>.K)**

Mode de pose : **Tunnel**

# Hypothèses sur les éléments constitutifs

## Composition des baies

e) Physique (fonction de la fenêtre considérée)

Transmission thermique

Sans fermeture  $U_w$  : **entre 1,30 et 1,40 W/(m<sup>2</sup>.K)**

Avec fermeture  $U_{jn}$  : **entre 1,10 et 1,30 W/(m<sup>2</sup>.K)**

Facteur solaire

Sans protection  $S_{wsp}$  : **entre 40 et 50%**

Avec protection  $S_{wap}$  : **entre 40 et 50%**

Transmission lumineuse

Sans protection  $T_{sp}$  : **entre 50 et 60%**

Avec protection  $T_{ap}$  : **entre 50 et 60%**

Taux moyen annuel d'occultation : **entre 0 et 10%**



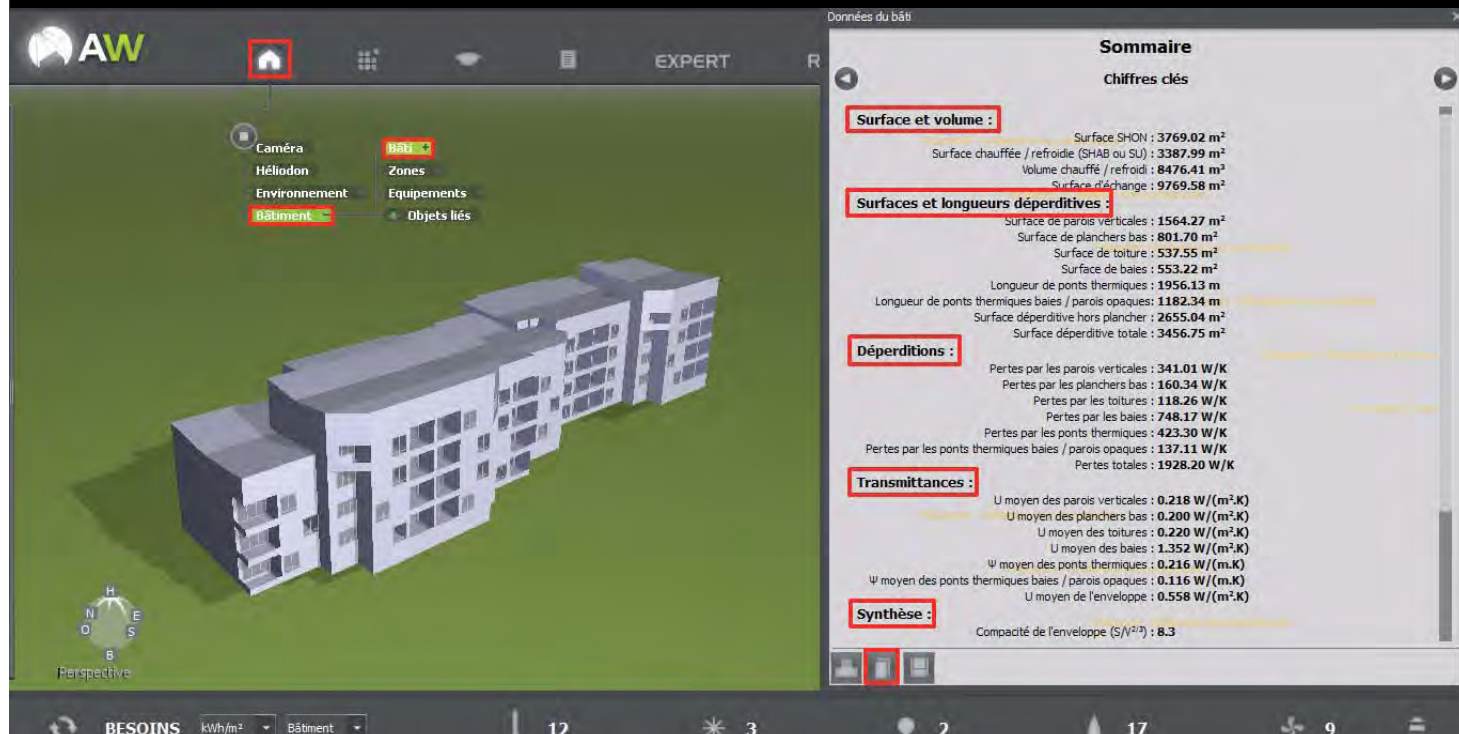
