



No d'Ordre : 4749

UNIVERSITE DE BORDEAUX 1
Ecole doctorale de Sciences Physiques et de l'ingénieur

Laboratoire GRECAU
Groupe de Recherche Environnement Conception Architecturale et Urbaine

THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
DOCTEUR

Spécialité : Mécanique
Sciences et techniques architecturales

par

Andres MORENO SIERRA

Intégration des aspects énergétiques dans la conception du projet architectural : une approche méthodologique

Sous la direction de Catherine SEMIDOR
Docteur en Sciences, professeur, ENS Architecture et Paysage de Bordeaux

Soutenue publiquement le 21 décembre 2012

Devant le jury composé par :

M. INARD, Christian	Professeur, Université de la Rochelle	Rapporteur
M. ADOLPHE, Luc	Professeur, INSA - GCU	Rapporteur
M. PUIGGALI, Jean- Rodolphe	Professeur, Université Bordeaux 1	Examineur
M. BONNEAUD, Frédéric	Professeur, ENSA Toulouse	Examineur
M. ROJAS ARIAS, Juan Carlos	MA, ENSA Toulouse	Examineur
Mme. SEMIDOR, Catherine	Professeur, ENSAPBx	Directeur de thèse
M. FAVET, Nicolas	Architecte, NFA - CIFRE	Invité

A Pedrin y Clarita

Remerciements

Cette thèse est en quelque sorte l'aboutissement d'un chemin que j'ai parcouru depuis des nombreuses années, bien avant le démarrage de ce travail de recherche. Cet instant, chargé de symbolisme n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes auxquelles je dois de la reconnaissance et ma gratitude pour leurs contributions ou leurs enseignements. Je tiens à les remercier par ordre inverse d'apparition, afin de leur accorder à tous l'importance qu'ils méritent.

A Monsieur Christian Inard, professeur de l'Université de la Rochelle et Monsieur Luc Adolphe, professeur de l'INSA à l'Université de Toulouse, pour avoir porté une attention particulière comme rapporteurs de mon travail. Ses commentaires précis, critiques et constructifs, ont enrichi le fond et ont contribué au débat sur cette recherche. Je tiens à remercier également les membres du jury, Monsieur Jean-Rodolphe Puiggali, professeur de l'université de Bordeaux 1, Monsieur Frédéric Bonneaud, professeur, et Monsieur Juan Carlos Rojas Arias, MA de l'ENSA de Toulouse pour leur intervention enrichissante et particulièrement à ce dernier pour avoir suivi le fil de ce travail. A Christian Sallenave, professeur à l'ENSAPBx, un remerciement aussi pour la grande valeur de ses mots.

A Madame Catherine Semidor, ma directrice de thèse, pour avoir suivi et guidé mon travail avec intérêt et disponibilité, malgré la distance et les difficultés. Sa confiance et son soutien m'ont permis de mener au bout cette thèse, que plus qu'un travail de recherche, à été une période enrichissante de ma vie. Je lui dois que beaucoup de respect et d'admiration pour son travail.

Je remercie également mes collègues doctorants du laboratoire GRECAU, Grace Yopez, Belal Abdelatia, Mohannad al-haj Hussein, Ahmed Khan et Fanny Gerbeaud.

A Nicolas Favet, directeur d'agence, architecte, ami, car il a fait possible l'encadrement de cette recherche dans le milieu professionnel. D'abord dans le cadre du CIFRE et plus tard comme partie intégrante de l'agence la qualité de son travail et la richesse de nos échanges a permis de mener au mieux ce projet dans une collaboration réciproque qui a porté ses fruits. Je lui dois une gratitude immense à lui et à toute l'équipe de NFA Architectes, car ils m'ont accueilli et m'ont intégré dans l'agence chaleureusement.

A Franck Boutté, directeur d'agence, ingénieur et architecte d'âme, car il m'a transmis de nombreuses connaissances dans le domaine de l'ingénierie environnementale. Il m'a inculqué la rigueur et l'esprit scientifique qui motiveraient plus tard mon intérêt pour la recherche.

A mes amis architectes, ingénieurs, chercheurs, car ils m'ont beaucoup appris. Je suis admiratif de leur travail et de leur vision de l'architecture : Miguel Cormier qui a contribué largement à ce travail à travers des discussions enrichissantes, Paul Azzopardi et Nicolas Cazenave pour leur vision unique de l'architecture et l'ingénierie, Thomas Chevron et Guillaume Reguer qui ont été toujours attentifs à mes questions. Un remerciement également à tous ceux qui ont travaillé avec moi en agence pendant ces dernières années, car la liste est longue.

Un grand merci aux retrouvailles en France ou de longue date en Colombie, heureuses découvertes des derniers temps, amis qui ont accompagné ce processus et ont supporté mon discours et mes excuses à propos de la thèse. Une petite place spéciale à Hugo, Sibylle, Ludo, Gabi, Nicolas, Chrysoula, Juanchito, Isa, Ricardo, Mile, Eduardo, Gina, Lotfi, Nicolas, Natalia, Jairo, Kremy, Diego, Irene, Hector, Maggie, Andreia et Juan Pablo. Leur soutien a été très important et valorisant.

Je voudrais également remercier mes coéquipiers des Associations Condors et Panchester International, car sans eux je n'aurais pas fini, ou j'aurais probablement fini plus vite mais j'aurais été moins heureux. Une mention spéciale pour les amis souscrits à la D.O.T.T, car ils ont fait de la dernière ligne droite un moment de détente nécessaire pour aboutir ce projet, particulièrement à Jair qui m'a fait découvrir à l'instant précis le merveilleux espace de la BNF.

A ma femme, Mafecita, qui m'a toujours donné son soutien et m'a accompagné dans les plus beaux projets de ma vie. Elle a su porter conseil en étant patiente, malgré les difficultés. Un remerciement est juste peu de chose à côté de l'amour qu'elle me donne tous les jours.

Enfin, je veux remercier ma famille. Mon père, ma mère, qui ont construit les bases de ce que je suis aujourd'hui. Sans leurs efforts au cours des longues années je ne serais pas à cette place privilégiée que la vie m'a donnée. A Diego et David, mes frères, qui pendant des longues années ont été toujours un exemple à suivre, les phares dans le chemin. Ses familles ont su remplir de joie nos cœurs avec ses enfants.

Merci à Monsieur Anthony de Avila, qui m'a montré qu'on peut toujours être vainqueurs avec de l'effort et de l'inspiration.

*« Le métier d'architecte ne disparaîtra pas ;
plutôt il se dispersera, se diffusera en un nombre
considérable de branches. »*

Le Corbusier, 1928

Résumé

Selon les objectifs d'efficacité énergétique à l'horizon 2020 en France, le secteur du bâtiment évolue vers des constructions dites à « énergie positive ». Ces nouveaux enjeux imposent l'intégration de nouvelles composantes aux aspects architecturaux et techniques, ainsi qu'une rupture dans les modes de conception et d'évaluation d'un projet. Mais la recherche de la performance énergétique dépend d'instruments numériques de mesure qui ne sont parfois pas adaptés à la démarche de conception des architectes, ce qui se traduit par la difficulté de mettre en cohérence le projet architectural et les objectifs de performance énergétique.

L'objectif de ce travail est d'analyser la complexité de l'intégration des aspects énergétiques dans les différentes phases du processus de conception, afin de proposer une démarche qui permette d'optimiser la performance énergétique. Pour étudier ces questions, nous proposons d'analyser et de reconstituer la démarche de conception de l'architecte d'un point de vue méthodologique, pour aborder postérieurement la question de l'optimisation de la performance énergétique à l'aide d'outils numériques.

L'étude du processus de conception permet d'évaluer l'impact de la composante énergie et son importance dans les phases initiales dans la démarche du concepteur. L'analyse systémique des aspects énergétiques montre l'interrelation entre les problématiques générales et les différents choix de conception. La formulation d'une stratégie de conception à travers un outil méthodologique, nous permet de proposer une démarche d'optimisation de la performance énergétique basée sur la structure morphologique du bâtiment.

Cette approche ouvre de nouvelles perspectives méthodologiques dans la conception de bâtiments à énergie positive. La complexité des relations entre l'énergie, la morphologie des bâtiments et les outils numériques seraient en train de modifier le processus de conception en architecture et la future organisation des ensembles urbains.

Mots-clés

Conception architecturale, performance énergétique, méthodologie, énergie positive, morphologie, architecture, urbanisme.

Integration of energy issues in the design of the architectural project: a methodological approach

Abstract

According to the French energy efficiency target for 2020, the building industry is moving towards "positive energy". These new challenges require the integration of new components to architectural and technical aspects, as well as a break in the methods of design and evaluation of the project. But the research for energy efficiency depends of digital measurement instruments which are not adapted to the design process of architects, which results in the difficulty of consistency between architectural and energy performance targets.

The aim of this work is to analyze the complexity of integrating energy issues in the design process, to propose a methodological approach which optimizes energy efficiency. To address these issues, we propose to analyze and reconstruct the design process from a methodological point of view, later to study the optimization of energy performance using digital tools.

The study of the design process shows the impact of the energy component and its important role in the early stages of the design process. The methodological analysis of energy issues shows the interrelation between general principles and design decisions. The formulation of a design strategy using a methodological tool allows us to propose an approach for optimizing the energy performance based on the morphological structure of the building.

This approach opens new methodological perspectives in the design of positive energy buildings. The complexity of the relationship between energy, the morphology of buildings and the use of digital tools would be changing the design process in architecture and the future organization of urban complexes.

Keywords

Architectural design, energy performance, methodology, positive energy, morphology, architecture, urbanism.

Integración de los aspectos energéticos en el diseño del proyecto arquitectónico: un enfoque metodológico

Resumen

De acuerdo con los objetivos de eficiencia energética para el año 2020 en Francia, la industria de la construcción se dirige hacia las construcciones de "energía positiva". Estos nuevos desafíos exigen la integración de nuevos componentes a los aspectos arquitectónicos y técnicos del proyecto, así como una ruptura en sus métodos de diseño y evaluación. Pero la optimización de la eficiencia energética depende del uso de herramientas digitales de medición que usualmente no se encuentran adaptadas al proceso de diseño arquitectónico, lo que dificulta la coordinación entre el proyecto arquitectónico y los aspectos energéticos.

El objetivo de este trabajo es analizar la complejidad de la integración de la componente energética en el proceso de diseño, proponiendo un enfoque que permita optimizar la eficiencia energética. Para estudiar este tema, se propone analizar y reconstruir el proceso de diseño del arquitecto desde un punto de vista metodológico, para abordar posteriormente la problemática de la optimización de la eficiencia energética a través de herramientas digitales.

El estudio del proceso de diseño muestra el impacto de la energía y su importancia de las primeras etapas del proceso de diseño. El análisis metodológico de los aspectos energéticos muestra la interrelación entre los temas principales y las decisiones de diseño. La formulación de una estrategia de diseño utilizando una herramienta metodológica permite proponer un enfoque para la optimización de la eficiencia energética basado en la estructura morfológica del edificio.

Este enfoque abre nuevas perspectivas metodológicas en el diseño de edificios de *energía positiva*. La complejidad de las relaciones entre la energía, la morfología de los edificios y el uso de herramientas digitales estarían cambiando el proceso de diseño y la organización futura de los complejos urbanos.

Palabras clave

Concepción arquitectónica, eficiencia energética, metodología, energía positiva, morfología, arquitectura, urbanismo.

Table de matières

RESUME	II
TABLE DE MATIERES	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE. LE PROCESSUS DE CONCEPTION EN ARCHITECTURE	5
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	5
CHAPITRE 1. ASPECTS THEORIQUES DE LA CONCEPTION ARCHITECTURALE	7
1.1. CREATION ET CONCEPTION ARCHITECTURALE	8
1.1.1 Sur la notion de « concevoir »	8
1.1.2. L'objet et sa représentation	10
1.1.3. Approche à la définition de la « conception architecturale »	11
1.2. LA CONCEPTION COMME PROCESSUS	13
1.2.1. Structure théorique	13
1.2.2. Conception et production	14
1.2.3. Les procédés de synthèse	15
1.2.4. La notion de projet	16
1.3. ASPECTS COGNITIFS DE LA CONCEPTION	18
1.3.1. La capture de données : la perception	18
1.3.2. Le traitement de l'information : la mémoire	19
1.3.3. La représentation des images : le raisonnement	22
CONCLUSION DU CHAPITRE	25
CHAPITRE 2. APPROCHE METHODOLOGIQUE A LA CONCEPTION	26
2.1. CARACTERISATION DU PROCESSUS : LE PROBLEME EN ARCHITECTURE	27
2.1.1. Le processus de formulation du problème	27
2.1.2. Le processus de formulation de la solution	33
2.2. MODELISATION DU PROCESSUS	38
2.2.1. L'approche numérique	38
2.2.2. La psychologie cognitive	42
2.2.3. L'architecturologie	45
2.2.4. Modèles théoriques de la démarche de conception	46
CONCLUSION DU CHAPITRE	51
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	52

DEUXIEME PARTIE. LA DEMARCHE ENERGETIQUE	53
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	53
CHAPITRE 3. LA PROBLEMATIQUE ENERGETIQUE	55
3.1. PROBLEMATIQUE ENERGETIQUE DANS LE MONDE	56
3.1.1. Facteurs de la problématique énergétique	56
3.1.2. Evolution des enjeux environnementaux à l'échelle internationale	68
3.1.3. La conjoncture actuelle et les défis à relever	71
3.2. PROBLEMATIQUE ENERGETIQUE DU LOGEMENT EN FRANCE	79
3.2.1. Evolution des modes de vie	80
3.2.2. Le concept de qualité du logement	82
3.2.3. Stratégies d'action dans le secteur du bâtiment	84
3.3. POLITIQUES D'EFFICACITE ENERGETIQUE POUR LE LOGEMENT COLLECTIF	88
3.3.1. Politiques d'efficacité énergétique en Europe	88
3.3.2. Politiques d'efficacité énergétique en France	91
3.3.3. Les réglementations thermiques	97
3.3.4. Les démarches normatives de qualité	103
3.3.5. Les labels de performance énergétique	105
3.3.6. La Haute Qualité Environnementale HQE®	107
CONCLUSION DU CHAPITRE	108
CHAPITRE 4. CONCEPTION ENERGETIQUE D'UN BATIMENT D'HABITATION	110
4.1. LA MACHINE ARCHITECTURALE	111
4.1.1. Composantes	112
4.1.2. Fonctionnement	118
4.1.3. Bilan énergétique	128
4.1.4. Le confort hygrothermique	139
4.2. STRATEGIES D'INTEGRATION DE LA COMPOSANTE ENERGETIQUE	142
4.2.1. L'approche bioclimatique : « Low - Tech »	142
4.2.2. L'approche active : le « Light - Tech »	148
4.2.3. L'approche « intégrée » : le « High - Tech » ou l'impact des nouvelles technologies	153
4.3. LES OUTILS DE CONCEPTION	155
4.3.1. Les outils d'aide à la conception	155
4.3.2. Les outils d'évaluation	155
4.3.3. Les outils « intelligents »	157
CONCLUSION DU CHAPITRE	159
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	160

TROISIEME PARTIE. APPROCHE METHODOLOGIQUE A LA CONCEPTION	162
INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	162
CHAPITRE 5. ETUDE DES ASPECTS ENERGETIQUES DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION.	165
5.1. STRUCTURE METHODOLOGIQUE	166
5.1.1. Phases d'articulation du projet	166
5.1.2. Grille d'analyse thématique	167
5.2. RECONSTITUTION DU PROCESSUS	169
5.2.1. Les phases de conception	169
5.3. ETUDE DE LA COMPOSANTE ENERGETIQUE	179
5.3.1. Phases de conception et performance énergétique	180
5.3.2. Phases de conception et performance	188
CONCLUSION DU CHAPITRE	189
CHAPITRE 6. MODELE D'OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE	190
6.1. DEMARCHE DE CONSTRUCTION DE L'OUTIL	191
6.1.1. Le potentiel énergétique	191
6.1.2. Modélisation du potentiel énergétique à l'échelle du bâtiment	196
6.1.3. Modélisation du potentiel énergétique à l'échelle urbaine	202
6.2. FORMULATION DE L'OUTIL DE CONCEPTION	209
6.2.1. Définition théorique de l'enveloppe	210
6.2.2. Structure du potentiel énergétique	214
6.2.3. Modélisation volumétrique	218
6.3. EVALUATION DE L'OUTIL	223
6.3.1. Evaluation de l'outil et des résultats	223
6.3.2. Evolution méthodologique comme instrument de conception	234
CONCLUSION DU CHAPITRE	241
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	242
CONCLUSION GENERALE	243
BIBLIOGRAPHIE	249
TABLE DES ILLUSTRATIONS	257
TABLE DES FORMULES	263
THESE - ANNEXES	265

Introduction générale

Les activités humaines ont entraîné depuis un siècle, une augmentation considérable des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, qui seraient responsables du phénomène de réchauffement climatique de la planète¹. Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), la consommation mondiale d'énergie est à l'origine de plus de 70% des émissions de gaz à effet de serre et elle devrait augmenter de 60% d'ici 2020² à cause de la croissance des pays en voie de développement.

D'après des études de l'Agence Internationale de l'Energie et la BP³, le secteur du bâtiment représenterait 24% des émissions de GES en 2004, et 32% de la consommation d'énergie dans le monde en 2008. Ce secteur possède un grand potentiel d'économie d'énergie dans les pays développés, qui devront faire face aux phénomènes de croissance urbaine accélérée. La problématique environnementale liée à la construction de logements est devenue ainsi incontournable et constitue un enjeu énergétique majeur dans des pays comme la France, où le secteur du bâtiment consomme 43% de l'énergie finale du pays et représente ¼ des émissions de CO².

Cette problématique n'est pas nouvelle. L'architecture bioclimatique est née comme une réponse des architectes aux crises pétrolières depuis les années 70, suite à l'imminence de l'épuisement des énergies fossiles et à l'importance du recours à des énergies renouvelables. Mais les nouveaux enjeux environnementaux établis pour faire face au défi du changement climatique, ont entraîné depuis les années 2000 un durcissement des réglementations au niveau énergétique. Le Grenelle de l'environnement a défini ainsi les objectifs de la France en termes de consommation d'énergie des bâtiments : une réduction de 38% de la consommation en 2020 pour les bâtiments existants et une limite de consommation de 50 kWh ep/m²/an à partir de 2012 pour tous les bâtiments neufs, ainsi que la volonté de construire dès 2020 des bâtiments qui produisent plus d'énergie qu'ils en consomment, dits à « énergie positive » (BEPOS). Ceci impose une réflexion sur la conception des nouveaux bâtiments performants.

1 Selon le rapport du Groupement International d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC),

2 Selon rapport de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE)

3 AIE, Energy Balance for World , BP Statistical Review of World Energy 2009 (chiffres 2008)

Contexte de la recherche

Ce travail de recherche est issu d'une réflexion sur la conception architecturale à partir de l'expérience professionnelle dans le secteur du bâtiment et plus particulièrement dans la maîtrise d'œuvre, intégrant des équipes de conception pour la construction de projets architecturaux et urbains. Cette expérience est fondée sur un double parcours, reliant l'architecture et l'ingénierie environnementale au service du développement durable.

La première partie de ce parcours, réalisée dans une agence d'ingénierie environnementale⁴, nous a permis d'initier une réflexion sur la composante énergétique dans l'architecture d'un point de vue technique. La deuxième partie, qui fait l'objet de cette thèse, a été menée au sein d'une agence d'architectes pour nous interroger sur les aspects énergétiques et le processus de conception architecturale.

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation pour la Recherche) dans un partenariat de recherche entre l'Ecole doctorale de Sciences Physiques et de l'ingénieur de l'Université de Bordeaux 1, l'agence *NFA Architectes*⁵, et le laboratoire GRECAU (Groupe de recherche sur la conception architecturale et Urbaine) de l'ENSAPBx.

L'agence *NFA Architectes* a développé une expertise dans le domaine de la Qualité Environnementale depuis ses débuts au milieu des années 90, participant activement dans des programmes de recherche et dans la conception durable des projets architecturaux.

Dans le cadre du PREBAT (Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans le Bâtiment), l'agence NFA a répondu à l'*appel à idées* CQHE lancé par le PUCA⁶ en 2008, en s'appuyant sur l'idée de développer une *démarche* de conception innovante pour développer des bâtiments d'habitation à énergie positive.

⁴ FBC : Franck Boutté Consultants

⁵ NFA, Nicolas Favet Architecture

⁶ PUCA : Plan Urbanisme Construction Architecture est un service interministériel rattaché à la Direction générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature (DGALN) au Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et du Ministère de l'Egalité des territoires et du Logement. C'est une agence nationale de la recherche et de l'expérimentation dans les domaines de l'urbanisme de l'architecture et de la construction. Source : <http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr>.

Ce travail de thèse a été donc encadré dans un contexte de production d'un outil de conception. Cependant, l'objectif de ce travail est de contribuer à la réflexion sur l'intégration des aspects énergétiques au processus de conception architecturale dans sa globalité. Ceci explique la double approche de notre travail : une contribution d'ordre méthodologique centrée sur le processus de conception, et une approche d'ordre technique et opérationnelle centrée sur la construction d'un outil destiné aux architectes pour la mise en œuvre de bâtiments de logements performants.

Objectifs

Ce travail de recherche constitue ainsi une approche méthodologique à la problématique de *l'intégration de la composante énergétique* dans la *conception* des logements collectifs, en s'appuyant sur les aspects techniques et opérationnels d'un bâtiment d'habitation. Certes cette réflexion oblige à traiter la relation entre énergie et confort des usagers, mais elle est principalement centrée sur la liaison entre la *conception architecturale* et la *consommation énergétique*. L'objectif est de comprendre le processus de conception et la complexité de l'intégration des aspects énergétiques, afin de proposer une démarche qui permette *d'optimiser* la performance énergétique finale du projet.

Nous avons centré notre recherche sur les bâtiments d'habitation en raison de la demande de l'appel à idées CQHE. Par ailleurs, la conception de logements collectifs exige une réflexion sur l'urbanisme et ses aspects réglementaires, dans une logique de croissance et développement durable des villes. Le logement collectif joue un rôle crucial dans les stratégies de densification urbaine en vue de limiter la consommation d'énergie et les émissions de GES liées aux déplacements dans les villes durables.

Problématique

La conception d'un projet correspond à la recherche d'une solution dans un processus constitué par différentes phases. Il est avéré que la définition générale de la performance a lieu dès les premières esquisses de l'architecte, car elles vont tracer les lignes générales du projet, mais son comportement énergétique dépend de plusieurs facteurs comme le contexte climatique, l'usage, la forme, et la matérialité du bâtiment. L'optimisation de la performance du bâtiment a recours à des outils numériques qui ne sont pas toujours adaptés aux architectes. L'incorporation des variables liées à l'énergie dans le processus de conception a multiplié le nombre de variables à prendre en compte par les concepteurs, ce qui rend difficile l'évaluation

en amont de la pluralité de solutions dans la recherche de l'optimisation du projet. Les nouveaux enjeux énergétiques imposent donc une rupture méthodologique et une réflexion sur les nouveaux modes de conception d'un projet.

Pour étudier ceci, il est question d'abord de se pencher sur la compréhension et l'observation du processus de conception en architecture. La première partie de ce travail propose d'analyser ce processus à travers l'étude des différentes visions et interprétations relatives à la *conception* d'un projet. Cette approche fonde une base méthodologique qui permet de *reconstituer* la démarche de conception d'un bâtiment de logements, en s'appuyant sur différentes expériences acquises sur le terrain.

La deuxième partie présente les différentes composantes de la problématique énergétique. Une vue générale sur les enjeux énergétiques et l'état de l'art des bâtiments résidentiels à basse consommation permet d'explorer les différentes stratégies et technologies utilisées dans la conception de logements à haute efficacité énergétique, ainsi que l'évolution des instruments numériques d'aide à la conception en relation avec les démarches de certifications énergétiques. Dans cette même idée, les relations entre les composantes énergétiques et les notions de confort d'un logement peuvent être étudiées à travers la simulation thermique, afin de comprendre l'impact et la complexité de leur intégration dans le processus de conception.

La troisième partie du travail étudie l'intégration des aspects énergétiques dans les phases initiales du processus à travers la mise en place d'un outil numérique qui permet d'évaluer l'efficacité énergétique du projet et d'optimiser la performance énergétique. L'intégration de cet outil constitue un apport méthodologique à l'optimisation de la performance énergétique, à partir de la modification de la structure morphologique d'un bâtiment. Cette réflexion nous permet d'amorcer une discussion sur le rôle de l'architecte dans l'évolution de ce processus vers les nouveaux instruments technologiques d'aide à la conception et ouvre des nouvelles perspectives sur les logiques d'organisation des ensembles urbains denses.

Première partie. Le processus de conception en architecture

RESUME: Dans cette première partie nous définirons tout d'abord la notion de « conception » à partir des constructions intellectuelles de Vitruve (Ier siècle av. J.-C.) et d'Arnauld (1622), pour nous pencher ensuite sur les nombreux textes modernes écrits à propos de la « conception architecturale » afin de constituer une base théorique qui nous permette de comprendre ses différentes composantes. L'étude sera centrée postérieurement sur les perspectives ouvertes par les travaux de Conan (1990) et Prost (1992) en ce qui concerne leurs approches méthodologiques à la compréhension des mécanismes de fonctionnement du processus de conception d'un projet. Ces fondements nous permettront de proposer une reconstitution pratique des différentes phases de ce processus qui nous permette de faire le lien dans la deuxième partie, avec les aspects énergétiques d'un projet.

Introduction de la première partie

L'architecture est une discipline qui se situe au carrefour des arts et des sciences. Longtemps perçue comme intuitive ou aléatoire, la « conception architecturale » peut être également méthodique et raisonnée. L'architecte - disciple des artistes, philosophes et mathématiciens – a recours à un large domaine de connaissances, et s'appuie sur des fondements théoriques et empiriques pour concevoir un projet. Ce mécanisme constitue ainsi la base de ce qu'on peut définir comme un « processus ».