## Extraction des données

### Caractéristiques du projet étudié



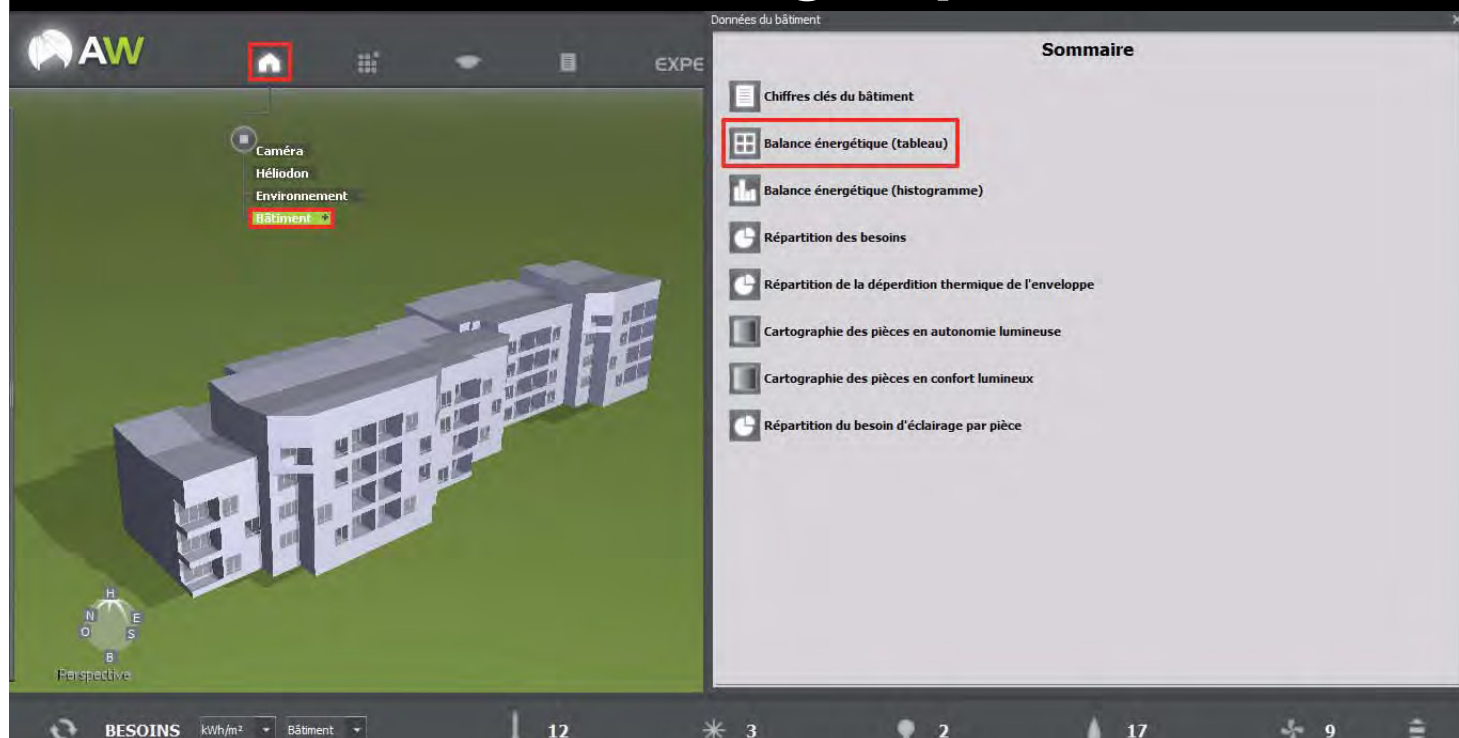
Cliquer sur l'onglet "Petite maison": sous-rubrique **Bâtiment** > **Bâti**  
Cliquer sur **Chiffres clés du bâti** dans la fenêtre qui s'affiche automatiquement.

# Données - Chiffres clés du bâtiment



Données : Surface & volume, Longueurs déperditives, Déperditions, Transmittance, Compacité  
Copier les données dans le "presse-papier" à partir de l'icône en bas à gauche de la fenêtre

# Données - Balance énergétique



Cliquer sur l'onglet "Petite maison" : sous-rubrique Bâtiment  
Cliquer sur Balance énergétique (tableau) dans la fenêtre qui s'affiche automatiquement.