Bien que la connaissance de l'architecture ait suscité des réflexions depuis des siècles, la problématique de la « conception architecturale » fait l'objet – depuis quelques décennies – de nombreuses études qui s'intéressent à l'analyse, la compréhension, la modélisation, ou la reformulation de ce processus.

Plusieurs travaux ont constitué le point de départ de notre étude, notamment les réflexions à propos de la *pensée architecturale* [Conan, 1990], l'approche méthodologique sur

les *processus* de conception [Prost, 1992], l'analyse la complexité de la conception à travers *l'architecturologie* [Boudon (1992, 1994)], l'étude de la problématique de la *représentation* [Lebahar 1983]⁷ et la vision *empirique* de la conception des projets [TRIC 1999].

L'ensemble de ces réflexions répond à l'évolution de l'architecture dans une période caractérisée par les importantes avancées de la technique, des technologies, des outils et des *modes* de conception. Le développement des instruments informatiques a introduit –entre autres- des problématiques relatives à la systématisation des procédés tels que la modélisation des formes des bâtiments ou la représentation des images.

Ce travail de recherche est fondé plus particulièrement sur les apports concernant la *compréhension* du processus de conception [Prost, 1992], [Conan, 1990] et s'appuie sur les approches de certains *mécanismes de modélisation* [Raynaud, 1992] [Boudon, 1994], afin de fonder une base méthodologique qui permette de *reconstituer* ce processus dans le cas particulier de la conception de logements collectifs.

L'objectif de cette première partie est ainsi de *comprendre et décomposer* la démarche de conception de l'architecte, pour *reconstituer* ses différentes parties et faire le lien avec les composantes énergétiques qui impactent la performance du projet.

Le premier chapitre explore les éléments qui conduisent à la compréhension du processus de conception en ce qui concerne ses aspects théoriques et cognitifs. Le deuxième chapitre porte plus particulièrement sur le processus de conception architecturale d'un point de vue méthodologique. Nous chercherons à *reconstituer* l'ensemble du processus en établissant une traduction des différentes phases sous la forme de *critères* de conception.

A partir des réflexions sur le fonctionnement du processus de conception, la deuxième partie de la recherche fera lien avec les aspects énergétiques qui sont mis en place dans un bâtiment pour aborder en troisième partie la question de leur intégration dans une approche méthodologique au projet.

⁷ LEBAHAR, J.C. (1983), *Le dessin d'architecte – simulation graphique et réduction d'incertitude*. Collection architecture outils. Paris, Editions Parenthèses.

Chapitre 1. Aspects théoriques de la conception architecturale

« On appelle concevoir, la simple vue que nous avons des choses qui se présentent à notre esprit, comme nous nous représentons un soleil, une terre, un arbre, un rond, un carré, la pensée, l'être, sans en former aucun jugement exprès ; et la forme par laquelle nous nous représentons ces choses s'appelle idée. »

Arnauld (1662)

Dans l'architecture la science et l'art et se confondent. Depuis des siècles, « l'art de construire » à recours à une multiplicité de connaissances scientifiques, fait l'objet de réflexions théoriques et aborde des problématiques philosophiques. Fondé sur des principes mathématiques et des lois de la physique, il a également une relation étroite avec les formes de production des différents arts. Tous ces éléments constituent les fondements de la complexité de l'architecture.

La « conception architecturale » en tant que mode de production artistique ou de « création » de l'homme, est ainsi associée à un procédé aléatoire, mystérieux ou indicible. Cependant, l'étude de ses fondements théoriques permet de comprendre que c'est un procédé qui peut être également logique et raisonné.

Dans ce chapitre il est question de montrer la pertinence de l'étude de la définition de « conception » d'un point de vue théorique, d'analyser le concept de « processus » dans la démarche de l'architecte et de porter un regard sur les aspects *cognitifs* de la « conception architecturale ».

1.1. Création et conception architecturale

« Toute création est, à l'origine, la lutte d'une forme en puissance contre une forme imitée » écrivit André Malraux en essayant de définir la création artistique [Malraux, 1950]. La notion de « conception » a suscité de nombreuses réflexions à travers l'histoire. Elle a été l'objet de réflexions théoriques et pratiques qui ont tenté de comprendre les mécanismes de la pensée créative de l'homme et la complexité d'une démarche commune aux scientifiques, artistes et philosophes.

L'architecture -comme art premier [Souriau, 1947] - n'échappe pas à cette tentative. La création architecturale est aussi une forme de représentation du monde extérieur et ses mécanismes sont souvent complexes. Comprendre donc les fondements théoriques de la « conception » nous permettra d'aborder les problématiques inhérentes à la « conception architecturale ».

1.1.1 Sur la notion de « concevoir »

La notion de *conception* est souvent un fait indicible ou mystique, mais il est toujours associé à un acte de *création*. De nombreux textes religieux ou scientifiques ont été écrits à travers l'histoire à ce propos, mais ils coïncident tous sur une notion commune : *l'idée*. Ainsi, d'un point de vue théologique *l'idée* d'une divinité serait à l'origine de la *Création* : Dieu serait l'artiste de l'univers. Dans la mythologie grecque (Pausanias) l'artiste serait un homme qui se verrait apporter *l'idée créatrice* ou « l'art poétique » envoyé par les divinités à travers trois *muses* : Aédé, Méléte et Mnémé, soit la *voix*, la *méditation* et la *mémoire*.

Cette vision de l'art sera contestée après la Renaissance en associant la « capacité à créer » d'un artiste, aux sciences cognitives. La notion de « *création* » ne sera plus revêtue d'un caractère mystique, mais elle constituera une *forme de pensée* ou, comme l'expose Antoine Arnauld—philosophe et mathématicien— dans « *La logique ou l'art de penser* », *l'idée* serait une « forme de représentation » des choses qui se présentent devant nous [Arnauld, 1622]. Ce sont les hommes qui interprètent et représentent le monde à travers un processus *logique*, qui repose « sur les quatre principales opérations de leur esprit, *concevoir*, *juger*, *raisonner* et *ordonner* ».

Depuis, de nombreux écrivains, philosophes et scientifiques essayent de comprendre le « processus créatif » à travers la *pensée*. Ainsi l'artiste mettrait en place un *mécanisme logique* ou un *processus* par lequel il arrive à *créer*, sous la forme d'une *idée*.

Dans cette définition du *processus créatif*, l'art et la science se confondent. La *logique* est le principe qui permet de relier les propos exposés par Arnauld concernant la « pensée » et les « opérations de l'esprit » [Arnauld, 1622]. La *Pensée* est une opération *logique* qui serait divisée en quatre parties : imaginer, proposer, assembler et organiser. La description de cette démarche correspond à une procédure dont les règles opèrent de la même façon dans le domaine scientifique et artistique.

Un des premiers à traiter cette question a été René Descartes dans son *Discours de la méthode* [Descartes, 1637]. Bien que les fondements de la *logique* constituent la base du raisonnement scientifique, il fonde son discours sur la *raison* dans une réflexion *méthodique* dans la recherche d'une « vérité des sciences » et d'une « vérité métaphysique ». C'est à travers le cheminement de la raison que l'homme accéderait à des sciences comme les mathématiques ou la philosophie, mais également à d'autres sciences comme la *poésie* qui se rapprochent plus du domaine des arts. Cependant, ces sciences « nobles » auraient plus recours à une composante appelée « bon sens » -ou la capacité de juger- et qui seraient du ressort du *don* chez les individus. Cette composante subjective dans le raisonnement constitue un élément clé dans tout processus créatif.

Même si la *logique cartésienne* présente les mécanismes de la pensée comme un processus *méthodique*, l'importance de son postulat repose sur la singularité du raisonnement de chaque individu. Cette prémisse est une contribution importante aux travaux scientifiques et philosophiques sur la pensée, car elle expose la difficulté d'inscrire dans cette logique certains domaines qui se rapprochent des sciences et des arts comme l'architecture, qui font appel aux sciences cognitives et qui sont ainsi caractérisées par des composantes subjectives.

Loin de faire une approche philosophique aux *formes de la pensée*, l'objectif est de mettre en relation les différents concepts relatifs aux domaines des sciences et des arts qui composent la conception. C'est ainsi qu'on retrouvera les notions de *création*, *idée*, *pensée*, *processus*, *logique*, *méthode*, *raison* et « bon sens ». Ces concepts constituent les fondements de la réflexion et ils permettront de proposer une définition qui servira de point de départ à l'approche théorique sur les différents mécanismes du « processus de conception ».

1.1.2. L'objet et sa représentation

L'architecture constitue un terrain fertile pour les réflexions sur la « conception » depuis des siècles. Ce n'est pas un hasard que « l'art de construire des édifices », étant situé lui-même au carrefour des arts et des sciences, ait suscité les premières théories à ce propos. Vitruve (Ier siècle), définissait ainsi dans « *De architectura* » [Vitruve, Ier S.] :

« *Architecti est scientia pluribus disciplinis et variis eruditionibus ornata, cuius indicio probantur omnia, quae ab ceteris artibus perficiuntur opera. Ea nascitur ex fabrica et ratiocinatione. Fabrica est continuata ac trita usus meditatio, qua manibus perficitur e materia cuiuscumque generis opus est, ad propositum deformationis. Ratiocinatio autem est, quae res fabricatas sollertia ac ratione proportionis demonstrare atque explicare potest.* ».

« L'architecture est une science qui embrasse une grande variété d'études et de connaissances ; elle connaît et juge de toutes les productions des autres arts. Elle est le fruit de la pratique et de la théorie. La pratique est la conception même continuée et travaillée par l'exercice, qui se réalise par l'acte donnant à la matière destinée à un ouvrage quelconque, la *forme* que présente un *dessin*. La théorie, au contraire, consiste à démontrer, à expliquer la justesse, la convenance des proportions des objets travaillés ».

La pluridisciplinarité de l'architecture est à l'origine de sa complexité. Non seulement elle est mise en relation des aspects physiques et mathématiques, mais elle touche également aux différents arts en s'appuyant sur des concepts philosophiques comme *l'esthétique*. Pour comprendre la source et les formes de production architecturale on doit regarder de plus près la définition de Vitruve. C'est ainsi qu'il souligne les composantes du métier -qu'il appelle « Les qualités de l'architecte »-, en s'appuyant sur l'importance du rapport entre *théorie* et *pratique*. En effet, ces deux aspects sont complémentaires dans la conception architecturale, mais cette relation est importante car elle met en valeur une deuxième composante : il s'agit du rapport entre *forme* et *dessin*.

Vitruve fait ainsi référence à la *forme* en décrivant un objet réel, tandis que le *dessin* est une image, une construction théorique ou une forme de *représentation* de cet objet. Cette relation entre *l'objet* et *l'objet représenté* constitue un élément essentiel dans la compréhension des mécanismes de production d'un projet en architecture. En effet, cette notion d'*objet* correspondrait à un bâtiment construit et la notion d'*objet représenté* correspondrait à l'*idée* exposée dans les propos d'Arnauld sur la *conception* [Arnauld, 1622].

La conception embrasse toutes sortes de représentations, qui peuvent être abstraites ou concrètes, comme le cas du dessin. Mais c'est le rapport entre l'*idée* et l'*objet* qui nous intéresse. La compréhension de ces concepts nous permet d'établir les fondements théoriques de la conception en architecture.

1.1.3. Approche à la définition de la « conception architecturale »

Essayer de définir la « conception architecturale » peut devenir un exercice aussi complexe que comprendre ses mécanismes. Certes, l'intérêt pour la nature de la « conception » a donné lieu à des essais de compréhension et de formulation de différentes « définitions » de la conception architecturale. On distinguera celles de l'antiquité à la Renaissance, avec les formulations de Vitruve, De Vinci et Palladio basées sur l'importance de *l'expérience* et la *pratique*. Les réflexions sur la *pensée* du XVII^{ème} siècle [Arnauld, 1622], [Descartes, 1637] ont marqué le début des travaux sur la compréhension des mécanismes de conception dans différents domaines scientifiques et artistiques.

L'apparition des outils informatiques dans les années soixante a influencé les travaux sur la conception architecturale assistée par ordinateur [Alexander, 1964] et a ouvert la voie à des approches méthodologiques. D'autres postulats intégreront les aspects cognitifs au processus de conception [Faux, 1981] ; [Tidafi, 1996] ; [Chupin, 1998] ; [Fernandez, 2002], étant confrontés à l'impossibilité de simuler la démarche créative de l'architecte de façon purement scientifique. Cette relation entre processus méthodologique et démarche aléatoire de conception se situe au cœur de notre réflexion. Avant d'approfondir cette question, il est important de décrire cette démarche non pas dans l'objectif de formuler une définition unique, mais de mettre en relation un ensemble de notions qui apparaîtront postérieurement dans l'analyse du processus de conception.

A partir de ces réflexions on peut définir la conception architecturale comme un *processus d'invention* par interprétation du monde extérieur à travers la *pensée*. Dans un raisonnement *logique* ou *méthodologique* et en faisant appel à des aspects cognitifs, ce processus permet d'imaginer, de proposer, d'assembler et d'organiser différents éléments, afin de construire une forme de représentation appelée *idée*. Cette *idée* peut être également représentée sous plusieurs formes comme des *images* dont et leur synthèse permettra de les évaluer et de constituer le *projet*.

Cette définition, nous permet de mieux aborder la problématique de la *conception* car elle décrit un certain nombre d'opérations sans pourtant décrire ses mécanismes. C'est en décomposant les différents aspects de cette définition que nous pouvons aborder la problématique de la logique et les mécanismes de la conception architecturale. Avant d'aborder les aspects cognitifs de la conception architecturale, il est important d'étudier la notion de « processus » afin de comprendre la nature de la démarche dans le cadre de la résolution d'un « problème » architectural.

1.2. La conception comme processus

Dans les différentes réflexions à propos de la *logique* de la pensée dans la recherche d'une *idée* de projet, on retrouve un aspect commun : toute *démarche* logique entraîne une suite d'opérations à la recherche d'une solution dans un procédé qu'on peut appeler *processus*. Ces deux composantes apparaissent soit sous la forme d'une *démarche* d'acquisition des connaissances par la pratique, soit par un *processus* de réflexion, organisation et formulation d'une idée de projet. Il n'existe pas une définition unique de conception architecturale, car leurs approches peuvent être très différentes.

1.2.1. Structure théorique

A partir des approches à la définition de la *conception architecturale* on peut considérer une structure théorique dans laquelle - à travers une suite d'opérations d'association d'éléments dans une représentation subjective du monde extérieur - il y a pour objectif de constituer une *idée* de projet (Fig.1).

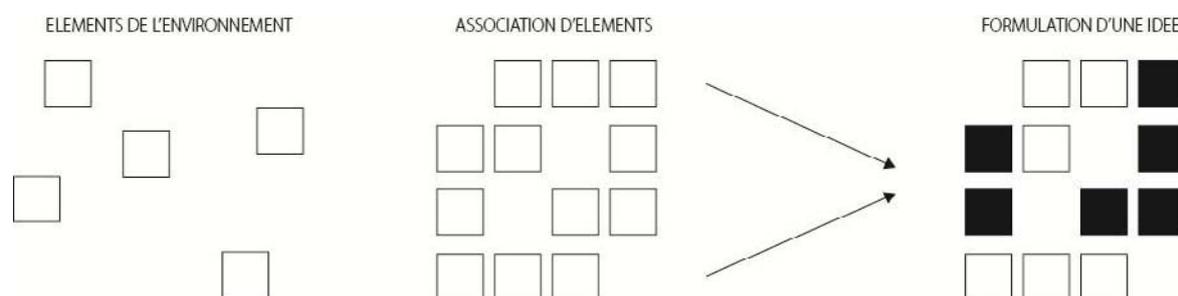


Figure 1. Structure théorique de la conception

Cette approche nous permet de mieux comprendre la structure de la démarche de l'architecte dans la réalisation d'un projet. En effet, elle consiste à organiser différents éléments afin de *concevoir* une *idée* que nous appellerons *schéma*, de la développer postérieurement et de la *synthétiser* sous la forme d'un *objet* construit : l'édifice.

Vitruve fait référence à cet objet comme une *matière* qui prend la *forme* représentée dans le dessin. Mais ce dessin est l'aboutissement de l'association d'éléments qui ne sont pas constitués de la même matière. Ainsi le dessin peut évoquer une forme autre que celle d'un bâtiment ou une matière autre que celle de la pierre. Cette relation idée/objet peut se traduire également dans la dichotomie conception/production.

En effet ces deux types de relations ont plusieurs aspects en commun et peuvent être décrits à partir de la notion de processus. Dans un premier temps les deux relations correspondent à des procédés de synthèse de l'information : plusieurs informations d'entrée sont assemblées en un résultat final.

Dans un deuxième temps, la production est le résultat d'une série d'activités individuelles et collectives, ou plutôt la somme d'activités individuelles. La coordination de ces opérations individuelles correspond au travail des différents acteurs dans le processus de développement d'un projet.

On retrouvera la notion de processus en ce qui concerne la « production » d'un produit. C'est ainsi que les définitions modernes du terme « processus » renvoient à la notion de « processus de production » dans une logique industrielle. D'une certaine façon, la réalisation d'un projet en architecture peut être assimilée à la production d'un produit : l'objet architectural.

1.2.2. Conception et production

Considérons d'abord la structure générale de la conception architecturale à partir de la formulation de Prost qui distingue cinq phases dans la *conduite d'une opération* et qui permettent d'aboutir à la construction d'un bâtiment (Fig.2) [Prost, 1992].

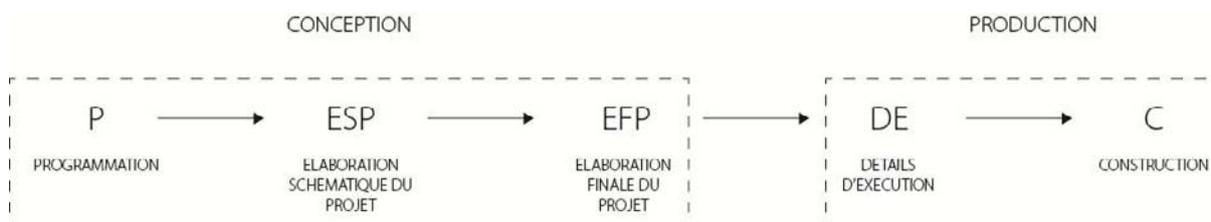


Figure 2. Schéma de la Conduite d'une opération en architecture selon Prost (1992).

La phase de *programmation* (P) est une étape préliminaire, mais elle est essentielle au fonctionnement du processus. Dans le *programme* du projet sont établis les enjeux, les objectifs, les composantes et les exigences techniques du bâtiment. C'est une phase préalable à la conception du projet mais son importance repose sur la définition des « conditions limite » du projet à développer.

Dans la phase d'*Elaboration Schématique du Projet* (ESP) l'architecte détermine les grandes lignes de conception. C'est dans cette phase que sont mis en place les différents mécanismes opérateurs de la pensée et les aspects cognitifs liés à la génération d'une idée.

Notre travail se focalisera sur cette phase car nous verrons que la schématisation de certains aspects comme l'*orientation* ou la *forme* du bâtiment, déterminera en grande mesure la performance énergétique du projet.

L'*Elaboration finale du projet* (EFP) est une phase de définition des composantes spatiales et techniques d'un bâtiment. Cette étape est revêtue d'une importance particulière en ce qui concerne la définition de la *matérialité*, mais elle ne remettra pas en question le *parti* adopté ou les choix de conception de la phase schématique (ESP).

Ces trois premières phases constituent essentiellement le cœur de notre réflexion. Les deux dernières phases DE – C (détails, construction) correspondent à des étapes d'exécution, dans lesquelles tous les éléments et composantes matérielles qui ont été préalablement définies, vont être détaillées et mises en œuvre.

Cette structure générale dans laquelle l'objectif final est l'objet construit, correspond à un « *process* de production d'un projet » [Levy, 2008]. Mais on constate également que la démarche de l'architecte est une approche ambivalente, car elle suit une logique de *conception* et une logique de *production*. Nous étudierons toutes les phases dans la deuxième partie de la recherche de façon plus détaillée, mais nous nous concentrerons essentiellement sur les trois premières phases qui correspondent à la *conception* proprement dite. Pour bien comprendre ces positions, il faut tout d'abord rappeler que la *conception* est en effet une question complexe.

1.2.3. Les procédés de synthèse

En premier lieu, nous pouvons établir la notion de *processus* en ce qui concerne la *programmation*. Cette phase de *définition* des objectifs, est aboutie après un procédé de synthèse des différentes données du projet telles que les besoins du maître d'ouvrage, les conditions du terrain disponible, les concepts à développer, les ressources humaines et/ou économiques, les conditions de qualité exigées et la durée prévisionnelle totale. Cette étape exige une analyse préalable des données et donne lieu à une étude de *faisabilité*. Ce qui nous intéresse est précisément cette procédure d'analyse et de synthèse car toutes les décisions prises à ce stade vont déterminer irréversiblement le projet.

Une deuxième question correspond à la notion de *processus* par rapport à l'*élaboration* du projet. L'élaboration schématique et l'élaboration finale ne sont que deux

stades d'un même procédé de conception, dans lesquelles sont synthétisés des *choix de projet*. Dans la phase schématique il existe un énoncé de base (synthèse de la phase de programmation), qui permettra de développer le projet et parfois constituera directement une référence [Conan, 1990]. Mais à partir de cet énoncé de base il y aura une chaîne logique de décisions (implantation, typologie, etc..) qui vont à la fois se multiplier (dans un schéma d'arborescence) dans une grande quantité de choix de projet (orientation, morphologie, etc.). Nous verrons que cette structure « décisionnaire » n'est pas linéaire et qu'au contraire chaque décision au stade antérieur est remise en question par tout choix réalisé dans une phase postérieure [Prost, 1992]. On parlera ainsi de *processus itératif*.

En troisième lieu, la question de la structure de *production* du projet relève également de la notion de processus de synthèse. On parle de *processus de production* quand évoque l'exécution d'un plan préalablement défini qui verra consigner dans ces dernières phases les différentes instructions pour la construction du bâtiment. Cependant ces instructions ne sont que des définitions détaillées des choix de projet établis antérieurement : le processus de conception en soi même ne sera plus remis en question. Nous distinguerons la phase de dessin des plans d'exécution et la phase de construction. Si nous nous concentrerons sur les phases de conception, nous verrons que la définition des plans d'exécution peut être assimilée également à un processus industriel. L'ensemble de ces phases peut être défini soit comme une forme de production, soit comme l'objet même : on parlera ainsi de la notion de *projet*.

1.2.4. La notion de projet

La notion de projet en architecture correspond à la fois au processus proprement dit et à l'aboutissement de celui-ci en tant qu'objet architectural. Cette distinction est importante car elle met en relation deux dimensions de la conception architecturale : une dimension conceptuelle et une dimension matérielle. Dans un premier temps on pourrait affirmer que la dimension matérielle est l'aboutissement de la dimension conceptuelle, de la même façon qu'on distingue l'image du projet de l'idée génératrice. Dans ce cas l'image est associée à la définition de l'ensemble de dessins qui permettent la construction de l'objet. L'idée ne serait qu'une forme de représentation conceptuelle de la solution d'un problème architectural.

Mais cette relation entre projet-démarche et projet-objet est plus complexe d'autant qu'elle intègre plusieurs acteurs dans la conception et qu'elle inclut une dimension temporelle : on parlera de co-conception dans un processus qui s'étend dans le temps. En

effet, le projet en architecture est une activité pluridisciplinaire qui met en relation différents savoirs, certes coordonnés par un concepteur principal (l'architecte), mais qui nécessite l'intervention d'autres acteurs dans la définition de l'objet final. La problématique se pose quand l'intervention des acteurs n'a pas lieu de façon linéaire mais sous forme itérative, ce qui rend plus complexe le processus de conception.

En ce qui concerne cette recherche, on étudiera essentiellement la relation architecte – ingénieur par rapport à la définition des aspects thermiques et énergétiques et leur intégration dans le processus de conception. Certes, outre la complexité de cette interrelation, cette dimension pluridisciplinaire constitue le cœur de la notion de projet. Michel Callon porte un regard approfondi sur le travail de conception en architecture autour de l'idée de projet [Callon, 1996]. Il définit la conception comme un lieu d'interaction entre différents acteurs dans lequel la distinction entre conception et exécution est inutile. Il considère ainsi qu'il s'agit d'un processus collectif dans lequel les différents acteurs prennent des décisions à partir des formes de représentation, comme le dessin. Dans cet ordre d'idées, la création individuelle serait au même plan que la création collective. Cependant plusieurs approches considèrent la conception sur le plan cognitif, d'une façon individuelle [Conan, 1990], [Prost, 1992], [Boudon, 1992].

Nous pouvons ainsi définir la conception architecturale comme un *processus*, qui est constitué de différentes phases d'analyse et de synthèse dans la définition d'un projet. Si l'étroite corrélation entre la question de la programmation et celle de l'élaboration du projet semble une évidence, ce qui nous intéresse sont les *modes* de corrélation. A priori la structure de la démarche de l'architecte est présentée sous forme d'une suite logique de décisions, mais ce processus n'est pas *mécanique*, dans le sens du processus industriel. La conception d'un projet proprement dite fait appel à des aspects cognitifs qui vont modifier les modes de résolution du problème par le concepteur, dans un exercice de nature séquentielle ou itérative.

Nous verrons que même si le processus d'invention fait appel à un raisonnement logique, ce processus ne correspond pas à une suite ordonnée d'opérations, mais plutôt à des suites « non linéaires » ou parfois aléatoires. En effet la pensée met en place des mécanismes dits « cognitifs » dans un processus mental complexe qui intègre les sens de la perception à la démarche créative du concepteur.

1.3. Aspects cognitifs de la conception

Si la *pensée* agit comme un processus logique, la « pensée créatrice » met en relation différents mécanismes qui ne possèdent pas une structure méthodologique précise. Ces mécanismes correspondent aux aspects cognitifs de la conception architecturale, soit des opérations mentales qui interagissent de forme aléatoire. Mais le domaine des sciences cognitives est large et les approches aux modes de conception sont nombreuses et divergentes. On distingue les approches concernant la *capture* des données -à travers les images et les sensations- [Richardson, 1980], les études qui concernent le traitement de l'information [Smith & Kosslyn, 2007] et les écrits à propos de la représentation des images [Richard, 2004].