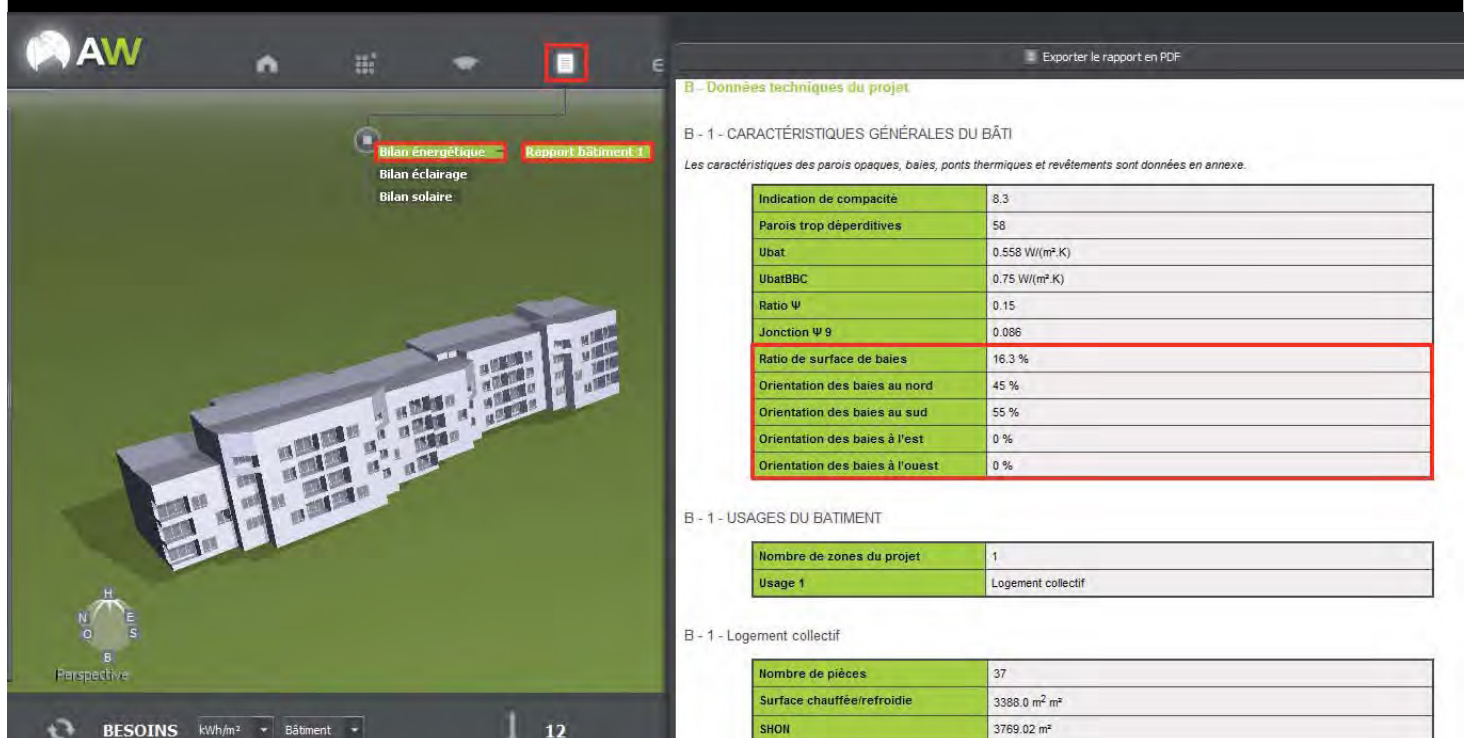
# Données - Balance énergétique



Données : Besoin de chaud, Besoin de froid

Copier les données dans le "presse-papier" à partir de l'icône en bas à gauche de la fenêtre

# Données - Orientation des baies



Données : Ratio total de la surface de baies, % de baies par orientation

Copier les données en cliquant droit après avoir sélectionné les données souhaitées.