A partir de ces travaux nous nous intéressons aux principaux éléments mis en place dans la démarche de conception de l'architecte, où la capture, le traitement et la représentation de l'information se traduisent sous forme de mécanismes de la pensée comme la perception, la mémoire, le raisonnement et la prise de décision (ou la capacité de jugement).

1.3.1. La capture de données : la perception

La conception architecturale en tant que processus de formulation d'une idée, -dont nous verrons qu'elle correspond à la formulation de la solution à un problème- se nourrit d'une pluralité d'informations. Ces informations peuvent être classées en deux catégories : celles qui permettent la construction d'images mentales et celles qui vont être soumises au jugement d'évaluation de la solution la plus pertinente [Korobkin, 1976]. On pourrait ainsi différencier les informations d'ordre spatial, programmatique ou symbolique de celles d'ordre technique et réglementaire. Parfois leur contenu ne déterminera pas la forme de synthèse de l'information, mais c'est la forme de perception qui jouera un rôle fondamental dans la façon dont celle-ci sera traitée. Un énoncé peut fixer l'objectif de créer un espace isolé des nuisances sonores et visuelles dans un programme de logements donné, et ceci peut évoquer différentes stratégies : soit des stratégies d'ordre programmatique en isolant la pièce des autres espaces, soit des manœuvres d'ordre spatial à travers l'agencement de la pièce et l'utilisation de matériaux particuliers. Dans les deux situations le concepteur peut avoir recours à l'association d'images d'autres projets existants ou d'autres situations vécues préalablement de forme empirique. Il est important de remarquer la relation entre *perception* et *construction* d'une image. L'architecte a souvent recours à des perceptions visuelles pour

construire des images mentales d'une situation vécue et ces images serviront de support dans la représentation de nouvelles constructions dans le cadre de réalisation du projet. Dans le cas des perceptions d'ordre sonore ou olfactif, celles-ci seraient liées directement à des situations préalables concrètes. Richardson différencie ces activités cognitives (perceptions) des activités mentales. Les premières correspondent à la capture ou assimilation de l'information, tandis que les activités mentales sont de l'ordre de l'exécution motrice, dans lesquelles les décisions mécaniques sont mises en place en réponse aux stimuli reçus [Richardson, 1980].

La capture de l'information peut être d'ordre diverse, car elle déclenche différents mécanismes de la pensée en fonction de la forme du stimulus. Avant le traitement de l'information, il y a une structuration mentale de construction d'une image qui correspond à chaque perception. Mais il y a aussi d'autres formes de constructions, comme celle des connaissances. L'information contextuelle comme l'histoire du lieu ou les enjeux urbains, appartiennent au domaine des constructions intellectuelles. L'information est reçue mais elle n'est pas transformée : elle sera postérieurement stockée et servira d'instrument de vérification du projet. A partir de ces formes de construction, la totalité des informations reçues est traitée dans un processus mental de classification ou de stockage qu'on peut définir comme des *types de mémoire*.

1.3.2. Le traitement de l'information : la mémoire

La mémoire est également un mécanisme complexe de classification de l'information. Non seulement elle permet de stocker les informations, mais elle est capable également d'associer des éléments à travers un processus mental aléatoire. En combinant deux éléments il est possible d'associer une construction intellectuelle à une image, ou vice versa. La psychologie cognitive étudie les différentes formes de la mémoire et en distingue deux principalement : la mémoire à long terme et la mémoire à court terme ou « *working memory* » [Smith & Kosslyn, 2007]. Leurs travaux montrent que la mémoire à long terme permet de stocker les connaissances, les croyances et les souvenirs. Ces informations sont associées à des images mentales qui permettent de les classer ou ordonner par catégories. Mais c'est à travers la mémoire à court terme que le concepteur peut utiliser un fragment de ces informations. Un stimulus externe est associé à une ou plusieurs images mentales de façon à « activer » et mettre à disposition la partie des informations dont le cerveau a besoin. C'est ainsi que cette mémoire à court terme est définie comme une forme de « mémoire opérationnelle ».

1.3.2.1. Les structures de mémoire de Norman

Chaque individu posséderait un système propre d'organisation de ses informations dans la mémoire « secondaire » ou à « long terme » [Norman, 1982]. Cependant, les structures d'utilisation de cette mémoire seraient communes entre individus et peuvent être divisées en trois catégories : les réseaux sémantiques, les schémas et les scripts.

Le réseau sémantique correspond à une structure de connexion des informations sous la forme d'un mécanisme d'association des éléments. Seulement une fraction de l'information serait considérée comme « mot clé » et permettrait de faire la liaison avec la totalité du réseau.

La structure des schémas équivaut à des ensembles qui contiennent plus d'éléments et non seulement un « identifiant ». Ils sont plus complexes et regroupent différentes catégories d'informations. Dans le cas où un concepteur serait confronté, par exemple, au choix d'un matériau, le mot « bois » pourrait évoquer des informations relatives à la couleur, à l'odeur, ou à des propriétés thermiques et techniques.

Les « scripts » sont des informations associées à des mécanismes comportementaux. Un ensemble d'informations est associé à un comportement donné, comme s'il s'agissait d'un réflexe. Ainsi ce mécanisme permettrait à l'individu de « prédire » un événement qui va succéder un instant T. Le « script » constituerait également un guide de réponse dans le cas où le concepteur se trouverait confronté à une situation donnée.

Ces différentes structures de connexion de l'information sont importantes car elles peuvent être associées aux modes de conception par lesquels l'architecte fait appel aux références d'autres projets. Nous verrons que l'utilisation de la référence n'est pas uniquement une allusion à une image ou à un concept existant préalablement, mais qu'elle déclenche un processus de construction d'une nouvelle image adaptée au projet.

1.3.2.2. Les structures de mémoire dynamique

Dans les années quatre vingt est développé le concept de mémoire dynamique [Schank, 1982], selon lequel toutes les nouvelles informations vont modifier la structure des informations acquises préalablement dans un système dynamique. Les mécanismes de *stockage* et de *traitement* de l'information seraient interconnectés de façon à actualiser constamment l'information contenue dans la mémoire. Les structures de la mémoire dynamique -qui se divisent en « scripts » et « MOP - Memory Organization packets »-

rejoignent les structures de Norman en ce qui concerne les « guides comportementaux » et les modes de regroupement de l'information.

Ces premières structures sont très importantes dans la conception architecturale. Elles déterminent la forme de classification de l'information, des références, des expériences vécues et se constituent en *compétences*. En effet, l'automatisation de certains mécanismes de la mémoire sous la forme de « scripts », permet de développer une structure de comportement précise ou d'adopter une stratégie face à une situation particulière comme par exemple un terrain en pente, un bâtiment avoisinant ou une vue privilégiée. En outre, les « MOP » contiennent un ensemble d'informations plus complexes, qui vont aider à résoudre une situation déterminée, de façon complémentaire aux « scripts ». Dans le cas d'un projet concret, l'orientation du bâtiment en fonction d'une vue privilégiée peut être considérée comme un « script », tandis qu'un ensemble d'informations organisées en « packets » permettront de proposer un certain nombre de déclinaisons ou de stratégies d'ouverture de la façade.

1.3.2.3. La mémoire visuelle

Pendant le processus de conception la mémoire visuelle est fortement sollicitée. En effet, le concepteur utilise les images comme source d'information, d'analyse et de production, car le projet sera finalement « traduit » sous la forme d'images : c'est le moyen de communication le plus important de l'architecte.

La pensée fonctionnerait à travers l'association d'images [Arnheim, 1969]. Le concepteur fait appel à ces images contenant une quantité importante d'informations, et le cerveau les utilise en même temps dans son processus de raisonnement. Les perceptions et la pensée seraient donc étroitement liées. En outre, c'est à travers l'identification de ces images avec des concepts, qu'on peut reconnaître l'univers d'information qui nous entoure. La mémoire agirait comme une grande archive qui sert à faire le lien entre ce que nous voyons et les concepts appris à partir de l'expérience ou par transmission de connaissances. La pensée est *visuelle*.

Mais ces images ne sont pas des répliques du monde extérieur. Il s'agit de représentations codées, mais traduites à nouveau sous la forme d'images. C'est le cas pour les images mentales qu'on a des bâtiments – monuments. La tour Eiffel, le Taj-Mahal ou le Parthénon appartiennent à nos archives d'images, mais on ne peut pas les représenter à

l'identique. La mémoire imagée est *conceptuelle* dans le sens où les constructions mentales de notre pensée s'élaborent à partir de ses propres codes. A partir de ceux-ci, le concepteur procédera à un mécanisme de représentation des images mentales dans un processus de raisonnement propre à chaque individu.

1.3.3. La représentation des images : le raisonnement

Dans le cas du processus de conception l'objectif est de concevoir l'espace, opération qui exige différentes formes de représentation. En effet, les formes de représentations mentales peuvent être diverses. Richard en décrit deux types: les premières sont liées à la mémoire à long terme (LTM) et les secondes correspondent à des représentations transitoires, de courte durée, liées à la mémoire dite *opérationnelle* [Richard, 2004]. D'après ses travaux, les connaissances appartiennent au domaine de l'information qui reste statique et ne change pas dans notre mémoire. Par contre, le deuxième type de *représentations* correspond à des constructions qui sont élaborées uniquement pour des situations concrètes et postérieurement elles sont modifiées ou remplacées par d'autres types de *représentations* destinées à d'autres tâches.

Ces formes de représentation contiennent toutes des informations, mais elles les communiquent à travers différents formats. On distingue les représentations qui contiennent des connaissances ou des concepts de celles qui se construisent à partir des perceptions, traduites sous la forme d'images [Richard, 2004]. Les connaissances exigent un « codage » de l'information qui permet de verbaliser le concept, tandis que les images sont simplement des constructions mentales à partir d'expériences vécues du point de vue des perceptions.

Dans le cadre de conception d'un bâtiment, l'architecte recueille et organise l'information disponible. Il récupère dans sa mémoire des expériences vécues, des souvenirs de situations, des images, des concepts ou d'autres formes de représentations mentales et il élabore différentes formes de figuration en faisant appel à sa mémoire –comme décrit auparavant- dans l'objectif de proposer un certain nombre de *solutions* à une problématique de projet. A partir de ces idées / solutions, le concepteur construit ainsi des images mentales du bâtiment ou, en d'autres termes, il *imagine* le bâtiment. Il représente postérieurement ces images sous forme de croquis ou toute autre forme de visualisation, à partir desquelles il initie un processus de « raisonnement visuel ». A travers la construction de ces images le concepteur établit une démarche d'analyse et de comparaison de l'information disponible du

projet avec l'information contenue dans sa mémoire à long terme. C'est ainsi que l'architecte vérifie la validité ou la viabilité de ses idées, dans le cadre du programme défini.

Ce moyen de « vérification » de la pertinence de l'image proposée se fait à travers la confrontation de l'image construite avec des images existant préalablement, dans un procédé qu'on peut définir comme le recours à *l'analogie*.

1.3.3.1. Le raisonnement par analogie

L'analogie est un instrument de conception commun aux architectes, qui consiste à rapporter un problème / solution à une image ou une situation connue préalablement et appelée *référence*.

D'après Conan, l'analogie est utile au concepteur comme instrument de réflexion dans la mesure où elle permet de simplifier un problème. Elle permet de remplacer une situation problématique par une situation « familière », soit sous la forme d'une expérience vécue, soit comme une « homologie formelle », afin de faire émerger une solution. L'intérêt de la reconstitution de l'information à travers l'analogie n'aurait du sens que dans la mesure où le recours aux références permettrait d'anticiper les conséquences d'une solution adoptée [Conan, 1990]. Cette formulation rejoint la thèse des « scripts » comme mécanismes de la mémoire [Norman, 1982]. En effet, la connaissance d'une situation préalable permet au concepteur de « prédire » le résultat attendu. De cette façon l'organisation spatiale, l'utilisation d'un matériau ou le recours à une technique constructive peuvent être considérés comme une référence.

Mais il est important de distinguer le recours à la référence et le raisonnement par analogie. On peut en distinguer plusieurs types : des situations vécues, des connaissances scientifiques, des projets d'architecture ou simplement des associations d'idées avec des images, des concepts ou des mécanismes de fonctionnement dans la nature [Schön, 1983]. Les études concernant la conception architecturale à partir des référents, montrent que la plupart des analogies proviennent des expériences vécues et non pas de l'information fournie pendant le processus de conception [Heylighen, 2000].

Cependant le raisonnement par analogie fonctionne – a priori- à partir de l'association de deux idées et celles-ci sont de nature différente. Par exemple, il est possible de concevoir un bâtiment ayant une structure *analogue* à celle d'un élément de nature animale ou végétale.

Les ressemblances en termes de structure membranaire ou composition de l'enveloppe, permettent de développer une idée de projet : c'est le cas du projet de Berger & Anziutti pour le carré des Halles à Paris en 2009, dans lequel le bâtiment est associé à une feuille végétale, sous le nom d'une « canopée ».

L'analogie peut avoir différents modes de représentations, qui donneront lieu à des explorations formelles ou fonctionnelles. Mais l'analogie visuelle est fréquente car elle constitue une traduction de l'aspect formel des objets en architecture. Les figurations (ou représentations mentales) à partir d'images existantes peuvent être très prolifiques et entraîner à leur place le développement de nouvelles variantes du projet. Cependant, le recours à des images déjà construites pose la question de la « copie conforme », dans laquelle il y a une reproduction presque à l'identique de l'image originelle. Mais le recours aux références limiterait la capacité de création de nouvelles idées [Purcell et Gero, 1998]. La construction des images mentales est semblable aux images précédentes et diffère d'une construction verbale qui laisse beaucoup plus de liberté pour interpréter le même concept avec plus de variantes. Cependant, et au-delà des questions « éthiques » par rapport à la copie des modèles, les références en architecture ont une importance fondamentale. D'ailleurs, toute nouvelle proposition aurait besoin d'un « ancrage » dans la « culture architecturale » pour trouver sa légitimité [Prost, 1992].

L'ensemble des aspects cognitifs joue un rôle essentiel dans la conception architecturale. Ils permettent d'expliquer le comportement du concepteur face à une problématique de projet dans laquelle, de manière intuitive, il utilise les moyens qu'il trouve dans son environnement. Le recours à la mémoire, à des expériences personnelles, à l'association d'images ou aux différentes formes de représentations se constituent en mécanismes communs mais dont leur fonctionnement est propre à chaque individu.

Cependant, nous verrons que les mécanismes de synthèse de l'information peuvent être aussi analysés d'un point de vue systémique et que la démarche de conception va au-delà de la notion de processus.

Conclusion du chapitre

La conception architecturale est une activité de création qui se situe au carrefour des arts et des sciences, qui associe à la fois des manifestations artistiques et des connaissances scientifiques, ce qui rend complexe une description précise de son fonctionnement.

L'ambivalence entre la logique cartésienne et les aspects propres à la cognition est à l'origine de cette complexité. A partir de l'étude théorique de la conception d'un projet en architecture, on peut établir qu'elle correspond à un processus de synthèse de différentes informations, à travers des mécanismes complexes de la pensée qui font appel à des connaissances scientifiques et a des aspects cognitifs. L'architecte a recours à ses perceptions et à des mécanismes de la pensée comme la mémoire ou l'association d'images dans son processus de création de l'objet architectural. Ce processus s'étend sur le temps et se développe à travers une suite d'opérations individuelles ou collectives dans une logique de production qui peut être associée à la production industrielle.

Cette logique a inspiré de nombreuses réflexions sur la rationalisation de ce procédé. Plusieurs scientifiques ont essayé d'expliquer cette opération à partir d'une approche méthodologique, dans l'objectif de modéliser et de reconstituer le processus de conception.

Nous retrouvons ainsi la première piste de réflexion de notre travail de thèse, articulé autour de l'efficacité énergétique : la conception d'un projet fait appel à une diversité de connaissances, mais elle est surtout basée sur une approche cognitive inhérente aux mécanismes de la pensée de l'homme.

Nous verrons dans le prochain chapitre comment Prost [Prost, 1992] et Conan [Conan, 1990] ouvriront la voie pour comprendre la démarche de l'architecte comme une procédure de *résolution d'un problème* à partir d'une approche méthodologique qui pourrait intégrer les aspects cognitifs de la conception.

Chapitre 2. Approche méthodologique à la conception

« La conception consiste essentiellement à pré structurer des problèmes, soit par la connaissance de solutions types, soit par la connaissance des potentialités de possibilités instrumentales relatives à des solutions types (...) Une description complète des opérations accomplies par un concepteur ne nous apprendrait toujours pas d'où est sortie la solution... »

Hillier (1972)

Au-delà d'un processus *logique*, l'étude de la conception architecturale est de nature *méthodologique*. Depuis quelques décennies, la démarche de l'architecte a connu plusieurs tentatives de description de procédés sous la forme d'une *méthode* qui peut être reproduite. Ces tentatives vont réaffirmer la notion de *processus* et ouvriront la voie vers la *modélisation* des mécanismes de conception d'un projet d'un point de vue scientifique.

Il ne s'agit pas ici de faire un inventaire de différentes études. Le but de ce chapitre est de comprendre dans un premier temps l'approche méthodologique à la résolution d'un problème, postérieurement d'analyser les formes de modélisation de la démarche de l'architecte et enfin de tenter de reconstituer le processus de conception à partir des expériences relevées sur le terrain. Cette étude nous permettra d'établir le lien avec les aspects énergétiques qui sont en jeu dans la conception des bâtiments d'habitation contemporains.

2.1. Caractérisation du processus : le problème en architecture

C'est à Poincaré que l'on doit un apport significatif aux théories de l'invention dans les sciences. Un *problème* serait à l'origine de la démarche du concepteur, qui utiliserait un ensemble d'hypothèses pour entamer une phase de réflexion dans une approche inconsciente de formulation des idées [Poincaré, 1902]. C'est à partir de ce stade que le concepteur pourrait développer - cette fois-ci de façon consciente - des solutions au problème.

Un des premiers à considérer la démarche de conception en architecture comme la résolution d'un problème est William Peña [Peña, 1977]. Il distinguera une phase de *formulation du problème* qu'il appellera la phase de *programmation*, d'une seconde phase qui correspondra à la *résolution du problème*, soit à l'élaboration du projet.

Ces recherches seront reprises plus tard [Conan, 1990], [Prost, 1992] et montreront dans quelle mesure cette double structure de *formulation / résolution* d'un problème a été décomposée en différentes parties et quels sont les mécanismes qui expliquent les relations entre les différentes phases du processus de conception.

2.1.1. Le processus de formulation du problème

Selon une approche purement scientifique, la formulation du *problème* serait à l'origine de la conception de la solution. Mais le taux de satisfaction de la solution dépendrait du *niveau de définition* du problème [Peña, 1969]. En effet, concevoir un bâtiment correspondrait à *résoudre* un problème qui -contrairement aux sciences exactes- ne possède pas une solution vérifiable. *L'énoncé* du problème définirait ainsi les critères d'évaluation de la solution [Conan, 1990].

Prost [Prost, 1992], reprendra ces éléments et définira la démarche de l'architecte comme un processus qui serait articulée en quatre phases : la formulation d'un problème, la formulation de la solution, la concrétisation de cette solution et son appropriation (Fig.3)

FORMULATION
DU PROBLEME

FORMULATION
DE LA SOLUTION

CONCRETISATION
DE LA SOLUTION

APPROPRIATION
DE LA SOLUTION

Figure 3. Phases de la démarche de conception d'un projet selon Prost.

Prost a analysé la complexité de cette question d'un point de vue méthodologique : en architecture, *l'énoncé* contiendrait déjà des éléments de réponse pour la recherche de la *solution* [Prost, 1992]. D'où l'intérêt de considérer la *formulation du problème* comme une partie intégrante du processus de conception.

En effet, le *problème* en architecture est le point de départ du projet. Cependant, on peut distinguer deux aspects importants dans ce processus : la *définition* et *l'interprétation* du problème. Sa *définition* exige une première phase de synthèse de l'information qui exprime la volonté d'un groupe d'acteurs dans la mise en place d'une démarche pour sa conception et réalisation. La deuxième partie correspondra à *l'interprétation* du problème qui impliquera l'analyse de la viabilité du projet. Il ne s'agit pas de l'interprétation qui sera faite par le concepteur, mais celle qui sera donnée en phase de *programmation*. Nous verrons comment la viabilité du projet dépendra de cette interprétation.

2.1.1.1. Définition du problème

Il est possible d'établir un parallèle entre les 4 phases de Prost [Prost, 1992] et la structure proposée par Fernandez [Fernandez, 2002] pour décrire le processus de conception (voir Fig.4). Dans cette logique, la phase de *formulation* du problème correspondrait à l'étude du *programme* à partir duquel se constitue le projet architectural.

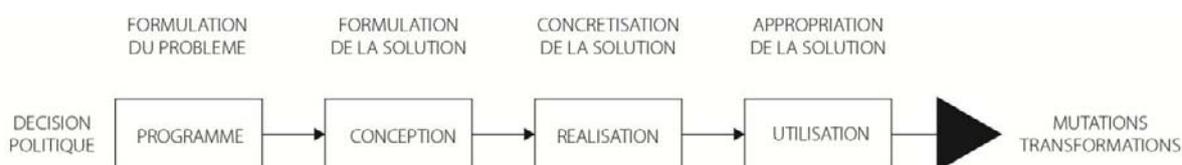


Figure 4. Processus de projet architectural et urbain. Fernandez (2002).

En effet, le *programme* est considéré comme la « colonne vertébrale » du projet car il constitue le « guide de route » pour le concepteur. Il est divisé principalement en deux parties : la première concerne le contexte du projet ainsi que des considérations générales sur la volonté de la maîtrise d'ouvrage et ses principaux objectifs. La deuxième partie décrit les exigences en termes quantitatifs et qualitatifs et détermine les principales caractéristiques tant au niveau fonctionnel que technique. Souvent le grand nombre d'informations et le niveau de détail dans les exigences techniques vont constituer des dossiers revêtus d'une grande complexité.

Une relation d'ambiguïté dans l'interprétation est à l'origine de la complexité dans la formulation du problème. Les travaux de Simon font ainsi référence à la *définition* du problème en architecture. Il serait possible d'établir une différence entre les problèmes « mal définis » et ceux « bien définis ». Un problème bien défini contiendrait des éléments de réponse qui permettraient de le résoudre, tandis qu'au contraire, un problème mal formulé apporterait de l'ambiguïté à la solution [Simon, 1973].

La différence entre ces deux types de formulations serait rattachée à la solution du problème. A une bonne formulation correspondrait une solution adaptée unique, tandis qu'une mauvaise formulation donnerait lieu à des conflits d'interprétation qui entraîneraient par la suite une diversité de solutions mal adaptées au problème. D'après Falzon définir un énoncé est une problématique en soi même. En effet, la définition du problème contient effectivement des éléments de réponse qui peuvent orienter la solution, et sa formulation peut avoir des conséquences directes dans la forme de résolution du problème [Falzon, 1990].

Dans d'autres termes, pour établir le programme d'un projet de logements dans un environnement donné, un professionnel recueille et synthétise un certain nombre d'informations qu'il constitue dans un dossier. Cette information constitue *l'énoncé* du problème. Il doit exprimer la volonté de la maîtrise d'ouvrage et doit contenir suffisamment d'éléments qui permettent au concepteur de faire une ou plusieurs propositions qui correspondent avec cette volonté.

En outre, une composante liée à la culture des acteurs se rajouterait comme une nouvelle variable. Ainsi le rôle du contexte et de l'époque dans lesquels le problème est inscrit serait déterminant dans la définition de l'énoncé. Il n'y aurait donc pas de forme *universelle* dans la formulation d'un problème [Prost, 1992].

Un troisième aspect augmenterait la complexité du processus de formulation du problème : il se situerait au niveau de *l'interprétation* du programme. Bien qu'il existe une structure commune, l'interprétation de cet énoncé peut avoir des formes très diverses. La conception d'un projet ne serait pas basée uniquement sur une problématique, mais sur différentes formes d'interprétation de celle-ci.

2.1.1.2. Validation du problème

Une première interprétation du problème serait faite par l'individu qui construit l'énoncé, ou dans d'autres termes, celui qui réalise le programme. On parlera d'une phase de *validation* du programme, à partir de laquelle on intégrera des éléments de nature « descriptive » et « prescriptive » dans la construction d'un énoncé.

Les premiers éléments correspondent à la description des objectifs du projet. En effet, le programme doit synthétiser la volonté d'un ensemble d'acteurs qui représentent le maître d'ouvrage, à partir de considérations esthétiques, symboliques, ou d'une décision particulière de s'inscrire dans un contexte précis.

Les éléments de nature prescriptive correspondent aux informations relatives à la spatialité et aux aspects techniques du bâtiment, inscrits dans un cadre réglementaire. Le « *programmeur* » va ainsi vérifier que la nature de la demande soit en coordination avec les possibilités de mise en œuvre du projet. Par exemple, dans le cas d'un bâtiment où le programme serait très étendu mais la surface de la parcelle serait très réduite il pourrait y avoir un conflit avec les aspects normatifs du Plan Local d'Urbanisme. Il doit donc vérifier la cohérence de la globalité des exigences, soit dans une certaine mesure, « tester » la faisabilité du projet.

La méthode la plus pertinente pour faire cette procédure est de « concevoir » un prototype de projet à partir de l'énoncé élaboré, avant de soumettre la problématique aux concepteurs. Seule la conception d'un bâtiment « cobaye » permettra d'identifier les erreurs possibles dans la réalisation du programme. Cette méthodologie d'essai / erreur permet de vérifier la pertinence de l'énoncé et la mise en cohérence avec les objectifs proposés. A partir de cette expérience l'énoncé peut être à la fois reformulé ou orienté dans une certaine voie. On remarquera que l'énoncé peut avoir différentes formes de formulation avant d'être soumis au concepteur.