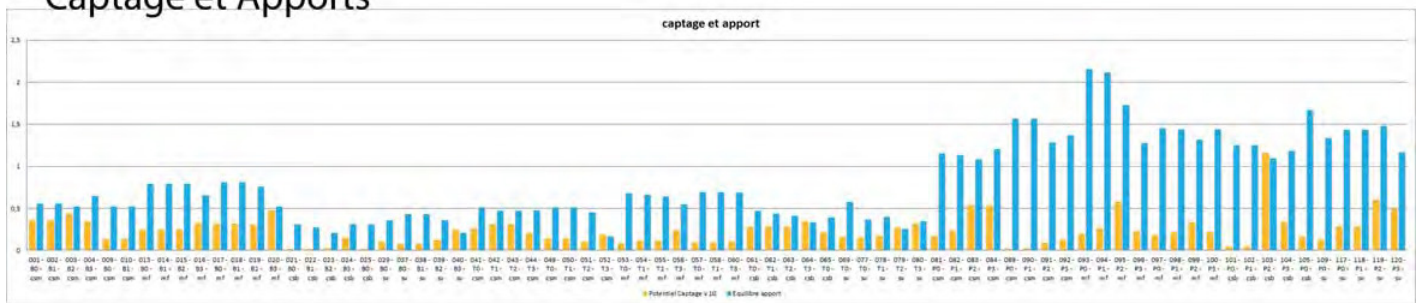


|    | A   | B       | C         | D                                       | E   | F       | G                                  | H                              | I      | J      | K      | L      | M      | N      | O      | P      | Q      | R      | S      | T      | U       | V       | W | X |  |
|----|---|---------|-----------|---|-----|---------|------------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---|---|--|
| 1  | <b>Surface et volume :</b>                  |         |           | <b>Orientati on des baies au nord</b>   | 45% | SOMME   | Cumul (kWh)                        | Jan                            | Fev    | Mar    | Avr    | Mai    | Juin   | Juil   | Aout   | Sep    | Oct    | Nov    | Déc    | Annuel |         |         |   |   |  |
| 2  | Surface SHON :                              | 3769,04 |           | <b>Orientati on des baies au sud</b>    | 55% |         | 219445                             | Contributi on solaire          |        | -4028  | 5072   | 8254   | 11477  | 12674  | 13459  | 13924  | 12281  | 10243  | 8676   | 5915   | 3719    | 109723  |   |   |  |
| 3  | Surface chauffée / refroidie :              | 3388,04 |           | <b>Orientati on des baies à l'ouest</b> | 0%  |         | 320900                             | Apports internes               |        | 14353  | 13098  | 14506  | 14108  | 14353  | 14108  | 13695  | 8615   | 14322  | 14353  | 13894  | 11048   | 160453  |   |   |  |
| 4  | Volume chauffé / refroidi :                 | 8476,53 | B3/B4(2°) |   | 0%  |         | -326704                            | Transmissi on par l'envelopp e |        | -19266 | -16622 | -16470 | -14458 | -14580 | -11638 | -10146 | -8746  | -11500 | -12634 | -14194 | -13098  | -163352 |   |   |  |
| 5  | Surface d'échange :                         | 9769,66 | 8,149603  |   |     | -267977 | Pertes par renouvellem ent d'air   |                                | -14326 | -12180 | -10972 | -10824 | -11196 | -11649 | -11189 | -8199  | -11677 | -10370 | -10254 | -11152 | -133989 |         |   |   |  |
| 6  | <b>Surfaces et longueurs déperditives :</b> |         |           |   |     | -24285  | Rayonne ment vers la voûte celeste |                                | -1086  | -966   | -1060  | -1015  | -988   | -931   | -944   | -980   | -994   | -1051  | -1027  | -1100  | -12143  |         |   |   |  |
| 7  | de parois verticales                        | 1564,28 |           |   |     | 15790   | Contributi on de                   |                                | 942    | 831    | 807    | 591    | 455    | 402    | 373    | 334    | 689    | 836    | 893    | 743    | 7897    |         |   |   |  |
| 8  | Surface de planchers bas :                  | 801,69  |           |   |     | 90430   | Besoin de chaud                    |                                | 15354  | 10767  | 5073   | 57     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 4688   | 9276   | 45215   |         |   |   |  |
| 9  | Surface de toiture :                        | 537,57  |           |   |     | -28738  | Besoin de froid                    |                                | 0      | 0      | 0      | 0      | -378   | -3737  | -5774  | -3196  | -1284  | 0      | 0      | 0      | -14369  |         |   |   |  |
| 10 | Surface de baies :                          | 553,22  |           |   |     | 219860  | Cumul (kWh)                        | Jan                            | Fev    | Mar    | Avr    | Mai    | Juin   | Juil   | Aout   | Sep    | Oct    | Nov    | Déc    | Annuel |         |         |   |   |  |
| 11 | de ponts thermique                          | 1956,24 |           |   |     |         | Contributi on solaire              |                                | 4498   | 5775   | 8219   | 10426  | 12300  | 13507  | 14204  | 13275  | 10267  | 7933   | 5863   | 3666   | 109932  |         |   |   |  |
|    | Longueur de ponts thermique                 |         |           |   |     |         | Apports                            |                                | 14353  | 13098  | 14506  | 14108  | 14353  | 14108  | 13695  | 8615   | 14322  | 14353  | 13894  | 11048  | 160453  |         |   |   |  |

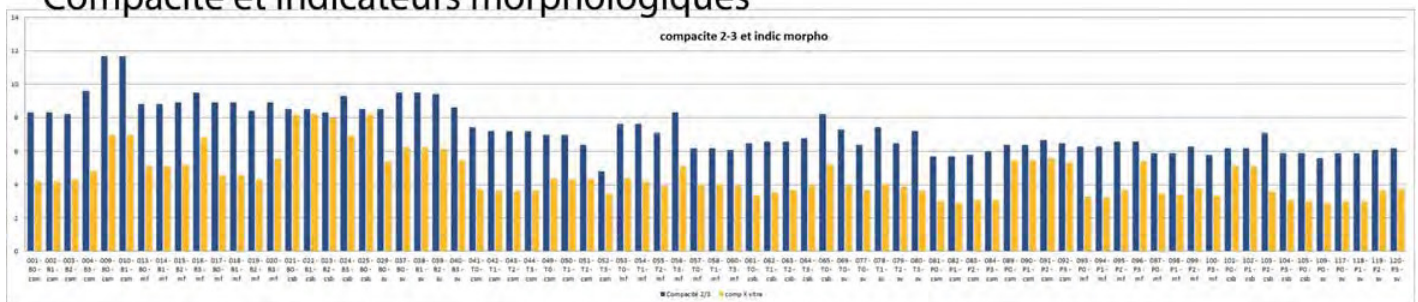
3 - Balance énergétique (Scénario 2013) / 4 - Balance énergétique (Scénario 2050)