Cette condition traduit la complexité de la tâche dans la réalisation du programme. On serait donc en train d'établir deux types de problématiques : la *définition* et l'*interprétation* du problème, qui seraient à la fois réciproques entre elles et pourraient modifier la problématique de fond. Leur réciprocity est pertinente lorsqu'il s'agit de comprendre la dynamique du processus de résolution d'un problème [Prost, 1992].

Il décrit ce schéma comme un mécanisme itératif dans lequel la solution remet en cause l'énoncé et ainsi de suite dans un processus continu (Fig. 5).



Figure 5. Niveaux relatifs à un énoncé de problème [Prost, 1992].

2.1.1.3. Interprétation du problème

Le troisième aspect dans la formulation de l'énoncé correspond à l'interprétation du problème. On pourrait estimer que cet aspect fait partie du processus de *résolution* du problème. Cependant il est inclus dans la phase de *formulation* car la compréhension de la complexité dans son interprétation, donne des éléments clés pour la construction de la solution au problème.

En effet, le concepteur fait une interprétation de l'énoncé à partir des éléments qui lui sont fournis. Les résultats peuvent être diverses, au point que deux concepteurs avec un programme identique ne se poseraient pas le problème de la même façon ni ne proposeraient la même solution [Nidamarthi, 1997].

L'origine de ces formes d'interprétation se situe dans la forme de présentation de l'énoncé du programme. L'approche à la dichotomie « projet / objet » en architecture, va se traduire de deux façons : la première étant de nature plus conceptuelle ou subjective, alors que la seconde sera plus descriptive et objective. On fera ainsi la distinction entre « finalités » et « utilités » du projet.

Les *finalités* sont souvent de l'ordre de l'abstraction. Il s'agit de concepts, idées ou notions qui peuvent être plus ou moins vagues. Nous pouvons retrouver ces énoncés communs aux cahiers de charges des différents projets. C'est le cas, par ex., d'une opération

de logements « opération d'aménagement de l'îlot E d'Armagnac pour la construction de 12000 m² de logements + équipements »⁸ :

« Les implantations au sein de cet îlot E seront libres, avec le souhait de constituer une véritable façade sur la future place Armagnac (...) Cette opération devra constituer une opération exemplaire en termes de maîtrise de la consommation d'énergie, valorisation des ressources naturelles, optimisation et fonctionnalité de l'espace ».

Par contre, les *utilités* sont beaucoup plus concrètes et de nature prescriptive. Souvent accompagnées d'une liste d'espaces à fournir, d'organigrammes fonctionnels, et de tableaux d'exigences techniques, elles vont déterminer les caractéristiques de fonctionnement du bâtiment du point de vue de l'utilisateur et celles des installations techniques. Si ces énoncés sont beaucoup plus détaillés, ils peuvent induire l'utilisation d'un certain type de matériau, des systèmes de chauffage ou suggérer la spatialité du projet sans prescrire pourtant la façon de leur mise en œuvre.

« Objectif : tendre vers la réalisation de bâtiments à basse consommation énergétique. Ce niveau vise une consommation très fortement inférieure à la consommation énergétique réglementaire avec une consommation d'énergie primaire fixée à 50 kWh ep/m²/an prenant en compte les consommations en chauffage, production d'ECS, ventilation et éclairage. Cet objectif ambitieux implique : une isolation renforcée, (...) une valorisation des apports passifs par le développement d'une écriture architecturale bioclimatique contemporaine et novatrice, (...) le développement des formes alternatives de production de l'énergie ».

La relation établie entre *finalités* et *utilités* du programme va déterminer l'interprétation de l'énoncé, conditionnant ainsi la solution proposée par le concepteur. Il faudra remarquer qu'on parle du concepteur « architecte » mais il faut inclure également les perspectives des différents acteurs qui interviennent dans le projet, comme les ingénieurs et les spécialistes chargés des aspects techniques du bâtiment. En effet, l'interprétation du problème par les ingénieurs ne sera pas la même que celle proposée par les architectes. Nous verrons plus tard que cette divergence de positionnement va conditionner l'approche à la résolution du projet.

De la même façon comme la description des *finalités* et des *utilités* du projet peuvent être décrites de façon plus ou moins exhaustive, l'énoncé contiendra plus ou moins

⁸ Ville de Bordeaux, (2007). *Aménagement de l'îlot E d'Armagnac*. Cahier de charges de la consultation en vue de la cession du foncier. Direction générale de l'Aménagement, Service Projet Urbain.

d'éléments qui permettront de constituer la solution. On parlera du degré *d'opérationnalité* d'un énoncé dans la formulation du problème (Fig.6) et dans la dynamique problème / solution [Prost, 1992]. Cette articulation contient des éléments de réponse et permettra de faire la transition entre les *concepts* décrits et les *formes* du projet.

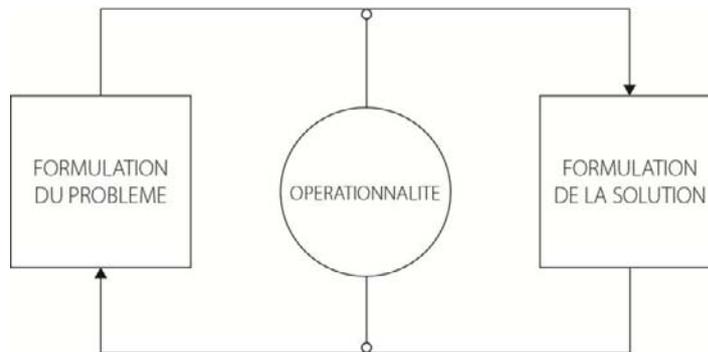


Figure 6. Dynamique du couple Problème / Solution [Prost, 1992].

2.1.2. Le processus de formulation de la solution

Le point de départ de la réflexion est basé sur un principe : il n'existe pas une solution unique pour un problème de conception. Les variables sont multiples en ce qui concerne la formulation de la problématique, l'interprétation de l'énoncé, et la formulation de la solution. Les aspects techniques, économiques et sociaux d'un projet vont constituer un univers complexe dont la pluralité de composantes empêcherait de considérer le problème en architecture comme une équation mathématique.

Nous nous pencherons sur les différentes approches relatives à la *résolution* d'un problème en architecture d'un point de vue méthodologique.

Le premier aspect à étudier concerne la structuration du problème. Elle consiste à déterminer les caractéristiques générales du problème et ses mécanismes de formulation. Le deuxième aspect correspond à la production / évaluation des solutions et le dernier aspect concerne la forme de représentation du projet. Nous verrons qu'il existe une relation étroite entre ces différentes phases.

2.1.2.1. Structure de la résolution du problème

Herbert Simon est un des premiers à étudier la structuration du problème en architecture. Ses travaux ont soulevé un aspect dans la complexité de la démarche de conception : le projet est un processus de synthèse de l'information. Il dérive donc d'une pluralité de composantes, d'une diversité de variables et de la multiplicité d'interactions entre ces différents éléments.

Le concepteur cherche ainsi à trouver la meilleure solution, mais il est placé devant des centaines d'alternatives. Ces conditions l'entraînent à proposer une pluralité de solutions sans établir forcément une solution optimale. La multiplicité de variables à prendre en compte nécessiterait d'une structure méthodologique scientifique précise pour évaluer la solution plus adaptée [Simon, 1973].

Cependant, les critères pour évaluer une solution peuvent être également subjectifs. D'où l'intérêt de considérer le système de résolution du problème comme une structure complexe dans laquelle il n'y a pas de solution « correcte » ou « incorrecte », mais de solutions qui répondent à différents critères et qui sont adaptées à certaines situations.

Afin de comprendre la structure générale de la résolution du problème, il faut analyser trois aspects introduits par Prost qui concernent ce sujet.

Le premier aspect à considérer est la structure de passage de l'énoncé d'un projet vers la représentation en images de celui-ci. Prost étudiera ce problème en décrivant ce processus comme une suite *non linéaire*. D'après sa thèse, il n'existerait pas un point de départ et un point d'arrivée dans la recherche d'une solution [Prost, 1992].

Le deuxième aspect important correspond à ce stade *parallèle* dans la recherche de la solution, dans lequel le concepteur va s'appuyer sur un ensemble de « *références normatives* » qui vont donner de la cohérence à la solution [Prost, 1992]. Le recours à ces *références* rejoint les aspects étudiés dans le chapitre 1 concernant le *raisonnement par analogie*. Le concepteur « introduirait » un sous problème sous forme d'analogie qui lui permettrait de trouver un sens à la solution qu'il recherche.

Enfin le dernier aspect à intégrer correspond à la forme de transition entre l'analyse du programme et la formulation des esquisses du projet. On parlera d'une transition des *concepts* vers les *formes* en architecture. Prost décrit cette transition comme une « boîte noire » dans

laquelle s'opère cette transformation en combinant les différentes variables. Ces trois aspects nous permettent de nous représenter la structure de résolution du problème formulée par Prost (Fig.7).

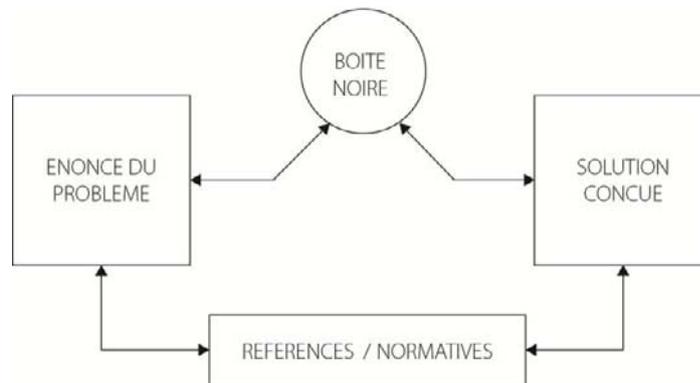


Figure 7. Références normatives et processus de conception [Prost, 1992].

2.1.2.2. Formulation de la solution

Pendant des décennies le processus de conception en architecture fut assimilé à cette « boîte noire » qui demeurait d'une certaine façon, incompréhensible et qui renforçait la thèse de l'architecte « génie créateur ». Plusieurs travaux ont essayé d'approfondir ce sujet afin d'expliquer les mécanismes internes de ce processus.

Jean Charles Lebahar propose une avancée dans la compréhension de la démarche de l'architecte avec ses travaux sur la problématique de la *représentation* du projet [Lebahar, 1983]. La conception architecturale serait ainsi divisée en trois phases :

La première phase correspond au diagnostic architectural, dans laquelle le concepteur va « filtrer » les éléments du programme sous forme de « contraintes ». L'architecte va constituer sa propre base de données qui est complémentaire au programme, avec des éléments issus de la visite du site ou de sa propre recherche. Il fera une première synthèse de l'ensemble de ces éléments à partir d'une « base graphique de simulation ».

Dans la deuxième phase, le concepteur va entamer un processus de formulation / évaluation d'un ensemble de solutions. Le processus sera itératif et non linéaire. Ce qui est intéressant dans les travaux de Lebahar, c'est son analyse sur la *forme* de génération des solutions : le dessin. Les représentations graphiques serviront de modèles de *simulation* qui serviront à évaluer la pertinence de la solution. Ce ne sont pas uniquement des dessins mais des formes

de représentation qui serviront à modéliser « l'objet en création et la pensée qui le crée » [Lebahar, 1983].

La troisième phase servira à établir un modèle de construction, soit le stade final dans la représentation de l'objet à construire. Elle consiste à rendre claire la solution pour le constructeur à travers le dessin de *détails* du bâtiment.

Nous reviendrons sur la question de la représentation postérieurement, mais il est important de remarquer dans quelle mesure les travaux sur la formulation / évaluation des solutions à partir de « modèles » sont complémentaires aux travaux postérieurs de Prost sur le rôle des *références*. En effet les *références* sont aussi des formes de représentation – imagées ou non – qui serviront comme mécanismes de *modélisation*.

Selon Prost, chaque concepteur possède sa propre famille de références. On trouvera différentes catégories dont la hiérarchie sera définie de façon individuelle par l'architecte, établissant ainsi une liaison avec la mémoire et sa culture. Nous avons étudié préalablement les mécanismes de recours à ces références, mais ce qui est important de souligner c'est le système de classification proposé par Prost. Il va différencier les références qui sont fondées sur l'architecture, de celles fondées sur le problème et son contexte [Prost, 1992].

C'est ainsi que nous pourrions retrouver des références constituées par une image ou qui font allusion à la forme, aux composantes d'un bâtiment, à son schéma d'organisation, etc. On parlera de références morpho-typologiques et d'éléments du paysage architectural. En outre nous pourrions retrouver des références, par exemple, sur une idée, un texte, un concept, qui peuvent être plus ou moins précises. L'architecte fait souvent allusion à des concepts comme la « transparence », la « continuité », le « contraste ». On parlera de références contextuelles du problème.

Il n'est pas question ici de répertorier l'ensemble de concepts qui peuvent constituer une référence, mais d'illustrer dans quelle mesure ils appartiennent aux catégories proposées par Prost. La pertinence de ces deux catégories permet de mieux comprendre le schéma du processus de formulation d'une solution architecturale (Fig.8).

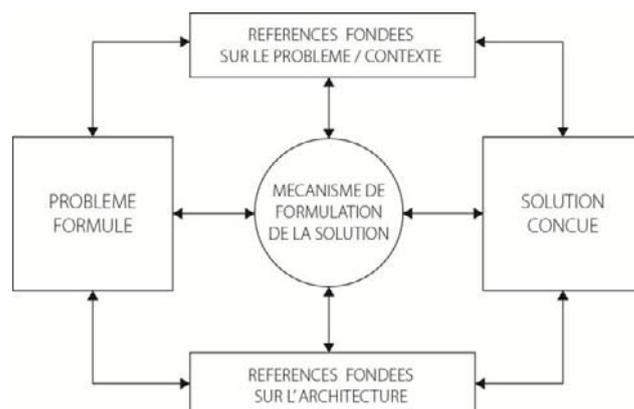


Figure 8. Composantes relatives au processus de formulation d'une solution [Prost, 1992].

Le processus de résolution d'un problème en architecture est au cœur de notre travail, mais il ne peut pas être étudié de façon hiérarchique. Bien que dans cette phase sont intégrées les différentes connaissances, méthodologies et stratégies de conception d'un projet, cette question ne peut pas être étudiée de manière isolée. Cependant il faut tenir compte des éléments préalables à la solution et postérieurs à celle-ci. Nous avons vu ainsi comment une partie des réponses se situe dans la *formulation du problème* et une autre dans la *formulation de la solution*. Nous verrons comment les mécanismes de modélisation permettent de mieux comprendre le processus de conception en architecture.

2.2. Modélisation du processus

La conception architecturale est l'objet des recherches depuis les années soixante, lorsque plusieurs architectes se sont intéressés à la modélisation du processus de conception assisté par ordinateur. Nous avons étudié lors de l'analyse de la structure du *problème* en architecture, que le concepteur est placé face à des centaines de possibilités compte tenu de nombreuses variables du projet. Les premières théories de résolution du problème en architecture dérivent d'une *approche numérique*. D'autres courants comme la *psychologie cognitive* et *l'architecturologie* ont contribué au développement de différents *modèles théoriques* de la conception architecturale.

2.2.1. L'approche numérique

L'architecture, terrain fertile pour le développement de nouvelles techniques, a connu l'arrivée de l'informatique dans les années 60.

Les études d'Herbert Simon sur la conception qui ont débuté en 1963 ont contribué au développement d'un modèle commun aux architectes et aux ingénieurs, dans lequel sont décrits certains mécanismes de la pensée des concepteurs. La conception architecturale est décrite comme un mécanisme à multiples sous-solutions appelé « *satisficing* », faisant allusion au choix que doit faire le concepteur face à des centaines de variables qu'il n'est pas en la capacité d'analyser [Simon, 1974].

Christopher Alexander [Alexander, 1964] - architecte et mathématicien au centre de calcul automatique à l'université de MIT -, a été pionnier avec son travail dans la recherche sur la conception assistée par ordinateur, ce qui a ouvert la voie aux réflexions sur la rationalisation et la modélisation de ce processus. Les centres de recherche américains se sont intéressés à la question du *problem solving*, soit la résolution d'un problème qui a des centaines de solutions à partir d'une logique mathématique. Ces recherches marqueront le début de l'ère numérique dans la conception architecturale.

Alexander [Alexander, 1964] décomposera l'objet architectural en différents graphes qui représentent les différentes variables et ses relations, dans l'objectif de résoudre les sous-problèmes inhérents à chaque variable. Le tout permettrait de formuler une ou plusieurs solutions dites « optimales ». Ce modèle aura naturellement des limites, mais ceux-ci sont plus liées aux modes de résolution du problème qu'à la quantité de variables. En d'autres

termes, il est plus difficile de trouver un système fiable de résolution de chaque sous-problème, que de résoudre des milliers de problèmes à la fois. En effet les relations entre les différentes solutions sont très complexes et leur influence remettrait en cause la problématique initiale.

2.2.1.1. Structure problème / sous problème

Il est important d'abord de comprendre la définition proposée par Alexander [Alexander, 1971] à propos de la conception en architecture. Il définit le processus ainsi :

«Un processus conduisant à inventer des éléments physiques qui -en réponse à une fonction- proposent un nouvel ordre physique, une nouvelle organisation, une nouvelle forme. »

Cette définition décrit dans quelle mesure le processus de résolution des problèmes, modifierait à la fois la structure même de la problématique au fur et à mesure que la solution est représentée. En d'autres termes, la représentation d'une solution permettrait d'accéder à d'autres formes d'interprétation du problème. L'interprétation du problème et de la solution aurait lieu dans un double sens à travers les démarches d'*analyse* et de *synthèse* (Fig.9). Ce constat renforce l'idée de la nature *itérative* du processus de conception.

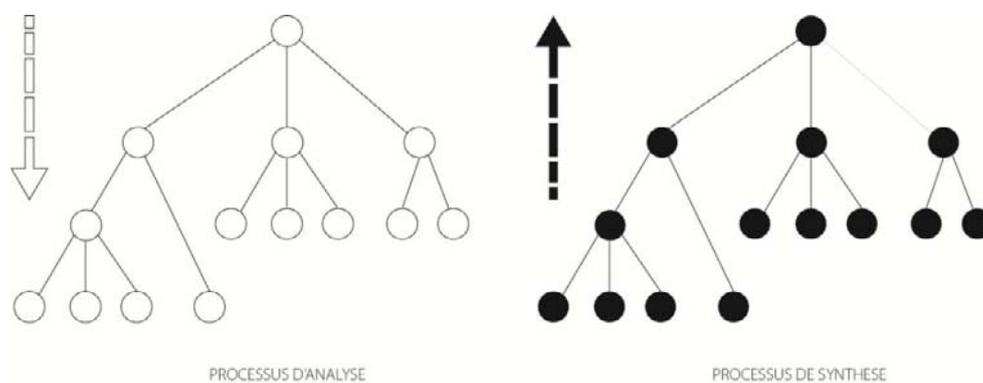


Figure 9. Structure « arborée » analyse - synthèse [Conan, 1990] sur [Alexander, 1974].

Michel Conan met en évidence cette problématique à propos de la résolution d'un problème par un modèle numérique [Conan, 1990]:

« La recherche d'une solution du problème a pour but de permettre au concepteur de faire surgir un ordre dans le désordre présent de sa conscience »

Cette approche montre l'importance de faire un parallèle entre la pensée du concepteur et le modèle mathématique. La structure d'organisation du problème et de ses sous-problèmes doit bénéficier d'un système logique de formulation des solutions. Dans d'autres termes, le système qui permettra de déterminer si une solution est optimale ou non, va conditionner définitivement la solution finale. Ce système doit être capable d'organiser hiérarchiquement les problèmes afin de pouvoir trouver un « ordre » dans l'univers de solutions possibles.

Conan utilise la structure « arborée » d'Alexander (Fig.9) et l'analyse plus en détail : dans chaque nœud il existerait à la fois deux sous-problèmes et deux solutions type. D'après sa thèse, on pourrait décomposer un problème en une structure « réseau » à condition d'analyser les relations entre les solutions à chaque stade de l'analyse [Conan, 1990].

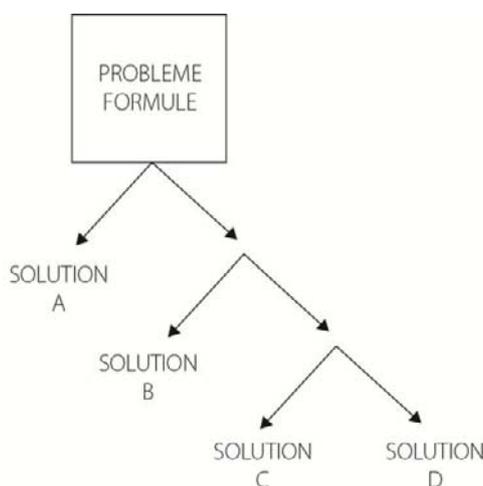


Figure 10. Structure « arborée » de résolution d'un problème [Conan, 1990] sur [Alexander, 1974].

Dans ce cas il faudrait examiner les solutions C et D, en les comparant d'abord à B, et postérieurement à A de manière indépendante. Etant donné que chaque solution correspond à un sous-problème et non à la problématique initiale, ce n'est qu'en analysant les relations entre les différentes solutions que le concepteur pourrait visualiser la solution optimale.

L'auteur propose donc d'analyser le même nombre de solutions sous la forme d'une nouvelle structure hiérarchisée par « niveaux » (Fig.11), ce qui se traduit simplement comme une forme d'organisation des problèmes. De cette façon, on peut dégager les grandes lignes de la structure de la problématique initiale et analyser le contenu de la solution à l'instar de la

pensée visuelle du concepteur. Nous avons vu en effet que la conception architecturale fonctionne dans ses aspects cognitifs, à travers un processus d'association d'images ou de pensée « analogique ».

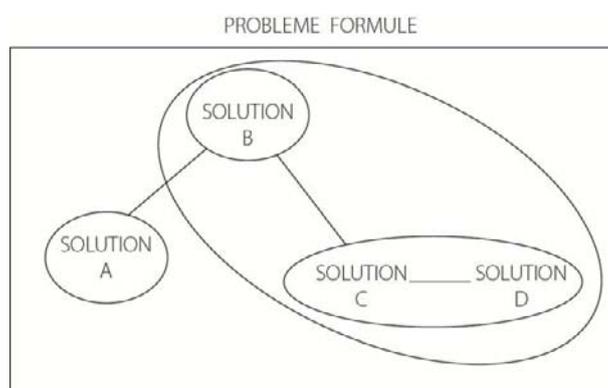


Figure 11. Structure de résolution par « niveaux » [Conan, 1990], sur [Alexander, 1974]

L'analyse de chaque sous-problème permettrait au concepteur de définir les propriétés générales de la *forme* du projet à concevoir et de modifier sa structure au fur et à mesure qu'il avance dans son analyse. Le nombre de décisions est tellement important qu'un architecte n'aurait pas le temps de les résoudre, mais un modèle numérique serait capable de les analyser très rapidement.

2.2.1.2. *L'architecte Vs l'ordinateur*

Nous sommes au début de la conception assistée par ordinateur et les problématiques qu'elle suggère. Les travaux d'Alexander ont marqué le début de l'ère numérique dans la conception architecturale. Bien évidemment, cette structure d'analyse a connu des fortes critiques compte tenu de ses limites, notamment car dans cette structure chaque sous-problème a une importance équivalente, hors dans les conditions réelles ce n'est pas le cas. En d'autres termes, les variables liées aux aspects réglementaires sont plus importantes et d'autres variables, comme le type de revêtement d'un sol, ne sont pas fondamentales. Un modèle mathématique qui n'ait pas cette information d'entrée ne pourra pas formuler la solution plus adaptée.

Hors, l'incapacité de hiérarchiser l'importance de chaque problème n'est pas la question de fond majeure. La plus grande difficulté consiste à déterminer quelles sont les variables « fixes » et quelles sont les variables « flexibles ». Cette condition que nous appellerons « point de vue » va déterminer fondamentalement la solution finale. En d'autres termes, le concepteur va porter un regard qui jugera de manière intrinsèque quelles sont les conditions

qu'il considère comme « invariables », et ceci va déterminer le projet final. Mais un autre concepteur va considérer d'autres variables comme « fixes » et le projet résultant peut être complètement différent.

Mais la plus grande critique sur les travaux d'Alexander [Prost, 1992] a été de vouloir comparer la pensée de l'architecte à un système d'analyse de problèmes qui les découpe en sous-problèmes de manière hiérarchique. Une solution adoptée à un niveau supérieur ne remettrait pas en cause une solution adoptée à un niveau inférieur dans la structure, avec le risque de créer à la fin un objet architectural qui réponde uniquement à une logique fonctionnelle hiérarchique.

Nous sommes devant les problématiques qui séparent l'architecte de l'ordinateur dans la conception architecturale. Le concepteur quel qu'il soit, doit être capable de fixer les conditions limites du problème, d'établir des niveaux hiérarchiques, et de proposer un système d'analyse des problèmes dans la recherche de la solution. Même si les travaux d'Alexander ont ouvert la voie de la conception numérique, on parlera jusqu'à présent de « conception assistée » par ordinateur, sans chercher à remplacer le concepteur architecte.

2.2.2. La psychologie cognitive

Suite aux recherches sur la modélisation numérique de la pensée de l'architecte, plusieurs travaux ont essayé de montrer que le processus de conception ne peut pas être assimilé à un simple mécanisme de résolution de problèmes. Ils ont ainsi tenté de décrire la démarche de conception à partir de différents modèles théoriques.

Les premières tentatives de décrire le processus de conception ont abordé une approche de caractérisation par *phases* auxquelles sont venues s'ajouter les études sur la nature des opérations mentales dans la résolution d'un problème. C'est ainsi qu'il est important de faire le lien avec les différents *aspects cognitifs* qu'on a vus dans le premier chapitre de cette recherche et qui nous ont permis de construire un vocabulaire et un fond théorique à propos des mécanismes de conception. Les penseurs de la conception architecturale ont intégré l'approche cognitive aux modèles mathématiques car ils se sont vus confrontés à l'incapacité d'expliquer les choix de l'architecte à partir d'une *méthode* purement *logique*.

2.2.2.1. La « *black box* »

L'approche *inconsciente* de formulation des idées proposée par Poincaré sera reprise dans les années 1970 par de nombreux théoriciens de la conception architecturale comme Gordon (1961), Osborn (1963) et Broadbent (1966). On retrouvera ainsi la théorie de la « boîte noire », selon laquelle la conception d'un projet serait un processus mental complexe qui pourrait être interprété comme le « génie créateur ». Le « Black box designer » (Fig.12) désignerait ainsi le concepteur qui trouve ses réponses à l'issue d'un processus créatif basé sur la stimulation à partir de la métaphore [Jones, 1969].

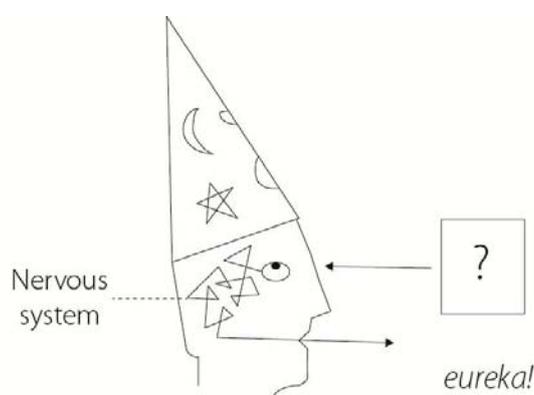


Figure 12. « Black box designer » Design methods, [Jones, 1969]

Certes cette théorie a été refusée dans les années 1990 avec les travaux de Prost et Conan sur les mécanismes de la conception architecturale, mais nous retiendrons un élément important de l'approche de Jones en 1969 : le rôle fondamental de *l'image* dans le processus.

2.2.2.2. Le rôle de *l'image* dans la résolution du problème

Nous avons compris dans quelle mesure l'analyse et la représentation des images étaient cruciales dans la construction de *l'analogie* ainsi que comme outil de *raisonnement*. Il n'est donc pas hasardeux que les études sur la résolution des problèmes rejoignent ceux sur l'imagerie mentale qui ont opposé Kosslyn (1980) et Pylyshyn (1981) sur la nature de représentation des images. Selon le premier, les images auraient une seule forme de représentation de nature *iconique* qui la relierait à *l'objet*. Dans d'autres termes, l'image conserverait toujours ses propriétés *spatiales* et ne pourrait être représentée que sous forme d'une autre image, sous la forme d'une *icône*. Par ailleurs, Pylyshyn considérerait qu'une

image peut être réduite, d'un point de vue syntaxique, à un nom. On pourrait ainsi la transcrire, la mémoriser, la réinterpréter et la décrire [Raynaud, 1999].

Il est certain que les architectes ont recours à l'image: elle aurait un rôle fonctionnel dans la résolution du problème [Carroll, Thomas, Malhotra, 1980]. D'après leurs travaux, les concepteurs auraient recours de façon systématique à une stratégie de représentation figurative, qui leur permettrait de comparer les différentes hypothèses. En effet, la représentation d'une idée permettra de synthétiser les grandes lignes de l'hypothèse étudiée et de les comparer selon certains *critères* définis préalablement.

Nous retiendrons principalement trois aspects qui concernent notre recherche, à propos de la représentation des images.

Le premier concerne le caractère *isomorphique* entre l'image mentale et le bâtiment représenté. Nous avons compris comment Vitruve établissait la relation idée / objet à travers le dessin : celui –ci constitue la *forme* donnée à cette représentation mentale appelée *l'idée*. A partir des études sur la relation entre le bâtiment et sa représentation, les recherches ont conclu que le concepteur conserverait la morphologie d'une image lors de transformations par changement de taille ou par rotation. La représentation d'un bâtiment serait donc isomorphe à l'édifice réel [Bundesen, Larsen, 1975], [Shepard, Cooper, 1982].

Le deuxième aspect concerne la forme de construction des « images mentales ». Le concepteur ferait une sélection de l'information pour construire son propre « modèle mental ». Celui-ci différerait de la réalité car il contiendrait uniquement l'information qui lui serait utile pour résoudre un « sous problème » [Leplat, 1985]. Un exemple concret se situe au niveau de la conception des façades. Ce stade de la conception se situe souvent dans les phases finales de la conception d'un bâtiment. L'expérience relevée en agence⁹ montre que le recours aux images de référence est souvent lié à la conception de l'enveloppe d'un bâtiment. L'information relevée peut correspondre à la composition de la façade comme à l'utilisation d'un matériau en particulier. L'image mentale construite contiendrait des éléments relevés préalablement.

⁹ NFA – Agence Nicolas Favet Architectes. Entreprise rattachée à la convention CIFRE.

Le troisième aspect concerne le degré de *plasticité* de l'image. L'image mentale traduite souvent sous forme *d'esquisse* présenterait un degré de plasticité plus important que celle de l'objet réel. En d'autres termes, elle est plus facilement « manipulable ». L'image constituerait un outil de travail qui permettrait de comparer les différentes hypothèses d'un projet. Elle va *simuler* la réalité, avec un degré de flexibilité encore plus important que la *maquette de travail*.

2.2.3. L'architecturologie

L'architecturologie constitue le troisième grand courant de recherche sur la conception architecturale, développé à partir des travaux de Philippe Boudon en 1971. L'intérêt de ces recherches -que lui-même décrira comme « l'architecture de l'architecture »- se situe au niveau de la compréhension des opérations cognitives propres à l'architecte lors du processus de conception [Boudon, 1971].

Une des premières réflexions introduites par Boudon concernera la *méthodologie* de conception de l'architecte, soit comprendre sur les mécanismes utilisés par le concepteur pour concevoir un bâtiment. D'après Boudon, l'architecture serait en quelque sorte, une « copie » d'autres architectures, ou une « copie » de plusieurs fragments d'architectures. « *Tout bateau est copié d'un autre bateau* » dira t-il en citant Alain¹⁰, afin d'établir un parallèle avec la démarche de conception de l'architecte.

A partir de cette problématique, il introduira une réflexion sur *l'espace architectural* pour faire la distinction entre l'espace *géométrique* et l'espace *architectural*. En effet, l'architecte dispose de la *géométrie* comme outil pour modéliser l'espace architectural, à travers d'esquisses, de maquettes, d'images, etc., cependant il existerait une différence importante entre l'espace *réel* et l'espace *représenté* qui serait rattachée à la notion de *proportion* entre les éléments. Boudon évoquera les notions de « copie » et de « proportion », pour introduire les deux concepts opératoires de *l'architecturologie* : le *modèle* et *l'échelle*. L'architecte se servirait de ces deux instruments pour développer le projet : ils lui permettraient d'appliquer des transformations à une image ou à un concept afin de les reproduire ou les réinterpréter.

¹⁰ Alain, Philosophe français. 1908. Propos, Pléiade t. 1 p. 40-41

L'architecte a recours aux *modèles* tout au long du processus de conception. Ils peuvent correspondre à des références architecturales, des analogies ou des configurations qui vont contenir une certaine quantité d'information. On parlera ainsi de « typologies idylliques » car elles correspondent à une *forme* possédant certaines caractéristiques qui lui permettent d'appartenir à une *catégorie*. C'est à partir de la *transformation* de ces modèles que le concepteur concevrait un projet.

Cependant, les mécanismes de fonctionnement de ces *transformations* sont diverses. En effet, la conception architecturale correspond à la recherche d'une solution ou a des solutions multiples : elle se prêterait ainsi plus à l'observation qu'à l'expérimentation. Mais ceci présente quelques difficultés à l'égard de la recherche sur la conception.

Une première difficulté est reliée à la représentation. Les *modèles* ne se traduiraient pas systématiquement sous formes *d'esquisses*. L'architecte peut avoir recours à sa mémoire et le processus de transformation des images mentales ne pourrait pas être observé.

Le deuxième obstacle correspond aux mécanismes de la pensée, qui est dite *non linéaire*. Le concepteur pourrait effectuer plusieurs opérations de conception de façon simultanée. Il serait donc impossible de les observer ou les analyser en détail.

Le troisième aspect, mis en évidence à partir de l'architecturologie, analyse les aspects *cause / conséquence* de la chaîne décisionnelle du projet. Une opération de conception répondrait rarement à une seule problématique.

L'architecturologie étudie ainsi les transformations *d'échelle* à partir d'un *modèle* pendant la conception, mais s'appuie principalement sur l'observation d'esquisses qui peuvent être documentées. Elle ne s'intéressera pas à l'objet produit mais au passage entre chaque phase du processus.

2.2.4. Modèles théoriques de la démarche de conception

Les recherches sur les mécanismes de la pensée de l'architecte ont ouvert la voie au développement de différents modèles qui décrivent la démarche de conception : processus logique ou créatif, nous retrouverons deux concepts communs aux différents modèles théoriques : *l'image* et la *temporalité*. Les mécanismes de la pensée auront recours à ces deux aspects pendant le processus de conception.

2.2.4.1. *Logique et cognition*

A partir des travaux sur l'image et la pensée, Broadbent tentera une modélisation de la démarche de conception architecturale sous la forme de quatre types de procédés : *pragmatique*, *iconique*, *analogique* et *canonique*. Dans la conception *pragmatique* l'architecte procéderait par une démarche « essai-erreur » en se basant sur les conditions du site. La conception '*iconique*' ferait appel à des « modèles » existants qu'il répéterait en s'adaptant au contexte. La conception *analogique* fonctionnerait par un processus créatif basé sur l'association d'images et la conception *canonique* fonctionnerait à partir d'un système de règles souvent géométriques [Broadbent, 1973].

Cette approche est une des premières à considérer la conception architecturale comme une démarche qui intègre à la fois les aspects théoriques et les aspects cognitifs. On retrouverait *l'analyse* des conditions du site, la mise en place d'un *processus logique* de choix, le recours aux *références* à travers des *modèles* ou des *images* et les modes de conception à partir d'un système de règles de représentation.

Parmi d'autres études, Rowe reprend quelques uns de ces éléments dans *Design Thinking* et propose la compréhension de la conception architecturale à partir de trois approches différentes utilisées par l'architecte. 1- à partir du contexte, 2- à partir d'une typologie, et 3- à partir d'une combinaison de concepts déjà existants [Rowe, 1987].

Le *contexte* va acquérir une importance majeure dans la formulation des modèles numériques de conception architecturale à partir des considérations bioclimatiques issues du choc pétrolier des années 1970. L'Eco-construction a introduit les aspects physiques du climat dans la conception, et les recherches sur ce domaine ont évolué vers des systèmes de *mesure* de la qualité de l'habitat.

La conception à partir d'une *typologie* se traduit comme l'intégration d'un *modèle* pour contribuer à la résolution d'un problème. La typologie se traduirait sous la forme d'un système de classement qui permettrait au concepteur d'anticiper la résolution de différents « sous- problèmes » à partir d'un premier choix dans le système hiérarchique décisionnel (voir Fig. 9).

Le système de combinaison de concepts déjà existants n'est autre qu'une forme d'utilisation des *références*. Avec cette interprétation, Rowe va mettre en évidence une conclusion

importante qui va contribuer largement à la recherche en architecture : le recours aux références ou à l'analogie irait au-delà du domaine de l'architecture et contribuerait pour chaque individu à la construction des leurs propres modes de conception [Raynaud, 1999].

2.2.4.2. Le processus créatif

D'autres recherches ont proposé des *modèles* basés sur les mécanismes de raisonnement d'un concepteur tout au long du processus créatif. C'est ainsi que Fernandez fait référence à quatre modes de raisonnement mis en place dans le processus créatif : le raisonnement déductif, le raisonnement par jugement, le raisonnement par analogie, et le diagnostic [Fernandez, 2002].

Le raisonnement *déductif* agirait comme mécanisme de traitement de l'information. Il permettrait de construire une réflexion à partir d'une expérience relevée, ou vécue. Cette activité est considérée comme inférentielle et se fait de façon récurrente à partir de l'observation.

Le raisonnement par *jugement* est un mécanisme d'évaluation d'une hypothèse, ou de comparaison de plusieurs hypothèses. La définition d'un certain nombre de *critères* permettrait d'évaluer les différentes options à partir d'une approche par *systèmes*. Le concepteur pourrait ainsi décider sous quels *critères* évaluer un choix de projet, et pourrait établir un système hiérarchique afin de s'orienter vers une solution ou une autre.

L'analogie, qui a été traitée sous différents angles dans cette recherche, est étudiée par Fernandez à partir de la relation source / cible. Les modes de transfert entre « l'image source » et le « projet cible » donneraient lieu à différentes formes d'interprétation d'une solution.

Enfin, le *diagnostic* correspond à une phase d'analyse du problème dans laquelle sont intégrées l'observation et l'étude des potentialités du projet dans le site.

A travers cette approche, Fernandez fait une contribution aux travaux sur les mécanismes du processus créatif en architecture. Il abordera cette question comme point de départ d'un sujet qui rejoint notre travail de thèse : l'intégration de la composante énergétique dans les phases de conception. Cependant, son regard sera plutôt orienté à la *pédagogie* du projet d'architecture.

2.2.4.3. Evolution et temporalité du processus

Le processus de conception est une démarche qui a lieu dans une temporalité complexe. Nous avons montré que les différentes phases du projet n'ont pas une relation *linéaire*, mais plutôt *itérative*.

A partir des recherches sur le raisonnement, plusieurs auteurs ont étudié l'aspect de la temporalité du processus de conception. Ces recherches ont porté sur la relation temporelle entre le caractère linéaire de *concrétisation* du projet et le caractère *itératif* du raisonnement de l'architecte. Nous retrouverons plusieurs points en commun dans les recherches à ce propos.

Tout d'abord, une forme de représentation hélicoïdale a souvent été utilisée pour décrire ce processus. Cette figure permet de montrer les relations entre différentes variables, de regrouper différentes phases et de représenter un concept commun: le caractère *évolutif* du processus.

Le modèle d'Asimov- représenté sous forme d'un cylindre (Fig.13) – évolue de façon ascendante de l'abstrait vers le concret, tout en établissant une relation de communication dite « circulaire » entre les différents acteurs. Ceci introduit le caractère itératif de la communication, et élimine les relations hiérarchiques entre eux.

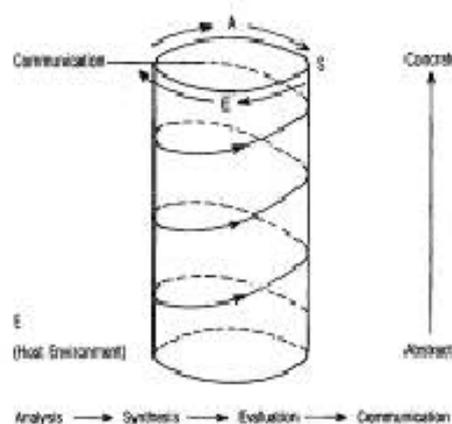


Figure 13. Modèle d'Asimov.

Zeisel proposera en 1981 de définir la conception comme une méthode *d'investigation* [Zeisel, 1981]. Le modèle de Zeisel appelé « *Design development spiral* » (Fig.14) montre que la solution serait issue du processus de résolution qui oriente la démarche du concepteur et il intègre de nombreuses variables au processus. D'après Chupin, le domaine de réponses acceptables deviendrait le tronc commun imaginaire du mouvement spiralé. Les différents tours de la spirale représentent les images successives qui se présenteraient au concepteur, et qui permettraient de « tester » différentes solutions.

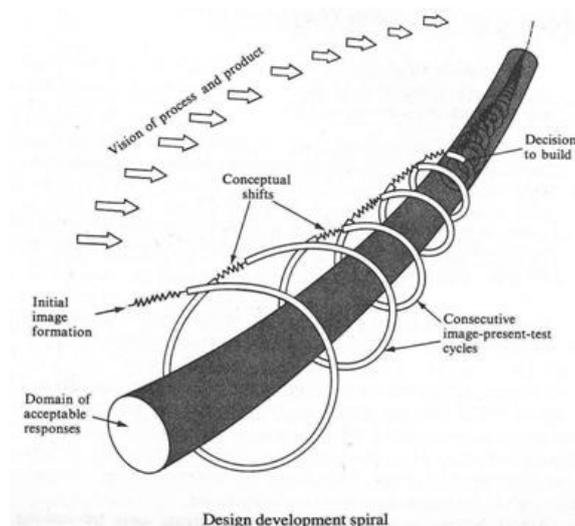


Figure 14. Modèle de Zeisel.

On retrouvera également le caractère évolutif du processus avec une particularité : la spirale est large au début du processus car elle représente « l'image initiale » qui va s'affiner au fur et à mesure que le projet avance. La spirale se rétrécit autour de l'axe central de la construction de la décision : le « domaine de réponses acceptables ».

Le concepteur agira ainsi par « essai – erreur » en soumettant les possibles solutions à des *tests* de vérification qui seront restreints à un domaine proche du « concret » ou du « réalisable ». Mais il faut remarquer que cette solution se construirait autour d'une série d'images, interrompues uniquement par des « espaces » dans lesquels l'architecte développerait des *concepts*.

Conclusion du chapitre

La conception d'un projet correspond d'un point de vue *méthodologique*, à la résolution d'un *problème* en sciences. Celui-ci constitue le point de départ du *projet* et contient à la fois les clés pour la résolution de sa problématique.

Mais il n'existe pas une conceptualisation unique du problème en architecture. La *définition* et *l'interprétation* du problème vont conditionner la solution architecturale. Si bien qu'il existe de multiples approches à la formulation de la solution, l'ensemble des réflexions montrent l'importance de considérer le caractère indissociable de la *formulation du problème* et de la *formulation de la solution*.

Face à un *problème*, le concepteur va essayer tout d'abord faire sa propre *formulation* de ce qui a priori est un problème *mal défini*. Il va aborder la problématique afin de définir des sous-problèmes et ainsi de suite définir la problématique globale finale.

Dans la *formulation de la solution* nous pouvons considérer le déroulement de chaque phase comme la résolution d'un ensemble de problèmes qui lui sont propres. Le concepteur abordera un processus similaire au précédent, en établissant des *sous-solutions* pour définir la solution globale en gardant la cohérence entre les différents aspects de la solution.

Les différents modèles élaborés sur la conception d'un projet coïncident également sur l'importance d'inclure la question de la *temporalité* dans le processus. Ceci explique la superposition de deux diagrammes séquentiels : une séquence en spirale qui représente les allers retours autour d'une problématique, et une séquence linéaire qui articule le processus à partir d'un axe *temps*. La complexité de ces deux relations définit le mécanisme général du processus de conception.

Ces caractéristiques nous ont permis d'établir un plan général de la conception composé de plusieurs phases à priori *linéaires*, mais qui pourtant gardent une structure *itérative* complexe qui va s'articuler autour d'une composante fondamentale qui fait l'objet de notre recherche : la *composante énergétique*.

Conclusion de la première partie

Le *processus* de conception architecturale est une démarche complexe qui met en relation différents degrés de connaissances, dans une approche cognitive et systémique. Ce processus correspond au passage d'une situation problématique à une situation de résolution du problème.

Leur dynamique rend l'analyse méthodologique un outil intéressant pour étudier les mécanismes du processus de conception, si bien cette approche n'est pas suffisante pour étudier les problématiques de la démarche de l'architecte dans toutes ses dimensions.

Mais comment la question des aspects énergétiques s'intègre-elle dans cette logique ? Dans le cadre de cette recherche, nous essayerons de comprendre quel est le rôle de la problématique énergétique dans le processus de conception d'un bâtiment. La première hypothèse de cette thèse est la suivante :

Hypothèse 1

La composante énergétique n'est pas intégrée en amont dans le processus de conception: les outils sont orientés à la résolution du problème énergétique et non pas à la résolution du problème architectural.

Dans la deuxième partie nous étudierons la problématique générale de la *démarche énergétique* et les modes d'intégration dans la conception du projet architectural dans le cas du logement collectif.

Deuxième partie. La démarche énergétique

RESUME: Dans la deuxième partie nous étudierons les différentes composantes de la problématique énergétique. Tout d'abord nous ferons un état de l'art sur la problématique énergétique à l'échelle mondiale, et nous établirons le lien entre l'évolution des différentes politiques d'efficacité énergétique en France et la conception des projets d'habitation. Dans un deuxième temps nous étudierons les composantes architecturales et techniques de l'optimisation énergétique d'un bâtiment. Nous pourrons ainsi analyser la relation entre les composantes énergétiques et la structure générale de conception d'un projet de logements.

Introduction de la deuxième partie

La ville constitue le point de départ de l'activité et de la croissance économique des pays. La forte croissance de la population mondiale au début du XX^{ème} siècle a entraîné l'explosion du taux d'urbanisation : en un siècle, la population mondiale a quadruplé et la consommation d'énergie par habitant a été multipliée par 7¹¹.

Depuis la révolution industrielle la consommation d'énergie de chaque habitant dans la planète n'a pas cessé d'augmenter.¹² On estime aujourd'hui que les villes sont responsables de 75% des consommations énergétiques nationales et cette demande se verra reflétée particulièrement dans l'approvisionnement du résidentiel, secteur spécialement énergivore.

Avec les taux de croissance démographique les agglomérations urbaines doivent faire face à la construction d'infrastructures capables de prévoir les conséquences de l'étalement des villes : l'augmentation et la diversification des réseaux de transports, l'approvisionnement des produits et la demande croissante de services énergétiques. Face à l'épuisement des

¹¹ Source : Ministère de l'Éducation nationale (DGESCO – IGEN). *Sociétés et développement durable*, 2009.

¹² Source: MANICORE. Jean-Marc JANCOVICI.

ressources non renouvelables et la croissance incontrôlée de la population dans le monde, la *problématique énergétique* liée à la construction de logements est devenue un enjeu majeur. Concevoir un logement de qualité, confortable et efficace d'un point de vue énergétique est devenu non seulement une priorité mais un objectif de développement durable pour nos sociétés.

Dans le troisième chapitre nous étudierons la problématique énergétique dans son ensemble, d'abord à l'échelle internationale et postérieurement en regardant plus attentivement le cas de la France à travers les enjeux, les politiques et les réglementations relatives à *l'efficacité énergétique* dans les logements.

Dans le quatrième chapitre nous étudierons les différentes *stratégies de conception* et les *aspects techniques* liés à la réduction de la consommation d'énergie. A partir de cet *état de l'art* de la conception énergétique des logements, nous aborderons la notion de *confort* afin d'établir la relation entre *conception- usage* et *comportement énergétique* d'un bâtiment.

Chapitre 3. La problématique énergétique

« Puisque nous ne pouvons pas supposer que les pays industrialisés seront prêts à baisser leur niveau de vie dans le but de protéger l'environnement, nous devons plutôt viser à une augmentation et une amélioration considérables de l'efficacité énergétique des appareils, des bâtiments, des moyens de transport et des procédés industriels. »

Klaus Daniels (1988)

La question environnementale s'impose aujourd'hui comme élément de structuration des pays face à trois problématiques majeures : la *croissance démographique*, le *réchauffement climatique* et l'*épuiement des ressources* naturelles non renouvelables. Ces trois problématiques qui sont liées au développement des pays, se rejoignent en une question essentielle : *l'énergie*.

Selon le rapport du Fonds des Nations Unies pour la population -UNFPA pour 2011¹³, la pression exercée par la forte croissance démographique mondiale sur les ressources de la planète, entraînera en 2030 un déficit de 40% entre les demandes et les ressources disponibles dans le monde. L'humanité devra ainsi faire face à un accroissement simultané sur la demande de nourriture, d'énergie et de logements.

Le monde est entré dans une ère de transition énergétique qui impose la réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation des ressources renouvelables. Le secteur résidentiel constitue à la fois un enjeu majeur et un axe stratégique pour l'atteinte de ces objectifs.

Nous porterons un regard sur la problématique énergétique mondiale et les différentes politiques et directives sur l'efficacité énergétique en Europe. A partir de la problématique énergétique du logement en France nous analyserons l'impact des réglementations sur la conception architecturale des bâtiments résidentiels.

¹³ UNFPA. Fonds des Nations Unies pour la population. *Etat de la population mondiale 2011. 7 milliards de personnes, leur monde, leurs possibilités*. <http://foweb.unfpa.org/SWP2011/reports/FR-SWOP2011.pdf>

3.1. Problématique énergétique dans le monde

3.1.1. Facteurs de la problématique énergétique

Les facteurs de la problématique énergétique dans le monde sont diverses, mais on peut en distinguer quatre aspects principaux qui font pression sur l'aspect énergétique: la croissance démographique, les phénomènes d'urbanisation, le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources.

3.1.1.1. La croissance démographique

Selon le rapport de l'ONU en 2011 sur la croissance démographique¹⁴, la population mondiale a atteint le chiffre historique de 7 milliards d'habitants. D'après les estimations, cette population pourrait atteindre les 10 à 15 milliards d'habitants à la fin du siècle. Bien que le taux de fécondité moyen soit en légère diminution par rapport aux années 60, la croissance de la population est constante et accélérée¹⁵.

L'accroissement de l'espérance de vie est passé d'environ 48 ans au début des années 1950 à environ 68 ans dans la période 2000 – 2010. La mortalité infantile est passée de 133 décès pour 1000 naissances en 1950 à 46 pour 1000 dans la période 2005 – 2010¹⁶.

Les taux de fécondité¹⁷ ont en moyenne diminué de 6 à 2,5 enfants compte tenu du développement des pays, de la croissance économique et des phénomènes socioculturels de l'émancipation féminine. Cependant, ces taux varient en fonction de chaque région.