## Création d'indicateurs pertinents

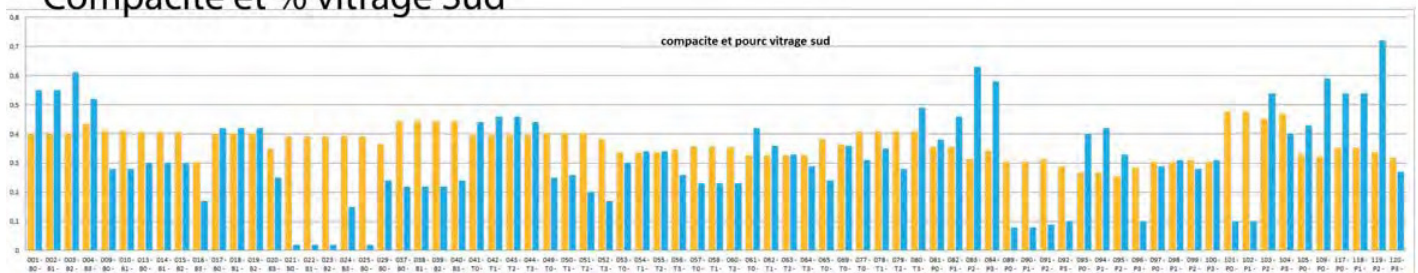
## Captage et Apports



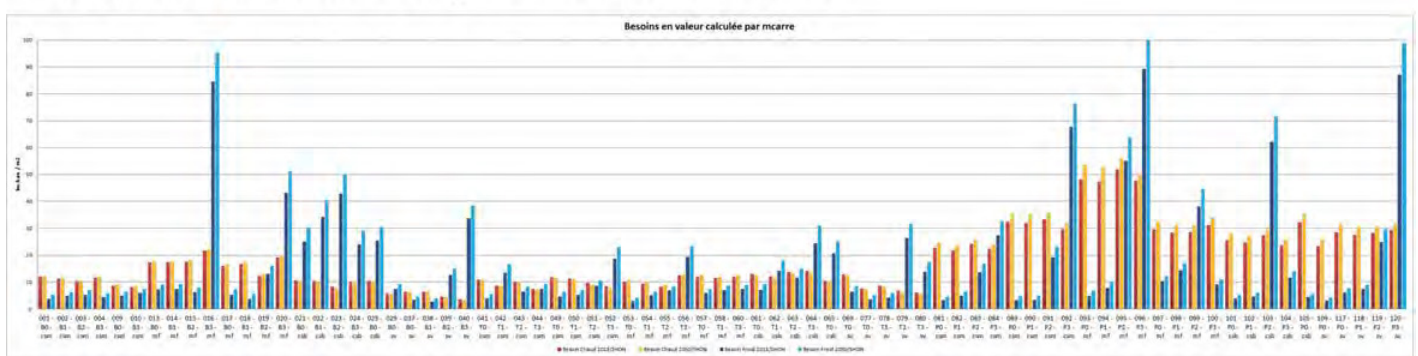
## Compacité et Indicateurs morphologiques