Dans les pays les plus pauvres, les taux de fécondité élevés sont associés à la perpétuation de la pauvreté, tandis que dans les plus riches les taux de fécondité diminuent et la population

¹⁴ UNFPA. Fonds des Nations Unies pour la population. *Etat de la population mondiale 2011. 7 milliards de personnes, leur monde, leurs possibilités*. <http://foweb.unfpa.org/SWP2011/reports/FR-SWOP2011.pdf>

¹⁵ Ibid. Selon le rapport de l'UNFPA, la croissance rapide de la population mondiale est un phénomène récent. Il y a 2 000 ans environ, la population mondiale était d'environ 300 millions de personnes et il a fallu plus de 1 600 ans pour qu'elle double. La croissance démographique rapide a commencé en 1950, sous l'effet des réductions de la mortalité dans les régions les moins développées, et la population du globe a atteint 6,1 milliards d'habitants en 2000, soit près de 2,5 fois la population de 1950. Source : Division de la population, Département des affaires économiques et sociales, Nations Unies.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ La fécondité peut être mesurée de différentes formes. Dans ce cas, elle correspond au nombre moyen d'enfants prévus par femme au cours de sa vie procréative.

vieillit. C'est ainsi que les économies du monde sont affectées compte tenu du faible approvisionnement en ressources pour la population ou de la pénurie de main d'œuvre dans les pays industrialisés. Malgré la diminution moyenne de la fécondité, la population mondiale continue d'augmenter d'environ 80 millions de personnes par an.

La croissance démographique entraînera un phénomène d'urbanisation des villes qui va peser lourd sur la demande énergétique.

3.1.1.2. Le phénomène d'urbanisation

La croissance démographique est accompagnée d'un phénomène d'urbanisation sans précédents : la croissance accélérée des agglomérations urbaines (Fig.16).

À la fin du XVIIIème siècle, la plupart des villes comptaient entre 2000 et 10000 habitants, les plus importantes atteignant 30000. Paris comptait 500.000 habitants en 1700. À la fin du XIXème siècle, plus de la moitié des Britanniques et des Allemands habitaient une aire urbaine. En 1920, 51% de la population américaine était urbaine. En 1950, on comptait cinq mégalo-poles de 5 millions d'habitants. En 1980, le monde comptait 230 cités de plus d'un million d'habitants (6 dépassaient les 3 millions, 22 les 5 millions). En 2025 on comptera une centaine.

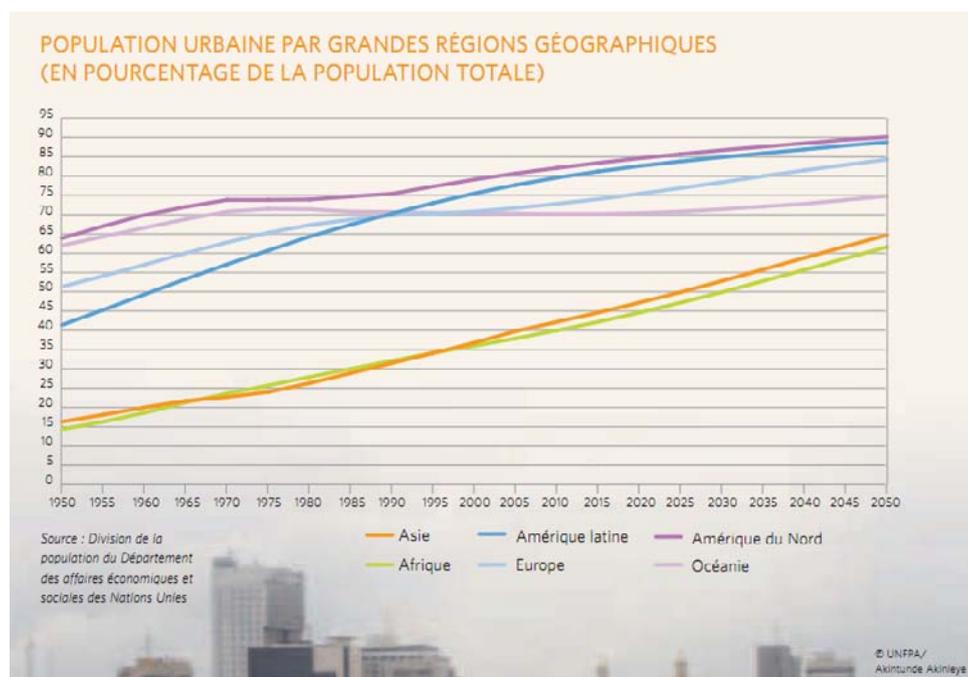


Figure 15. Population urbaine par grandes régions géographiques en pourcentage

En Europe, 70% de la population habite dans une zone urbaine, ce taux devrait se stabiliser aux alentours de 82 % en 2015¹⁸. Plus de 800 000 hectares du territoire européen ont été urbanisés entre 1990 et 2000. Plus d'un quart du territoire de l'Union européenne est déjà affecté par l'urbanisation et cette superficie pourrait doubler en un peu plus d'un siècle¹⁹.

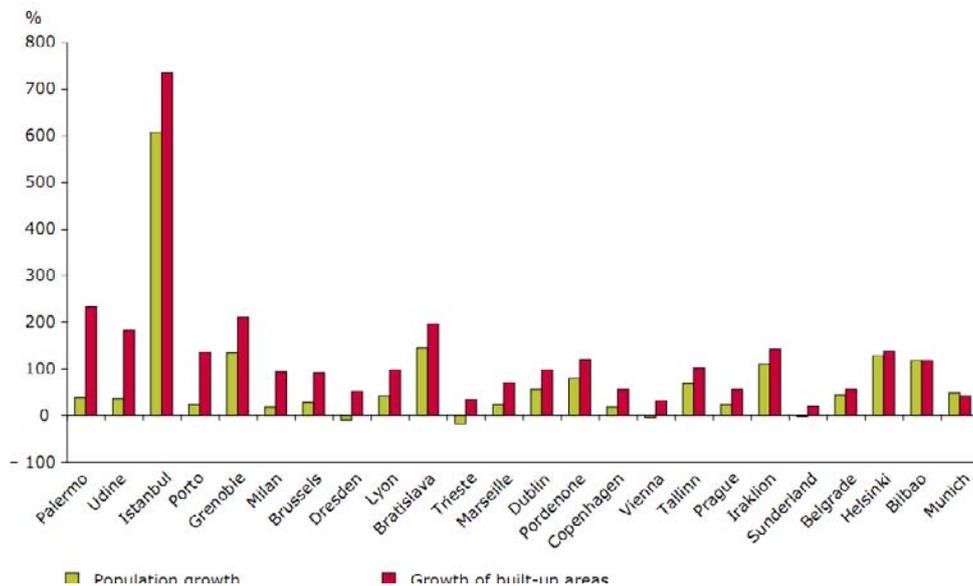


Figure 16. Croissance annuelle des agglomérations urbaines Européennes ente 1950 et 1990.

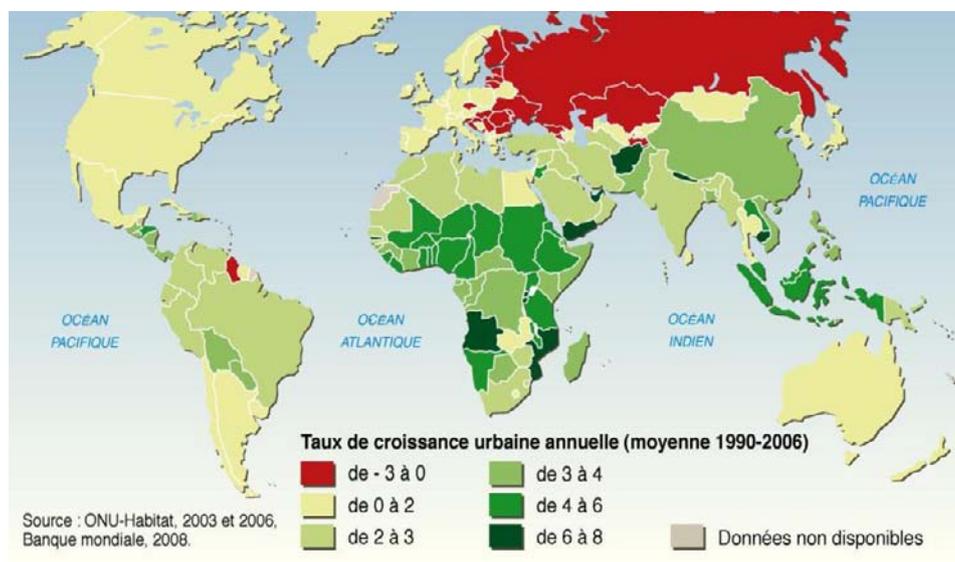


Figure 17. Taux de croissance urbaine annuelle (moyenne 1990 – 2006).

¹⁸ Source : UNEP. United Nations Environment Program.

¹⁹ EEA - European Environment Agency. Urban sprawl in Europe : The ignored challenge, 2006.

Une personne sur deux vit aujourd'hui dans un milieu urbain. Selon l'ONU, deux tiers de la population mondiale sera urbaine en 2030 et pourtant, les agglomérations sont déjà responsables de la plupart de la consommation énergétique mondiale.

Les villes sont d'importants moteurs de croissance et participent au développement social, économique et technologique des pays. L'étalement des zones urbaines reflète à la fois l'accroissement de la population ainsi que l'évolution des modes de vie et de consommation. La demande accrue de logements, de ressources et de transports, entraîne une augmentation de la pression sur les territoires et par conséquent un accroissement de l'approvisionnement en énergie.

Actuellement les villes consomment 67% de l'énergie mondiale. Selon l'IAE (Agence Internationale de l'Energie) l'évolution de l'urbanisation entraînera une augmentation de la demande énergétique de 2% par an. Selon les prévisions, les villes consommeront 73% de l'énergie mondiale en 2030.

3.1.1.3. Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique apparaît comme une menace majeure pour le monde. Les activités humaines dans les villes se traduisent également par des émissions importantes de gaz à effet de serre. D'après le 4^{ème} rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat²⁰), ces émissions seraient pour la plupart responsables de l'augmentation de la température de la planète²¹.

Les émissions de GES sont générées principalement par les activités dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'industrie, de l'agriculture et du bâtiment (Fig. 28), qui ont recours pour la plupart à la combustion d'hydrocarbures.

Les émissions ont augmenté d'environ 70% entre 1970 et 2004. Le dioxyde de carbone (CO₂) étant la principale source, a augmenté de 80% dans la même période. La majeure partie de la hausse d'émissions de CO₂ provient l'approvisionnement en énergie et du transport routier. Les émissions de méthane (CH₄) ont augmenté d'environ 40% par

²⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. <http://www.ipcc.ch/>

²¹ Le 4^{ème} rapport du GIEC annonce un 90% de certitude contre 66% de certitude présenté dans le 3^{ème} rapport de 2001

rapport à 1970, dont 85% proviennent de l'utilisation des combustibles fossiles. L'agriculture reste cependant la plus grande source d'émissions de méthane (Fig.18)²².

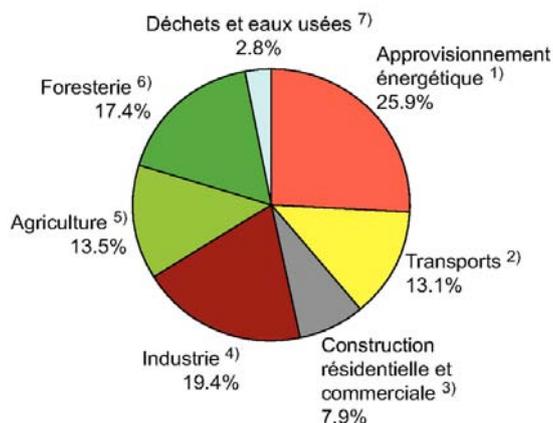


Figure 18. Emissions de GES dans le monde par secteur en 2004.

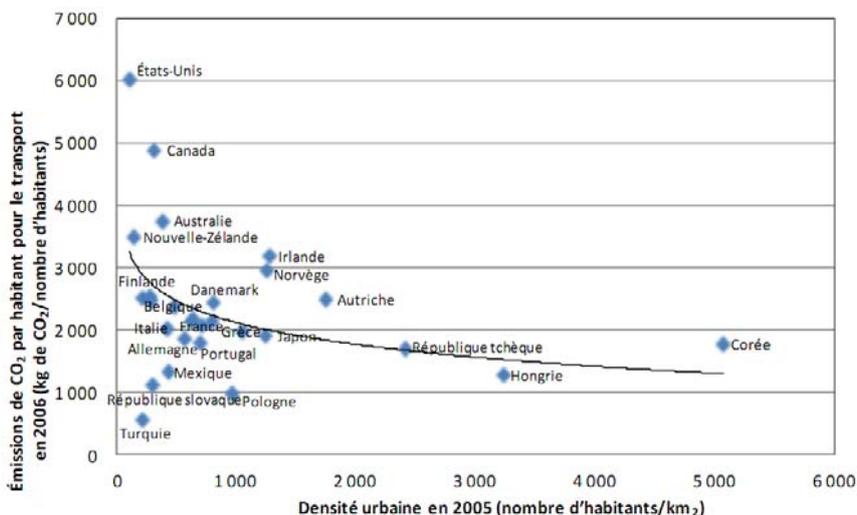


Figure 19. Emissions de CO² dues à la consommation d'énergie par pays.

Actuellement les villes sont responsables de 70% des émissions mondiales de CO². On a constaté également que la forme urbaine joue un rôle important : moins la ville est dense, plus elle consomme d'énergie, principalement pour les transports. Les émissions de CO² des pays dont leurs villes sont plus denses, sont ainsi moins importantes (Fig.19)²³.

²² Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. <http://www.ipcc.ch/>

²³ AIE – Agence Internationale de l'énergie. 2008. *Emissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie*. OCDE/AIE, Paris

3.1.1.4. L'épuisement des ressources

L'urbanisation entraîne également une forte hausse de la consommation de ressources nécessaires au développement des villes, tant pour ses habitants que pour ses activités économiques.

3.1.1.4.1. Ressources minérales

Nous pouvons distinguer principalement les sources d'approvisionnement en énergie mais on peut ajouter également la consommation de plusieurs éléments : l'aluminium, l'acier, ainsi que les plastiques et les substances synthétiques. En outre, l'expansion urbaine crée une demande de matériaux de construction comme les argiles, le sable, le gravier, et la roche pour la fabrication du béton, ainsi que du ciment, et de la pierraille ou du bitume pour le revêtement des routes.

D'après le rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement de 2011²⁴, le volume de minéraux, minerais, combustibles fossiles et biomasse consommés chaque année dans le monde pourrait être multipliée par 3 d'ici 2050. La consommation de ces quatre types de ressources clés varie entre 16 et 40 tonnes par an et par habitant dans les pays développés, tandis que dans un pays en développement comme l'Inde, cette consommation est de l'ordre de 4 tonnes par an et par habitant. Si on observe la progression au niveau mondial, les chiffres sont dévastateurs : la consommation moyenne de ressources d'un habitant²⁵ s'élevait à 10 tonnes par an en 2000, soit le double qu'en 1900.

Les combustibles de biomasse fournissent aujourd'hui de 25 à 90% de l'énergie domestique en fonction des régions. Bien que la consommation urbaine de bois comme combustible ne soit pas généralisée, il est de plus en plus utilisé dans l'industrie de la construction. Du fait de ces deux usages on constate la diminution des zones forestières autour de certaines agglomérations urbaines. En Inde, la densité du couvert forestier a diminué de 20 à 30% de 1960 à 1986. Au Sénégal, la production de charbon de bois déboise

²⁴ UNEP. Programme de Nations Unies pour l'environnement. *La consommation des ressources des taux de croissance économique, 2011.*

²⁵ La consommation de ressources par habitant est calculée en divisant le total des extractions de minéraux, de minerais, de combustibles fossiles et de biomasse, par les chiffres de la population.

18 000 à 33 000 ha par an, soit 11 à 20% de la déforestation annuelle. Ceci contribue à la dégradation du sol, à l'évaporation de l'eau et à la perte d'espèces animales et végétales. En Pologne, les mines de charbon représentent la première de dégradation de l'eau et du sol. Plus de 20 000 ha ont été dégradées depuis 1975. La répartition des réserves de charbon est certes plus favorable aux grands pays consommateurs, mais le développement du charbon entraîne le problème des émissions de CO₂.

Cependant, l'économie actuelle est basée sur les combustibles fossiles. Certains secteurs comme le transport et la pétrochimie dépendent quasi-exclusivement du pétrole. Les besoins dans le domaine des transports -tant routiers comme aériens- augmentent rapidement. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), on prévoit une augmentation de 130 % du trafic passagers et de 200 % du trafic marchandises dans les 20 prochaines années. Ceci va entraîner l'augmentation vertigineuse de la demande de carburants, qui représente déjà près de 50 % de la consommation de pétrole. Cette pression sur les ressources fossiles, entraîne leur disparition.

Bien que les différents rapports de l'industrie pétrolière²⁶ repoussent régulièrement à 40 ans la limite des réserves disponibles, la découverte de gisements de pétrole et de gaz chaque année est inférieure au rythme de la consommation (Fig.20). Aujourd'hui on ne renouvelle annuellement qu'un tiers des réserves prouvées et consommées dans le monde.

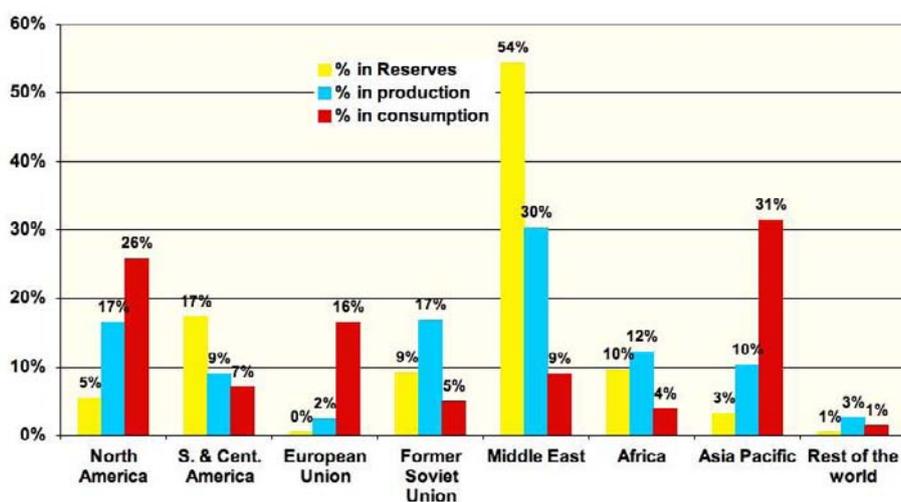


Figure 20. Production pétrolière par régions. Source : BP Statistical Review, 2011

²⁶ BP Statistical Review, 2006.

Au rythme actuel de consommation, le pétrole sera la première source d'énergie fossile à disparaître. Selon les estimations de l'industrie pétrolière, le gaz naturel pourrait être exploité encore pendant 70 ans. En ce qui concerne le charbon, il y aurait encore deux siècles de réserves, mais son exploitation et sa consommation génère des problèmes de dégradation de l'environnement.

Mais les études plus précises sur l'exploitation des ressources fossiles montrent que le pic de production mondiale a atteint un maximum entre les années 2000-2010 et a été déjà dépassé. Cette courbe porte le nom de « *pic de Hubbert* ²⁷ ». Hubbert fut le premier scientifique à démontrer que la production de pétrole atteindrait un maximum et déclinerait par la suite jusqu'à son épuisement. Ses premières prédictions ont situé ce pic dans les années 70 [Hubbert, 1949], mais l'apparition de nouveaux gisements à travers le monde a repoussé cette courbe de 30 ans (Fig.21).

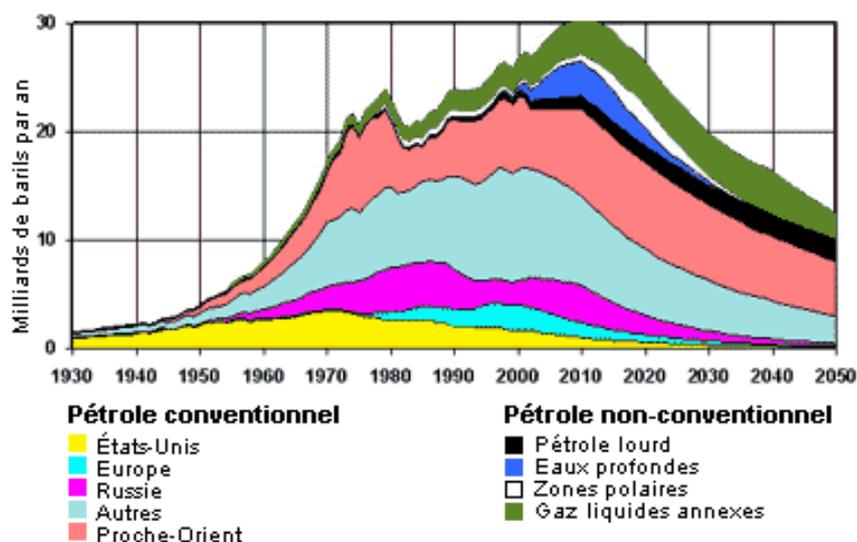


Figure 21. Production pétrolière annuelle par région et type d'hydrocarbure. Source : ASPO , 2003.

Le lobby de l'industrie pétrolière s'appuie sur l'exploitation des nouveaux gisements de pétrole « lourd » -issu des sables bitumineux- au Canada et au Venezuela, ou les puits « profonds » de l'Alaska, le Brésil ou l'océan Arctique. Des simulations réalisées par le

²⁷ Dans les années 1940, le géologue américain King Hubbert avait prédit que la production de pétrole aux USA atteindrait son maximum aux alentours de 1970 avant de commencer à décroître.

département du transport australien²⁸ montrent que même en tenant compte des nouveaux gisements, le pic ne pourra pas être atteint à nouveau mais qu'il pourra être maintenu encore quelques années. Selon ces estimations, le Canada deviendrait dans une cinquantaine d'années le premier producteur de pétrole du monde (Fig.22).

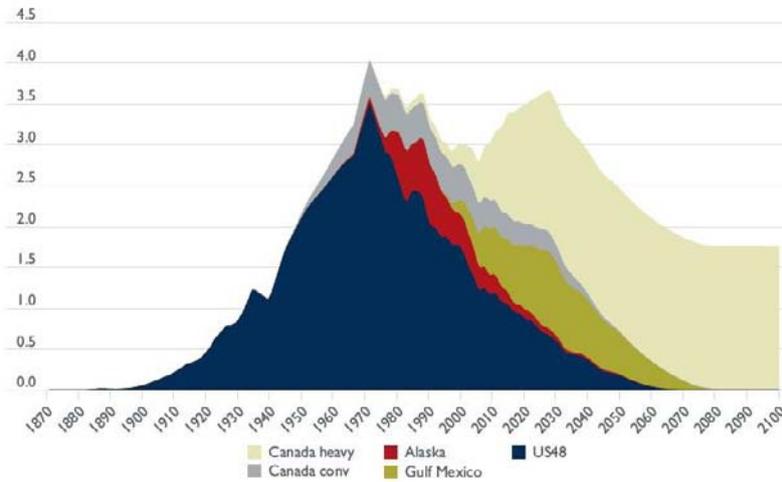


Figure 22. Estimations de la production pétrolière annuelle en Amérique du nord. Source : BITRE.

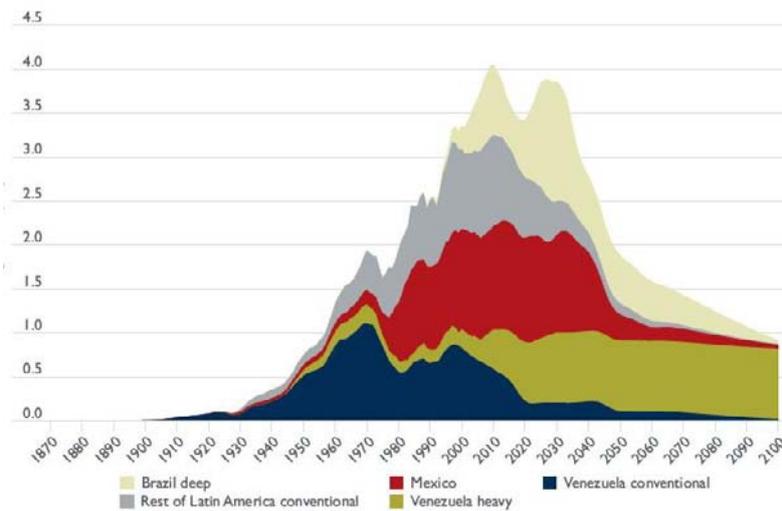


Figure 23. Estimations de la production pétrolière annuelle en Amérique latine. Source : BITRE.

²⁸ "Transport energy futures: long-term oil supply trends and projections" BITRE, 2009.

En Amérique du sud la situation est légèrement différente. Selon la même étude le pic pétrolier à été dépassé au Venezuela, même en tenant compte des extra-lourds de l'Orénoque. Le Mexique est en train de dépasser le sien et le reste de l'Amérique latine à son pic en cours. L'exploitation non conventionnelle off-shore du Brésil et le pétrole « lourd » du Venezuela permettront d'obtenir un pic secondaire vers 2030 (Fig.23).

Toutefois, l'exploitation du pétrole issu des sables bitumineux – dit *non conventionnel* -est une pratique extrêmement coûteuse pour l'environnement. La ressource première étant le *bitume* (substance visqueuse composée d'un mélange d'hydrocarbures), elle doit être d'abord extraite et puis transformé en pétrole. Des grandes surfaces de sol sont dévastées et polluées avec des rejets chimiques. Le procédé d'extraction nécessite des énormes quantités d'eau et de gaz naturel. La somme de ces facteurs porte des conséquences néfastes sur la qualité de l'air, de l'eau et du sol. De plus, la production de chaque baril de pétrole à pour conséquence le rejet de 190kg de GES dans l'atmosphère.

Plusieurs états misent donc sur le développement de l'énergie nucléaire, mais selon l'International Atomic Energy Agency (AIEA) et la World Nuclear Association, les réserves actuelles d'uranium pourraient couvrir le fonctionnement des réacteurs uniquement pendant 30 à 60 ans en fonction du prix de l'uranium. L'exploitation de la somme de réserves encore non exploitées pourrait prolonger cette source d'énergie pendant 200 ans. Toutefois, cette énergie ne représente que 7% de la production d'énergie mondiale, et ceci pose encore la question de la sécurité nucléaire et du traitement des déchets radioactifs.

Les enjeux économiques sont donc majeurs et constituent une variable déterminante dans les stratégies énergétiques des différents pays à travers le monde. Hubbert, écrira en 1981 :

« La civilisation industrielle du monde actuel est handicapée par la coexistence de deux systèmes intellectuels qui sont universels, qui s'entrecroisent, et qui sont à la fois incompatibles : La connaissance cumulée des quatre derniers siècles sur les propriétés et les interrelations de la question énergétique et la culture économique qui lui est associée et qui a évolué depuis des origines préhistoriques. »

"Le premier de ces deux systèmes a été responsable de la hausse spectaculaire -principalement au cours des deux derniers siècles- du système industriel actuel et il est essentiel pour son maintien. Le second, un héritage du passé préscientifique, fonctionne par ses propres règles qui ont très peu en commun avec celles de la question énergétique. Néanmoins, le système monétaire, au moyen d'un couple lâche, exerce un contrôle général sur le système énergétique sur lequel il est super[im]posé.

3.1.1.4.2. Ressources en eau

Le développement des villes entraîne également la problématique de la croissance de la demande d'approvisionnement en eau. La demande croissante de ce liquide vital conjuguée à la contamination des sources, crée des problèmes d'approvisionnement urbain.

Selon le rapport de l'ONU de 2006²⁹ sur les ressources en eau, l'eau est de plus en plus rare, et de moins en moins de qualité. L'agriculture est responsable de 70% de la consommation d'eau, tandis que l'industrie participe à hauteur de 20% de la consommation. Les industries de manufacture et d'exploitation de minéraux sont les principales responsables de la contamination des sources d'eau. La consommation domestique représente de 8 à 10% de la consommation totale.

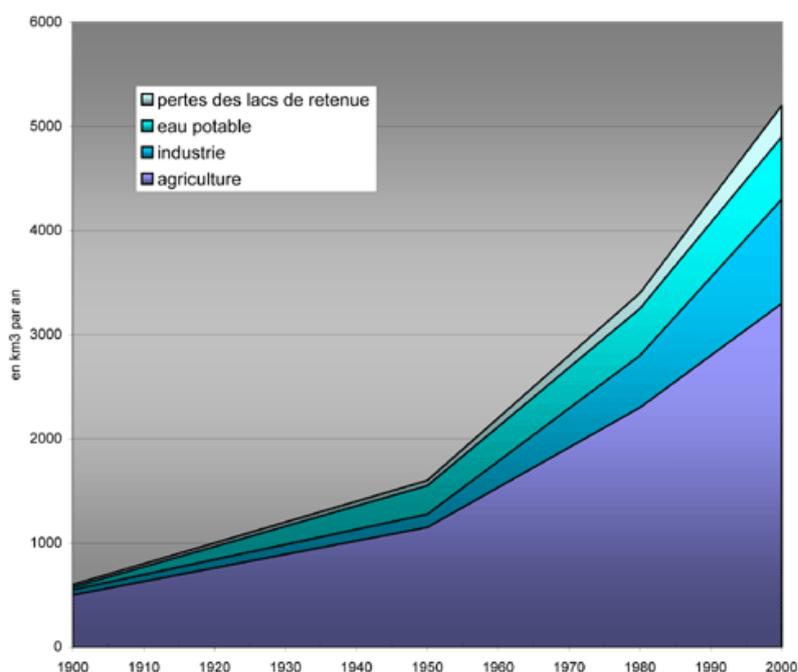


Figure 24. Evolution de la consommation mondiale d'eau. Source : UNESCO.

Depuis le début du XX^{ème} siècle, la consommation d'eau a été multipliée par sept (Fig.24). Selon les projections, la demande totale d'eau dans des pays comme l'Inde et la Chine va doubler d'ici à 2025.

²⁹ UNESCO. (2006) Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau. *L'eau, une responsabilité partagée*. 2^{ème} rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau.

Aux Etats Unis et à Mexico les nappes phréatiques se vident plus vite qu'elles ne se remplissent. En URSS l'utilisation de l'eau pour les cultures de coton en Asie centrale a fait diminuer de 60% la superficie de la mer d'Aral depuis les années 1960. La mer morte baisse d'un mètre par an, et en Afrique le lac Tchad a perdu 80% de sa superficie dans les dernières années. Le fleuve Jaune en Chine est asséché durant plus de 200 jours certaines années.

Il existe une relation étroite entre l'eau et l'énergie. L'analyse simultanée de l'utilisation de ces deux ressources permettrait un gain de productivité et de durabilité dans leur utilisation. En effet, les systèmes de production d'eau et d'électricité relatifs au pompage des eaux souterraines, aux technologies de dessalement et aux systèmes de distribution, nécessitent des systèmes électriques. Leur gestion efficace permettrait de réduire les besoins en électricité et d'économiser des grandes quantités d'eau.

3.1.2. Evolution des enjeux environnementaux à l'échelle internationale

Depuis les années soixante le monde a commencé à se poser la question de la relation entre le développement et l'épuisement des ressources. Cette réflexion a donné lieu à la publication du rapport du Club de Rome en 1972³⁰, qui tire le premier signal d'alarme : les ressources énergétiques telles que le pétrole et le gaz ne seraient pas suffisantes pour assurer la pérennité du développement. Ce rapport coïncidera avec la conférence de Stockholm en 1972³¹, qui place pour la première fois les questions écologiques au rang des préoccupations internationales.

Suite à cette conférence suivront les *sommets de la terre*³² de Nairobi en 1982, qui sera particulièrement un échec. En 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU publiera « *Our Common Future* », baptisé plus tard comme le Rapport Brutland, dans lequel pour la première fois est adoptée la notion de *développement durable* ou « *sustainable development* ».

Ce rapport servira de base pour le sommet de la terre à Rio de Janeiro en 1992. La convention de Rio³³ sera la première à mettre en place des actions importantes comme le *l'Agenda 21*³⁴, la création du PNUE³⁵, la *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*³⁶ et le GIEC³⁷, qui publiera un deuxième rapport en 1995 à propos

³⁰ Club de Rome. *The limits to growth*, 1972. Selon le rapport, le "système mondial" serait menacé par une croissance économique qui va plus vite que la croissance démographique exponentielle, entraînant la surconsommation des ressources et la dégradation de l'écosystème. Cette thèse défend l'arrêt de la croissance économique et démographique et sa substitution par répartition équilibrée des richesses des pays.

³¹ Conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain à Stockholm, Suède. Elle donne lieu à l'organisation des Sommets de la Terre tous les 10 ans.

³² La Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement ou Les Sommets de la Terre, sont des rencontres décennales organisées par l'ONU depuis 1972 dans l'objectif de définir les moyens de stimuler le développement durable au niveau mondial.

³³ Le Sommet de Rio en 1992 s'est conclu par la signature de la Déclaration de Rio, qui fixe les lignes d'action, les droits et les responsabilités des pays en matière environnementale.

³⁴ Le Plan d'Action 21 est un plan d'action de mesures environnementales destiné aux collectivités territoriales.

³⁵ United Nations Environment Programme, UNEP, est un l'organisme créé en 1972 dans l'objectif d'encourager le développement durable à travers la mise en œuvre de politiques environnementales dans les pays.

³⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). La convention adoptée par le Sommet de Rio en 1992, reprend les principes contenus dans la déclaration finale de Rio, et laisse la possibilité de la compléter par des

de l'influence de l'homme sur le climat de la planète. Ce rapport ouvrira la voie postérieurement au protocole de Kyoto³⁸ en 1997. Cet accord constitue le premier vrai engagement en termes environnementaux au niveau international. Le troisième rapport du GIEC en 2001 signalera des preuves de l'influence de l'activité humaine sur le climat, mais le monde devra attendre un quatrième rapport en 2007 pour connaître un tournant dans la problématique environnementale. Le rapport élèvera de 66% (en 2001) à plus de 90%, le taux de certitude de l'influence de l'homme sur le climat, ainsi qu'il tirera le signal d'alarme à propos des conséquences du réchauffement climatique planétaire pour les années à venir.

Le protocole de Kyoto signé en 2005 sera ratifié par la plupart des pays du monde en 2009 à l'exception des Etats Unis et du Canada. D'ailleurs ce dernier décidera de se retirer en décembre 2011. L'objectif du protocole est de travailler pour un droit international de l'environnement, qui permette d'engager les différentes parties et de contrôler ou sanctionner celles qui ne respectent pas les objectifs, mais il est évident que cet engagement a du mal à s'installer dans certaines économies dépendantes encore de la consommation de ressources fossiles qui génèrent des forts taux d'émissions de GES.

Depuis les années 2000, la lutte contre le réchauffement climatique est devenue une priorité politique dans le monde mais plus particulièrement dans l'Union Européenne. Celle-ci a mis en place des politiques publiques menées à l'échelle du continent et dans chaque pays. Lors du Conseil européen de mars 2007, le continent s'est fixé l'objectif 3 x 20 : A l'horizon 2020, diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre, augmenter l'efficacité énergétique de 20 % et porter la part des énergies renouvelables à hauteur de 20 % de la consommation d'énergie.

En 2009 l'Union Européenne a adopté la limite de 2°C comme niveau maximum de la hausse de la température, ce qui se traduit par une réduction de 50 % des émissions de GES

engagements ultérieurs dans le cadre d'un régime international. Elle donnera lieu au Protocole de Kyoto et à l'Accord de Copenhague (COP 15).

³⁷ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC. En anglais IPCC – International panel on climate change. Cette organisation, créée en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, a pour mission l'évaluation scientifique des risques de changement climatique causées par l'homme. Elle a produit quatre rapports d'évaluation : en 1990, 1995, 2001 et 2007. Son cinquième rapport (AR5) apparaîtra en 2014. Source : <http://www.ipcc.ch/>

³⁸ Le protocole de Kyoto est un accord international en faveur de la réduction des Gaz à effet de serre.

d'ici 2050. Ceci se traduit par une diminution de 80 à 95 % des émissions par rapport aux niveaux de 1990. Elle a enfin réitéré son objectif de réduire ses émissions de 30 % d'ici 2030 en cas d'un accord international contre le réchauffement climatique.

En 2011, 191 pays ont signé et ratifié le protocole de Kyoto, mais il existe encore des divergences dans le positionnement des différents pays face à la problématique du développement durable. Par ailleurs, la situation est inégale entre les pays développés. L'Europe qui a marqué jusqu'à présent le leadership dans les engagements environnementaux, connaît l'instabilité économique de ses différents pays membres, mettant en risque la cohésion de l'UE et l'atteinte des objectifs fixés par le protocole. D'autres pays développés comme les Etats Unis ou le Canada sont réticents à sa ratification, sous prétexte d'être en situation inégale face aux pays en voie de développement –qui n'ont pas d'objectif quantifié de réduction de leurs émissions- et face aux nouvelles puissances économiques car ceci se traduirait par une perte de compétitivité face aux économies émergentes qui sont très polluantes.

En ce qui concerne ces pays émergents comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, leurs priorités sont plus liées au développement économique qu'au développement durable. Ils considèrent que les pays développés sont pour la plupart responsables du changement climatique, car ils ont provoqué historiquement la forte hausse des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Suite à la difficulté de trouver un accord entre les différentes parties, la mise en œuvre du protocole est mise en danger. Le cas du Canada reflète bien cette situation, car les objectifs environnementaux vont à contresens avec les procédés d'exploitation de leurs nouveaux gisements de pétrole, dit *non conventionnel*, et remettraient en question l'opportunité de ce pays de jouer un rôle dominant dans un futur scénario géopolitique qui parierait sur une lente transition énergétique.

La décision de ce pays de se retirer du protocole de Kyoto marque un précédent qui met en péril l'engagement mondial dans la lutte contre le changement climatique. La relation étroite entre les objectifs de réduction des émissions de GES et les enjeux économiques, reflète l'importance des enjeux environnementaux dans le scénario géopolitique mondial pour les années à venir.

3.1.3. La conjoncture actuelle et les défis à relever

3.1.3.1. Situation actuelle

L'utilisation de l'énergie a une grande partie de responsabilité dans les problèmes environnementaux de la planète. Non seulement l'ensemble de ressources naturelles est en train de s'épuiser, mais l'exploitation et la consommation de combustibles fossiles génèrent de la pollution à plusieurs niveaux, dont la conséquence la plus grave est le changement climatique.

En effet, la consommation énergétique repose essentiellement sur les combustibles fossiles (Fig.25) : ils représentent un peu plus de 80% de l'énergie primaire³⁹ consommée sur la planète. Le pétrole et le gaz représentent 57 % de la fourniture d'énergie primaire et le charbon 23 %⁴⁰.

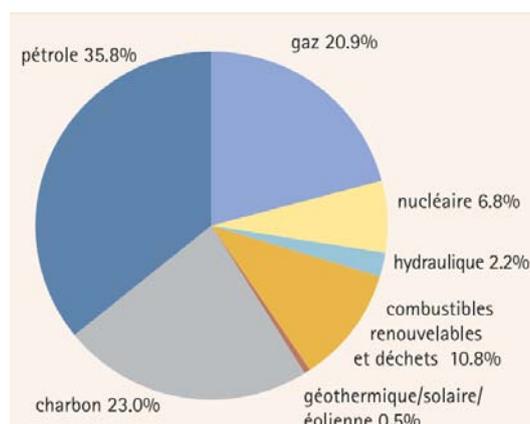


Figure 25. Energie primaire totale par source. Agence Internationale de l'Energie (IEA), 2005.

Les réserves fossiles se trouvent inégalement réparties et se trouvent majoritairement dans des régions éloignées des principales zones de consommation, ce qui pose non seulement des problèmes transport mais qui génère également des tensions géopolitiques.

³⁹ L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium. Source : INSEE

⁴⁰ AIE – Agence Internationale de l'énergie. 2004

3.1.3.2. Une transition énergétique dans l'avenir

Les énergies renouvelables semblent constituer une voie d'avenir. Les solutions alternatives d'énergie comme l'éolien ou le solaire utilisent des ressources renouvelables et causent un faible impact sur l'environnement mais elles posent des problèmes de rentabilité économique car elles ne sont pas capables d'égaliser – pour l'instant- le rendement énergétique du pétrole et du nucléaire. Il s'impose donc une phase de transition pour faire face à la demande croissante d'énergie et aux problèmes de pollution.

D'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la demande énergétique mondiale pourrait augmenter de plus de 50% d'ici à 2030. Face à la croissance démographique et au développement des pays, le monde s'interroge sur la gestion de ses ressources énergétiques, car le modèle actuel n'est pas durable. Il doit initier une ère de *transition énergétique* en passant d'un modèle basé sur les énergies fossiles, à un modèle énergétique sans carbone.

Pour répondre à la demande actuelle d'énergie, il est nécessaire une part d'énergies renouvelables de l'ordre de 50% de la consommation mondiale d'énergie. Or, les prévisions actuelles sont de l'ordre de 40% à l'horizon 2050 car les énergies renouvelables ne permettent pas de substituer la demande en une courte période. La *transition énergétique* sera donc de longue durée mais le défi du changement climatique impose une transition plus rapide. Le monde est engagé depuis 50 ans dans une stratégie de développement durable pour faire face à ces problématiques environnementales.

3.1.3.3. Les axes de travail

Face à ces défis, et dans l'attente de nouveaux progrès technologiques pour le développement des énergies renouvelables ou la découverte d'énergies de substitution, il faut une transformation du modèle énergétique actuel qui n'est pas durable. La seule voie réaliste qui s'impose à présent est celle de l'augmentation de l'efficacité énergétique.

Augmenter l'efficacité énergétique correspond à réduire la consommation d'énergie dans tous les domaines, ainsi qu'à améliorer le rendement de tous les espaces, les équipements et les installations qui utilisent de l'énergie. Dans nos sociétés actuelles et plus particulièrement dans les agglomérations urbaines, cet objectif exige une réflexion sur nos *modes de vie* et sur notre capacité à nous adapter à des nouveaux environnements dans les différents secteurs. On parlera d'optimisation de la *productivité énergétique*.

D'après un rapport du Conseil Mondial de l'énergie en 2007⁴¹, l'augmentation de la productivité de l'énergie a permis d'économiser 4,4 milliards de tep⁴² d'énergie en 2006, et d'éviter l'émission de 10 milliards de tonnes de CO². Les enjeux de la productivité énergétique se situent donc dans les secteurs plus consommateurs d'énergie dont l'industrie, les transports et le bâtiment.

Mais la *productivité* énergétique est répartie inégalement à travers le monde. D'après l'indice d'*Intensité énergétique* qui mesure la consommation d'énergie par point de PIB⁴³, deux tiers du monde ont baissé leur intensité énergétique. Parmi tous ces pays, 40% d'entre eux (70 pays) ont diminué cette consommation de 1% par an, et 25% (40 pays) ont diminué leur consommation de plus de 2% par an. L'Europe est la région du monde avec la plus faible intensité énergétique, avec 30% de moins que l'Amérique du Nord. La Chine a une intensité énergétique 40% supérieure à celle de l'Europe. Ce rapport permet d'établir une relation entre les intensités finales et le développement économique d'un pays. En règle générale les intensités diminuent dans les pays plus développés et importateurs d'énergie, tandis qu'elles augmentent dans les pays producteurs de pétrole n'appartenant pas à l'OCDE⁴⁴.

3.1.3.3.1. L'industrie.

L'industrie est le secteur responsable des gains énergétiques dans les pays industrialisés. En effet ce secteur a connu un développement important lié à la technification de leurs procédés et à la mondialisation. Cependant les meilleures *performances* énergétiques dans les industries comme le papier, l'acier et le ciment ne sont plus dans les pays développés mais dans les pays qui accueillent la délocalisation des entreprises. Dans les pays en développement ou émergents comme la Chine ou la CEI⁴⁵ la répartition des gains est équivalente pour l'industrie, les transports ou le bâtiment.

⁴¹ Conseil Mondial de l'énergie. *Les politiques d'efficacité énergétique: une vision mondiale*. 2007.

⁴² tep : Une tonne équivalent pétrole est une unité d'énergie qui correspond à 11628 kWh.

⁴³ L'intensité énergétique mesure la consommation d'énergie par point de PIB. Plus de productivité correspond à moins de consommation d'énergie pour produire de la richesse, soit moins d'intensité énergétique.

⁴⁴ OCDE : Organisation de coopération et de développement économique.

⁴⁵ CEI : Communauté d'Etats Indépendants. Elle est composée par : Ukraine, Russie, Biélorussie, Arménie, Azerbaïdjan, Kazakhstan, Kirghizistan, Moldavie, Turkménistan, Tadjikistan, Ouzbékistan.

Les principales mesures pour l'augmentation de l'efficacité énergétique se concentrent sur la réduction des déperditions dans les chaufferies et les réseaux, sur l'amélioration des installations techniques et sur l'optimisation des procédés de production des usines. D'après les CEREN⁴⁶, ces déperditions représentent presque la moitié des consommations de combustibles dans l'industrie en France, soit près de 13 millions de tep/an.

Les premières mesures correspondent à la réduction des fuites liquides ou de chaleur, ainsi que les pertes dans les transformateurs électriques et l'optimisation du rendement des moteurs électriques. Les deuxièmes mesures visent l'amélioration de la performance du chauffage des locaux et l'optimisation des techniques comme l'éclairage, la production d'air comprimé, la production de froid, le pompage, etc. D'autres mesures sont associées à la maîtrise de la consommation énergétique des procédés de production, qui représente environ 2/3 de la consommation totale d'énergie. L'optimisation vise non seulement les *systèmes* mais également le conditionnement des *ambiances* à travers la régulation de la température et de l'humidité. L'ensemble de ces mesures permettra d'optimiser la performance énergétique dans le secteur de l'industrie.

3.1.3.3.2. Les transports

La consommation mondiale d'énergie est étroitement liée au secteur des transports. Entre 1971 et 2005 la consommation d'énergie finale⁴⁷ des transports mondiaux a été multipliée par 2,2⁴⁸. Ce secteur représente 13% de la consommation globale d'énergie, 51% de la consommation d'énergies fossiles de la planète et 16% du total des émissions de GES⁴⁹.

D'après l'observatoire de l'énergie⁵⁰, la plus grande partie de la consommation de pétrole est destinée aux transports routiers bien loin devant les transports aériens ou

⁴⁶ CEREN : Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie.

⁴⁷ L'énergie finale ou disponible est l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer,...). La consommation d'énergie finale est égale à la consommation d'énergie primaire moins toutes les pertes d'énergie au long de la chaîne industrielle qui transforme les ressources énergétiques en énergies utilisées dans la consommation finale. Source : INSEE

⁴⁸ *Les transports face aux défis de l'énergie et du climat*. Document de travail, Agence Française de développement (AFC), septembre 2009.

⁴⁹ BP statistical Review, 2009.

⁵⁰ Observ'ER

maritimes, ainsi qu'une part plus importante que celles de l'approvisionnement d'énergie et l'industrie réunies (Fig.26). Dans l'Union Européenne la part de ce secteur dans la consommation d'énergie finale atteint 32% en 2008.

Ce constat montre à quel point la consommation d'énergie -dans ce cas le pétrole- est étroitement liée à nos modes de vie. Le secteur de l'automobile pour les particuliers est donc grand responsable dans la stratégie énergétique de l'avenir.

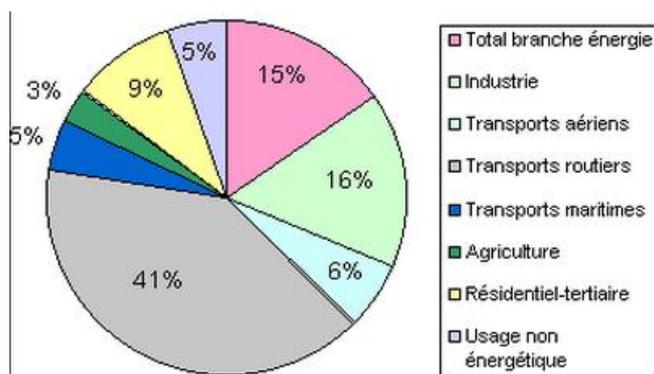


Figure 26. Répartition de la consommation mondiale de pétrole. Source : Observatoire de l'énergie, 1999.

Le secteur des transports connaît depuis plusieurs années une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules. En Europe cette amélioration est de l'ordre de 30% depuis 1973, mais ces chiffres ne suivent pas la progression de l'intensité énergétique dans le continent car l'amélioration de la performance est beaucoup plus lente que le développement économique. De plus, la dépendance du pétrole dans les transports est encore très importante et la pénétration des voitures électriques a été longtemps ralentie.

Les plans d'action français et européens dédiés à l'amélioration de l'efficacité énergétique montrent le secteur des transports comme le deuxième plus grand potentiel d'action après les bâtiments. Le grand défi est la relance de la croissance économique et la préservation de l'environnement. Les innovations technologiques doivent permettre une évolution des comportements, engendrant de fait des gains en termes d'efficacité énergétique dans les transports.

Les différentes stratégies d'optimisation de la performance énergétique dans les transports sont orientées principalement sur quatre axes :

- La performance des moteurs, des accessoires et des auxiliaires. En ce qui concerne les moteurs, les recherches portent sur des nouvelles sources d'énergie pour les alimenter (thermique, électrique, hybride, pile à combustible). Les accessoires comme les pneus sont de plus en plus performants et dans le cas de la climatisation, la recherche des systèmes de débit d'air frais à taux variable ou des échangeurs de chaleur permettraient de réduire de 25% la consommation d'énergie.
- Des nouveaux types de carburants plus performants développés par les entreprises pétrolières qui permettent une meilleure protection du moteur à travers une limitation des frottements et une diminution de la consommation de carburant (et indirectement une réduction des émissions de CO₂).⁵¹
- Des systèmes embarqués d'aide à la conduite (systèmes régulateurs de vitesse, systèmes de freinage, etc.). Ils favorisent un mode de conduite plus économe en énergie (éco-conduite) et la sécurité des usagers. Ils font partie des Systèmes de Transport dits « Intelligents » (STI) qui utilisent les nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (TIC).⁵²
- L'intermodalité des transports, afin de favoriser l'utilisation des transports collectifs peu consommateurs d'énergie par rapport au nombre de gens déplacés. Pour le transport des marchandises, il s'agit de développer des solutions alternatives au « tout routier ». Dans le cas des transports urbains des particuliers, il s'agit de développer des modes alternatifs à la voiture individuelle en encourageant l'usage des transports publics, le covoiturage ou le vélo et autres mobilités douces.

En avril 2009, l'Union européenne a fixé un objectif d'émissions pour les voitures neuves : 130g CO₂/km pour 2012 et jusqu'à 95g CO₂/km pour 2020. D'après l'AIE, ces mesures devraient permettre une diminution de 25% de la consommation de pétrole d'ici 2030.

⁵¹ *Efficacité énergétique et transports*. Connaissance des énergies. <http://www.connaissancedesenergies.org>

⁵² *Systèmes embarqués d'aide à la conduite*. Les transports intelligents. <http://transport-intelligent.net>

3.1.3.3.2. Le bâtiment

Le secteur de la construction représente une partie importante de la consommation d'énergie dans le monde ainsi que du total des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère. Si on observe la répartition par activité des émissions de GES dans le monde en 2004 (Fig.27), on constate que le bâtiment est situé en deuxième place (24%) derrière l'industrie.