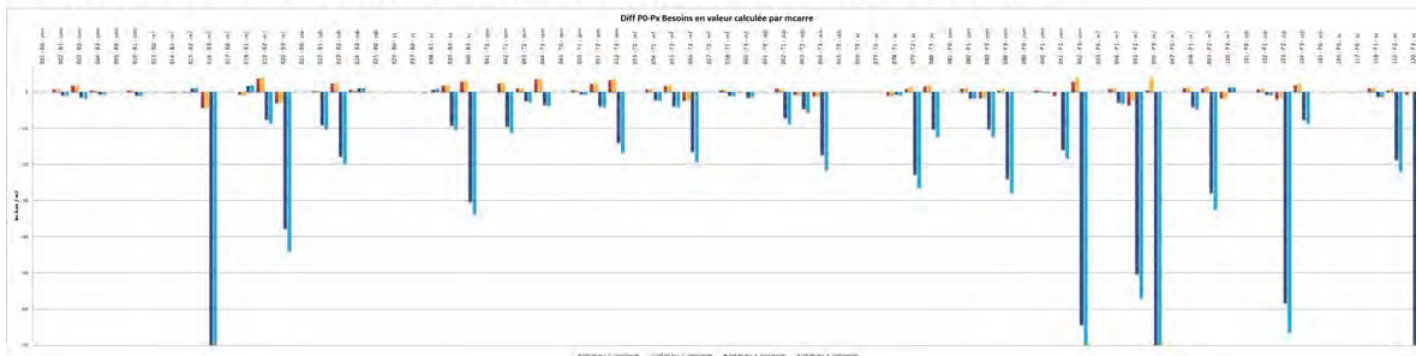
## Compacité et % vitrage Sud



## Besoins en chaud / froid par m<sup>2</sup> en 2013 et 2050



## Différence des besoins par m<sup>2</sup> entre P0 et PX en 2013 et 2050

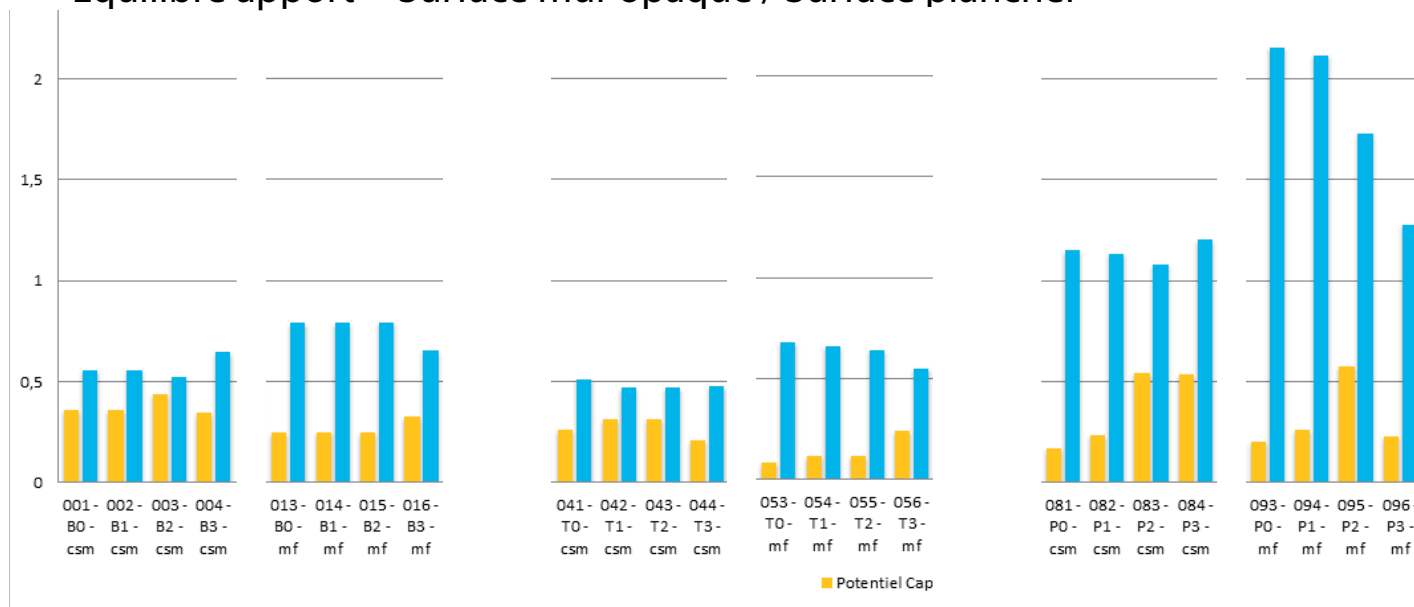


# Calcul des indicateurs

## Captage et apports

Potentiel de captage = Surface vitrée Sud / Volume chauffé

Equilibre apport = Surface mur opaque / Surface plancher

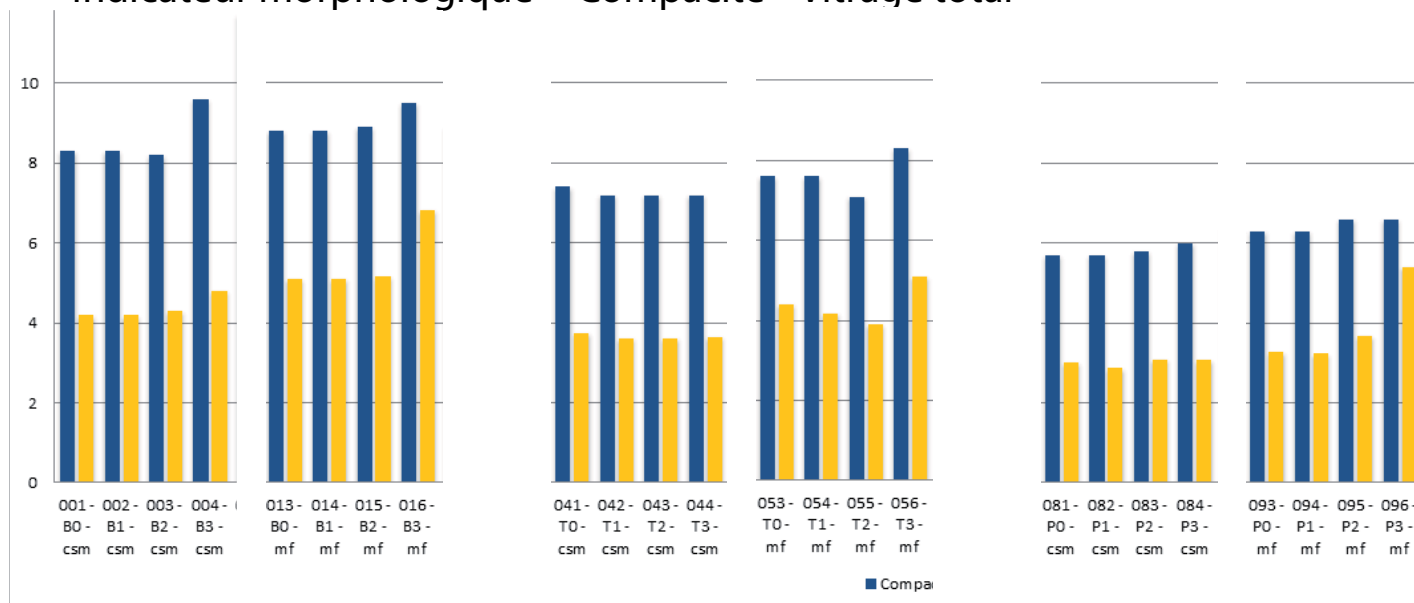


# Calcul des indicateurs

## Compacité et indicateurs morphologiques

Compacité = Surfaces déperditives / Volume chauffé <sup>2/3</sup>

Indicateur morphologique = Compacité \* Vitrage total

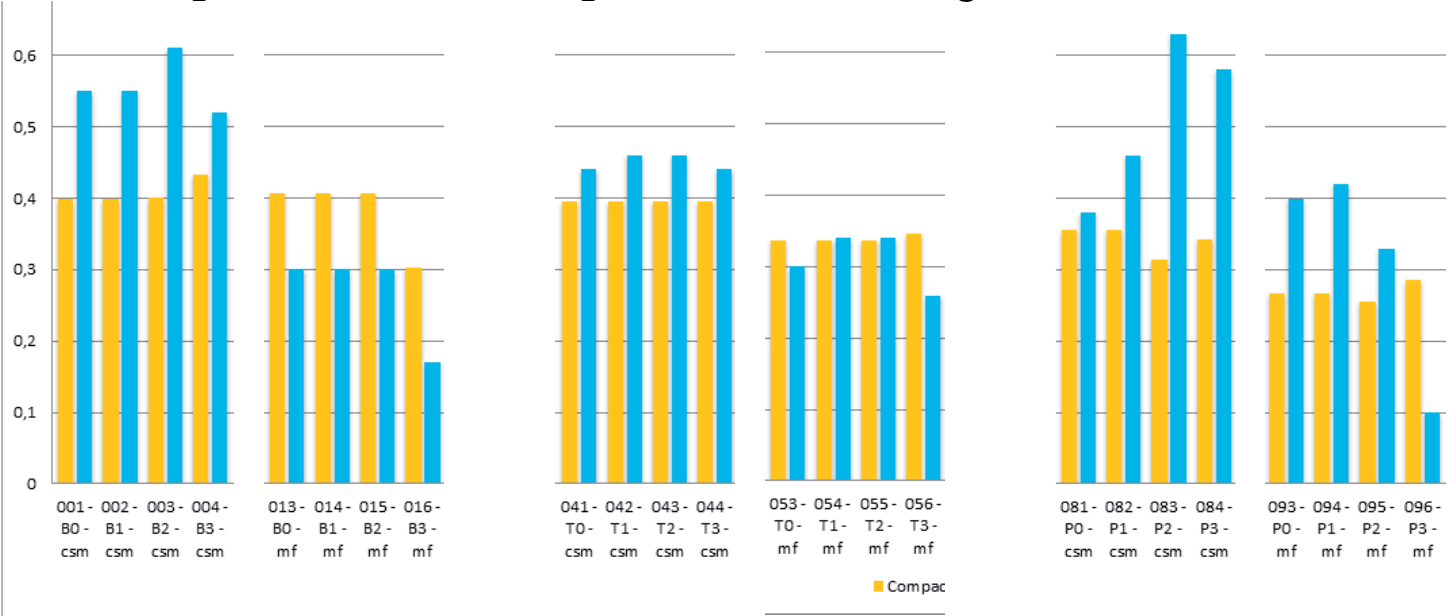


# Calcul des indicateurs

## Compacité et % vitrage Sud

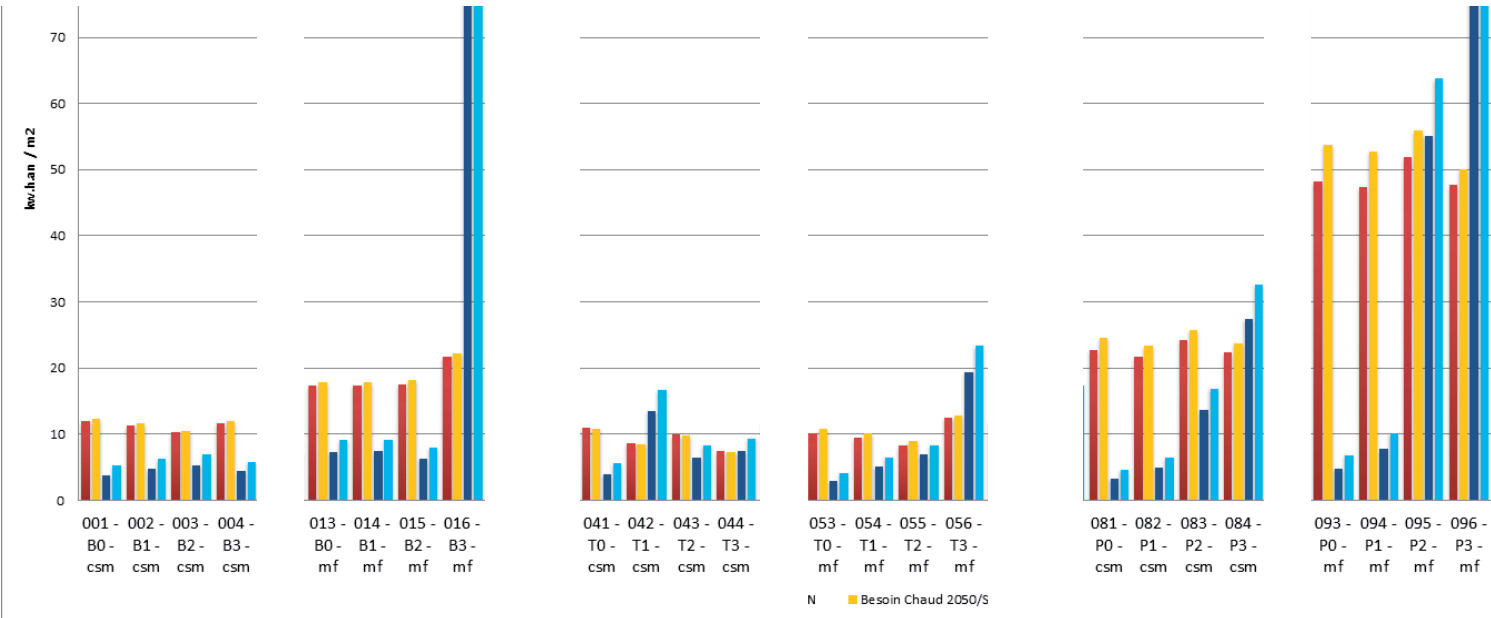
Compacité = Surfaces déperditives / Volume chauffé

% Vitrage Sud = Surface vitrage Sud / Surface vitrage total



# Calcul des indicateurs

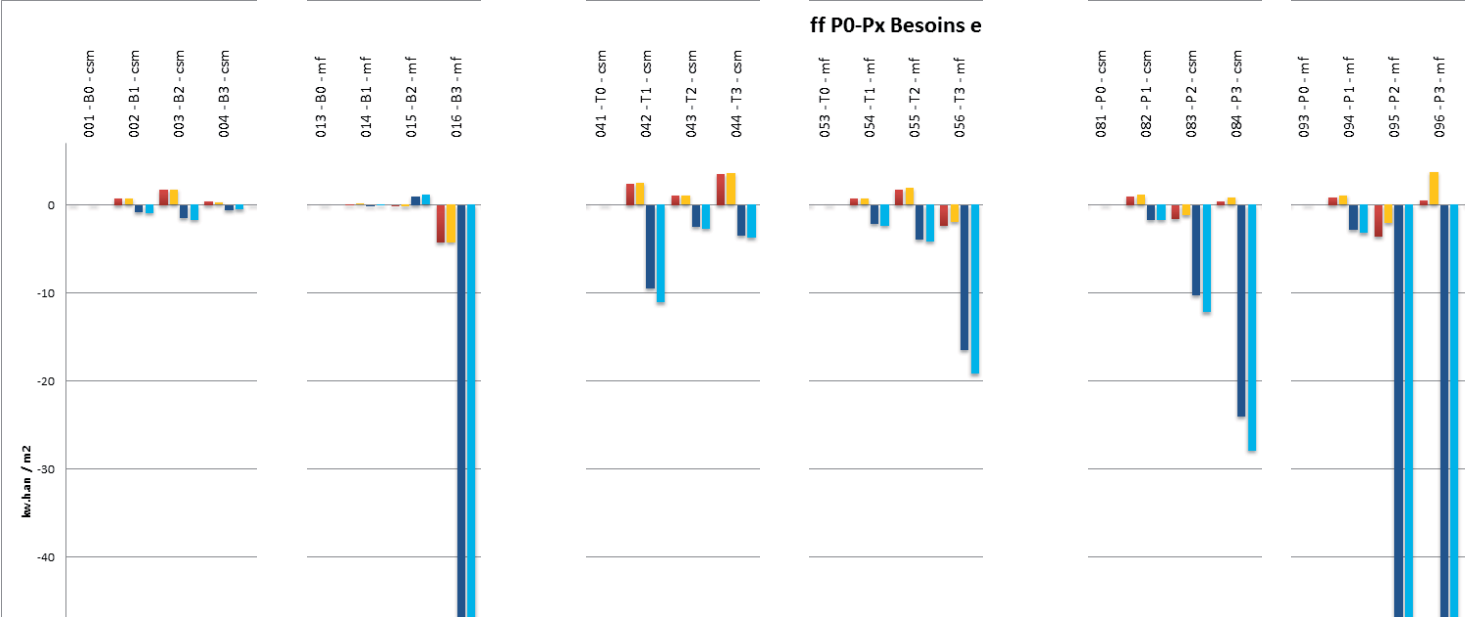
## Besoins en chaud / froid par m² en 2013 et 2050



# Calcul des indicateurs

Différence des besoins par m<sup>2</sup> entre P0 et PX en 2013 et 2050

## FORMULE



FIN