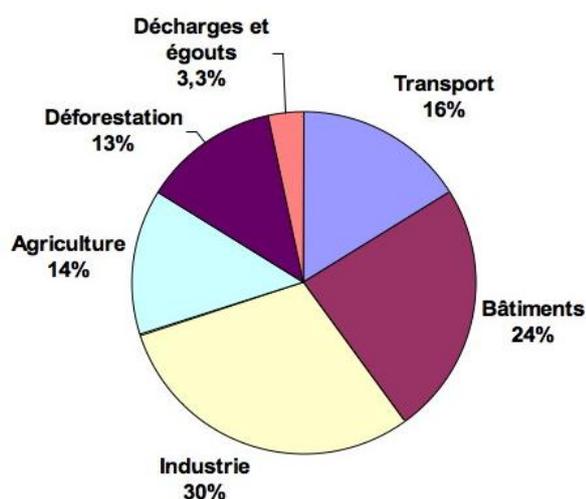


Figure 27. Répartition mondiale des émissions GES par activité en 2004 en imputant les émissions de l'industrie de l'énergie au secteur de la consommation.

Dans l'Union Européenne, les enjeux liés au résidentiel et le tertiaire sont très importants. Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie. Il représente plus de deux tiers (42%) de l'énergie consommée⁵³ devant les transports (32%) et l'industrie (24%), ce qui le situe comme le principal axe stratégique d'optimisation de la performance énergétique. Face aux phénomènes de croissance démographique et d'urbanisation accélérée, le secteur du bâtiment se constitue comme une voie d'avenir. En France la situation est particulièrement stratégique. D'une part, car la production d'électricité primaire (nucléaire, hydraulique, éolien et photovoltaïque) représente 43% de la du total des énergies⁵⁴ toutes confondues en 2010. D'autre part, 68% de l'électricité finale est consommée par le résidentiel et le tertiaire (Fig.29). Le secteur du bâtiment est donc le principal consommateur d'énergie et il émet presque autant de GES que l'agriculture ou l'industrie.

⁵³ Consommation d'énergie primaire par type d'énergie et par secteur. INSEE, 2010

⁵⁴ *Bilan énergétique de la France pour 2010*. SOeS – Chiffres de consommation 2010, juin 2011.

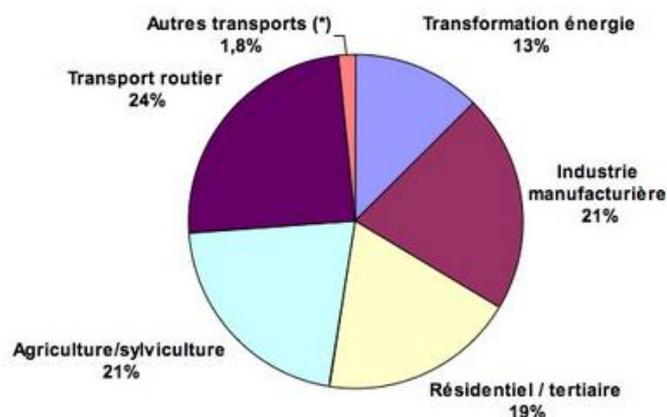


Figure 28. Répartition mondiale des émissions brutes de GES par activité en 2009 (sauf ozone) pris en compte⁵⁵.

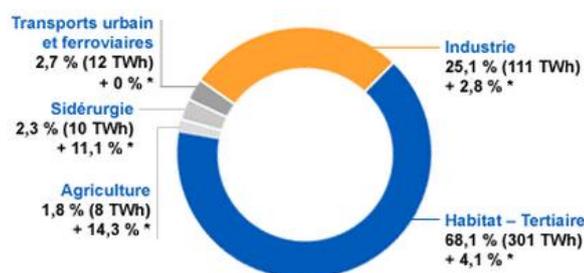


Figure 29. Répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en France en 2010.⁵⁶

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment constitue donc une voie de progrès et un axe stratégique de travail. Nous verrons comment une politique européenne de l'efficacité énergétique a permis de mettre en cohérence une stratégie européenne et des stratégies nationales, dans l'objectif de réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES dans les bâtiments. Ce panorama permettra de mieux comprendre la problématique énergétique de la France face à l'Europe, ainsi que de situer de notre travail de recherche dans le cadre des études sur la performance énergétique des bâtiments résidentiels collectifs.

⁵⁵ Source : CITEPA – Centre Interprofessionnel technique d'Etudes de la pollution Atmosphérique, 2010.

⁵⁶ Chiffres clés de l'énergie, édition 2011. SOeS – chiffres de consommation 2010.

3.2. Problématique énergétique du logement en France

Le secteur du bâtiment est responsable de 32% de la consommation d'énergie dans le monde.⁵⁷ En 2010, ce secteur représente 43% de la consommation d'énergie en France⁵⁸, ce qui le situe dans le premier rang de consommation d'énergie dans le pays. Les bâtiments résidentiels et tertiaires représentent 69 millions de tep d'énergie finale⁵⁹ et 18% des émissions nationales de CO². Les deux tiers de l'énergie finale consommée concernent le résidentiel et 1/3 le secteur tertiaire. Il existe donc un double enjeu autour du secteur résidentiel : la *maîtrise de l'énergie*, compte tenu de l'épuisement des ressources fossiles dans le monde et *la lutte contre le réchauffement climatique* à travers le développement des énergies renouvelables qui limitent l'impact sur l'environnement.

Notre travail de recherche se situe dans ce contexte. Face aux enjeux stratégiques de l'énergie dans le secteur résidentiel, il s'inscrit dans le cadre de la réflexion sur la conception énergétique des bâtiments d'habitation collective.

La problématique énergétique du logement collectif comprend deux aspects principaux : un aspect *économique* qui concerne la réduction du coût global⁶⁰ des constructions et un aspect *environnemental* qui concerne le caractère *renouvelable* des énergies et des matériaux mis en œuvre dans une démarche de *qualité* du cadre de vie des habitants. La conception d'un projet de *qualité* permet de diminuer la consommation d'énergie avec la mise en œuvre de matériaux et procédés durables en réduisant également le coût d'exploitation et le coût global. Mais il existe une relation étroite entre la consommation d'énergie et le comportement des occupants. Avant donc d'aborder la question de la performance énergétique des logements d'un point de vue réglementaire et technique, il est important d'étudier l'évolution des modes de vie des occupants et son impact sur la conception de nouveaux bâtiments résidentiels.

⁵⁷ AIE, Energy Balance for World , BP Statistical Review of World Energy 2009 (chiffres 2008)

⁵⁸ Source: Chiffres clés de l'énergie, 2010. Repères. Commissariat général au développement durable.

⁵⁹ L'énergie finale ou disponible est l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer,...). Source : INSEE.

⁶⁰ D'après le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, la définition du *coût global* d'une construction porte sur : « la prise en compte des coûts de construction au-delà du simple investissement, en s'intéressant à son exploitation (charges liées aux consommations énergétiques, à la consommation d'eau...), à la maintenance, au remplacement des équipements ou des matériaux mais également à la déconstruction du bâtiment. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Cout-global-des-batiments,19494.html>

3.2.1. Evolution des modes de vie

3.2.1.1. Contexte démographique

Alors qu'au début du XXème siècle 90% de la population française était encore rurale⁶¹, aujourd'hui 80 % de la population habite le milieu urbain et sa périphérie. Les migrations des populations vers les villes moyennes et les grandes agglomérations continuent à s'intensifier. On constate donc, qu'en un siècle les conditions de l'habitat ont radicalement changé. En outre, on remarque également un vieillissement de la population. Selon une étude de l'INSEE⁶², la population de plus de 75 ans est passée de 4,9% en 1962 à 8,6% en 2010. Malgré la hausse de la fécondité (les femmes ont en moyenne 2,01 enfants en 2010, niveau le plus élevé depuis le baby boom), un français sur six a plus de 65 ans aujourd'hui, et la génération des baby-boomers atteindra cet âge très rapidement. On estime qu'en 2050 les plus de 75 ans composeront plus du quart de la population du pays.

D'après cette étude, il s'en suivra donc un phénomène de décohabitation⁶³ et de formation de nouveaux ménages. Ceci va peser sur la demande de logements même si les jeunes quittent leur foyer plus tardivement en raison de la prolongation des études, des difficultés d'emploi, et de la hausse des prix des logements. On constatera que la plupart des familles ont des difficultés pour se loger quel que soit leur statut socio économique, en particulier les jeunes foyers ayant plusieurs enfants à charge. Le nombre de divorces et de familles monoparentales est également en augmentation, ce qui peut conduire à la formation de familles recomposées habitant un même foyer. Le nombre de personnes seules est également en forte croissance et les femmes sont souvent représentées dans cette population.

Ces phénomènes sociodémographiques vont influencer directement les modes d'habiter et, par conséquent, les caractéristiques des logements.

⁶¹ Conseil Economique et Social. Cécile Felzines. *Le logement de demain, pour une meilleure qualité de vie*. 2005, France.

⁶² INSEE. *Bilan démographique 2010*. http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1332

⁶³ Selon le dictionnaire Larousse, la *décohabitation* est la « *cessation de la cohabitation entre les parents et les enfants devenus majeurs* ». Cependant, ce terme est appliqué aussi pour les personnes qui forment un même foyer et qui cessent d'y habiter, dans le cas d'une rupture conjugale ou une mutation professionnelle. Ce terme désigne le phénomène socio démographique par lequel les familles tendent à se scinder et à avoir leurs membres –autre fois co-habitants –séparés.

3.2.1.2. *Les modes d'habiter et l'habitat*

Les familles sont de plus en plus dispersées et leurs membres acquièrent de plus en plus d'autonomie. Dans le cas des familles qui cohabitent un même foyer, on parlera d'une augmentation de l'*autonomie spatiale* de ces membres. Ce phénomène se reproduit d'autant plus depuis les années soixante-dix, avec le passage de la mère de famille du foyer au travail. De plus, l'allongement de la durée de vie et l'extension du temps libre vont jouer également un rôle important.

Avec l'acquisition de cette *autonomie spatiale*, les modes de vie ont également évolué et la fonction de certains espaces a changé. La salle à manger a ainsi perdu sa fonction cédant sa place à la cuisine comme espace de réunion et de convivialité. Les fonctions de préparation / consommation des repas en cuisine sont mélangées. La chambre est devenue un espace polyvalent de repos, travail, détente et convivialité. On remarquera une augmentation des appareils électriques qui s'ajouteront à l'électroménager : écrans plats de télévision, ordinateurs portables, chaînes Hi-fi, chaînes Wifi, consoles, etc⁶⁴.

Cette polyvalence se traduit l'augmentation des besoins d'espace dans l'ensemble des pièces de la maison. Le salon et la salle à manger vont parfois se fusionner pour donner lieu à un seul espace. Les pièces auront tendance à se réorganiser en intégrant les rangements comme éléments importants de la spatialité du logement. La salle de bain et le WC vont également se transformer, notamment à cause de l'intégration du circuit du linge (lavage, séchage, repassage). L'intégration de tous ces éléments dans un habitat collectif pose des sérieux problèmes à la conception des logements, qui doivent également intégrer un rapport avec la nature, soit par le biais de la conception de balcons-terrasses, soit par l'aménagement des ouvertures et le choix des orientations.

Globalement, depuis les années cinquante le confort des logements s'est amélioré : 91% des logements bénéficient de nouveaux « éléments de confort » (WC à l'intérieur, salle d'eau, chauffage central) et la taille des logements a augmenté. Les surfaces moyennes ont passé de 72 m² en 1973 à 90m² en 2002. On remarquera qu'il existe de fortes inégalités en termes de surfaces entre logements individuels et collectifs. Mais on estime qu'environ 10%

⁶⁴ *Consommation et modes de vie*. Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie, CREDOC. 2008.

du parc de logements n'est pas aux normes en termes sanitaires (humidité, faible éclairage, peintures toxiques) ni de sécurité (installations électriques défectueuses, risques d'incendie,..)

Par ailleurs, à partir des années 1950 est apparue la *domotique*⁶⁵ avec l'invention du réfrigérateur. Plus tard dans les années 1960, le four électrique, le congélateur, et la plaque de cuisson mixte ont intégré les espaces de cuisine. Les éléments de rangement et les plans de travail ont été modifiés pour permettre l'installation d'autres appareillages comme le lave linge, le lave vaisselle et le four microondes dans les années 1970.

Suite aux nombreuses mutations dans les modes d'habiter, les français ont également évolué dans leurs attentes et dans leur comportement vis-à-vis d'un logement de *qualité*. Ces aspects ont été étudiés plus en détail par différentes organisations, dans l'objectif de comprendre la liaison entre mode de vie, qualité et performance du logement.

3.2.2. Le concept de qualité du logement

La notion même de *qualité* d'un logement peut être assez subjective. Elle dépend du contexte urbain et des différents aspects sociologiques liés à la notion de *confort* d'un individu. Loin de vouloir approfondir dans la question de la *perception* (ce qui nous amènerait à nous dévier de notre recherche) nous avons essayé de comprendre les attentes des usagers à propos de leur logement, à partir de la réflexion sur l'évolution des modes de vie.

3.2.2.1. Les attentes des usagers

La première remarque qui concerne l'image du « logement idéal » des français, correspond au type de logement. D'après l'étude menée par le CREDOC⁶⁶ en 2008, 85% des personnes associent le logement idéal à une maison individuelle et la proximité aux transports en commun et aux équipements de la ville est placée comme prioritaire avant même le prix du logement.

En ce qui concerne les caractéristiques du logement, les critères les plus importantes sont l'agencement des espaces (34%), l'existence d'un jardin ou une terrasse (31%), et finalement

⁶⁵ La *domotique* fait allusion à l'ensemble d'appareillages automatiques, d'informatique ou de télécommunications utilisées dans les bâtiments.

⁶⁶ *Consommation et modes de vie*. CREDOC. Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie. 2008.

l'orientation et la luminosité des pièces (29%). Les considérations sanitaires sont placées en dernier rang : les aspects plus importants sont l'état sanitaire global du logement (16%) et l'insonorisation (9%) (Fig.30).

Les deux principales préoccupations en termes environnementaux concernent l'isolation acoustique et l'isolation thermique. 28% des enquêtés considère les nuisances sonores comme le principale problème dans un logement de copropriété et 24% s'inquiètent principalement de la question de l'isolation thermique. Sur cette question, 33% souhaitent vérifier l'isolation des parois, 18% les installations de chauffage et 15% les fenêtres.

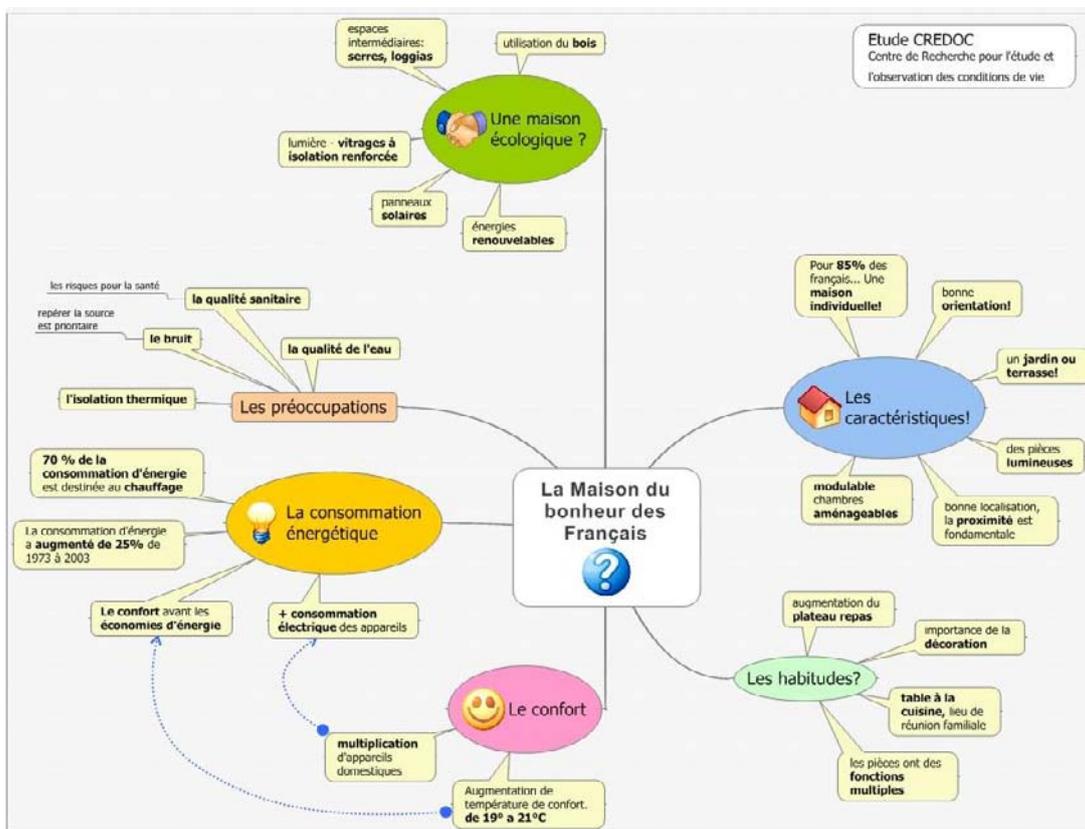


Figure 30. Synthèse de l'Etude CREDOC.

La qualité des matériaux ne semble pas représenter une préoccupation majeure. 10% sont soucieux des matériaux vis-à-vis des composantes toxiques comme l'amiante et le plomb et 3% de la qualité des revêtements. Seulement 8% se préoccupe de la qualité de l'eau, 6% de la qualité de l'air intérieur. On peut affirmer que le concept de *qualité* d'un logement selon les usagers est plus associé à leurs attentes en termes de *confort* (acoustique, thermique, visuel) qu'à la *qualité* même de l'environnement en termes d'assainissement de l'air, de l'eau et des matériaux.

3.2.2.2. Sensibilisation aux aspects environnementaux

Si bien il est vrai que la plupart des préoccupations des français concernent la spatialité et le confort, les questions environnementales prennent de plus en plus de place dans la demande des usagers.

Il est difficile d'affirmer qu'il existe une véritable « conscience environnementale », car la plupart des campagnes sur les économies d'énergie dans le passé récent n'ont pas connu des effets majeurs. Ce n'est qu'à partir de la hausse du prix des énergies suite aux conflits ou les crises pétrolières, que le consommateur a commencé à adapter son mode de vie à un usage plus économe des ressources.

3.2.3. Stratégies d'action dans le secteur du bâtiment

Le parc immobilier de la France en 2011 est estimé à 33,6 millions de logements⁶⁷. On compte 56,7% de logements individuels et 43,3% de logements collectifs (Fig.31).

	en %					
	2000	2003	2006	2009	2010	2011
Nombre de logements (en milliers)	29 613	30 664	31 776	32 951	33 315	33 681
Résidences principales	83,2	83,7	83,9	83,6	83,6	83,5
Résidences secondaires et logements occasionnels	9,9	9,8	9,7	9,5	9,5	9,4
Logements vacants	6,9	6,5	6,4	6,9	7,0	7,1
Ensemble	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Individuel	56,0	56,4	56,7	56,7	56,7	56,7
Collectif	44,0	43,6	43,3	43,3	43,3	43,3
Ensemble	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figure 31. Répartition des logements selon leur catégorie et le type de logement en 2011.

A titre de comparaison, en 2007, 414 453 logements ont été autorisés à la construction ou à la rénovation soit 44 millions de m², pour 24 926 autorisations de construction pour le tertiaire soit une surface équivalente à 18 millions de m². Cependant, la consommation énergétique du secteur du bâtiment est parfois méconnue. D'après une estimation réalisée en 2007 par le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement⁶⁸, les bâtiments résidentiels et tertiaires sont responsables de 44% de la consommation d'énergie finale en France. Les principales sources d'énergie sont l'électricité et le gaz qui représentent

⁶⁷ Source : INSEE, compte satellite du logement.

⁶⁸ *Observation et statistiques*. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. 2007.

respectivement 35% et 34% des consommations d'énergie, avec une forte croissance dans les trois dernières décennies, principalement en remplacement du pétrole (Fig.32).

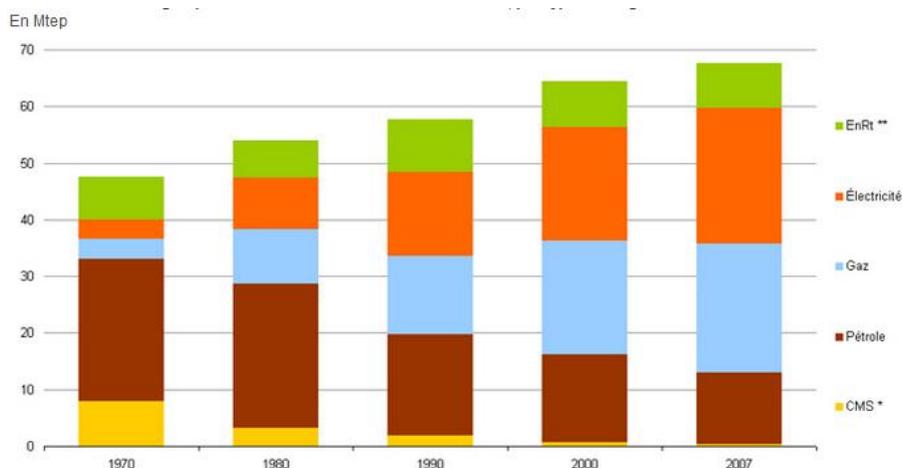


Figure 32. Consommation énergétique finale du secteur résidentiel – tertiaire, par type d'énergie⁶⁹.

D'après cette étude en 2007, 66% de l'énergie consommée par le résidentiel – tertiaire est consacrée au chauffage, 14% à l'eau chaude sanitaire et la cuisson et 20% à l'électricité spécifique⁷⁰ (éclairage, climatisation, électroménager). Les deux tiers de l'énergie consommée concernent les bâtiments résidentiels et 1/3 le secteur tertiaire.

La consommation unitaire moyenne totale du secteur résidentiel est passée de 365 kWh/m² en 1973 à 215 kWh/m² en 2005, soit une baisse de 41 %. Ces progrès ont principalement été réalisés par les travaux de maîtrise de l'énergie dans l'habitat existant et par la réglementation thermique imposée aux logements neufs. Mais la consommation et la demande d'énergie augmente rapidement, compte tenu de la croissance démographique et le phénomène important d'urbanisation. La France réclame aujourd'hui la construction de 700.000 à 900.000 nouveaux logements⁷¹ dans son parc immobilier. Face aux enjeux énergétiques du secteur résidentiel, deux alternatives se dessinent pour optimiser la performance énergétique des logements : la réhabilitation des bâtiments existants et la conception de nouveaux bâtiments performants.

⁶⁹ Source : Service de l'observation et des statistiques, SOeS. 2008.

⁷⁰ L'électricité spécifique correspond à l'électricité utilisée pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'électricité.

⁷¹ Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.

Si on regarde attentivement l'état énergétique du parc de logements, on constate que le plus grande partie des logements en France, correspond aux catégories D, E, F, G de l'étiquette énergie (Fig.33)⁷². Cette catégorie correspond aux bâtiments existants, et représente près de 80% du parc immobilier.

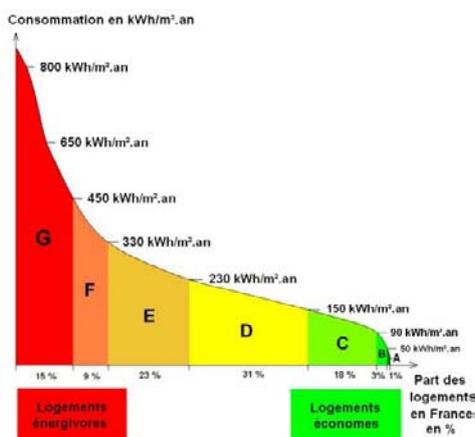


Figure 33. Répartition de la consommation énergétique par type de logement du parc résidentiel⁷³.

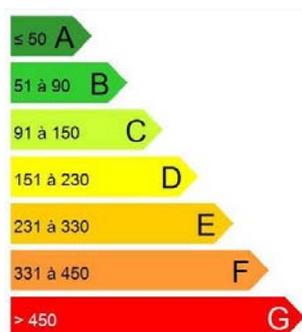


Figure 34. Etiquette énergie pour le secteur tertiaire.

⁷² L'étiquette énergie est une fiche introduite en 1992 pour les appareils électroménagers, afin de montrer aux consommateurs les caractéristiques d'un produit et sa performance énergétique. Le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) pour les bâtiments a été introduit en 2003 à partir d'une Directive Européenne sur la réduction de la consommation d'énergie.

⁷³ Source : Agence Nationale de l'habitat, ANAH. 2007

3.2.3.1. La réhabilitation de bâtiments existants

Le parc de logements anciens (construits avant 1975), hors résidences secondaires, s'élève à 17,5 millions de logements, soit près de 50% du parc total actuel. Sur ce montant, près de 73% correspond à des logements individuels. Cette composition devra conduire à la rénovation de près de 400.000 logements par an pour atteindre l'objectif de performance énergétique de l'existant en 2050. L'amélioration de l'efficacité énergétique en France dépend en grande partie de la rénovation du parc de logements construits avant 1975.

Il est donc important d'adopter une stratégie de rénovation de tous les bâtiments anciens en visant un objectif de consommation de 50kWh/m²/an pour le chauffage, afin d'atteindre l'objectif « Facteur 4 » visé par la France en 2050. Ceci implique nécessairement une structure capable de répondre à la demande à travers un corps de professionnels adapté aux projets de petite envergure, qui existe en actuellement.

3.2.3.2. La conception des bâtiments neufs performants

Face aux enjeux énergétiques au rythme de la croissance urbaine qu'on connaît aujourd'hui, la France s'est fixé un objectif de construction de près de 400.000 logements par an. Il est certain donc, qu'on devra prévoir la construction de bâtiments autonomes en énergie, voire à « énergie positive », à savoir qui consomment moins d'énergie chaque année qu'ils n'en produisent.

Pour l'instant la part des logements neufs est négligeable dans la totalité du parc immobilier, mais leur développement est une stratégie d'innovation nécessaire à l'évolution de l'industrie. Mais comment faire la transition dans le modèle énergétique actuel ? Quelles ont été les mesures et les stratégies adoptées dans l'avenir en termes de performance énergétique ?

Nous verrons qu'en France et en Europe, ce sont les politiques d'efficacité énergétique qui créent une véritable dynamique durable, en encourageant les concepteurs et l'industrie à la mise en place de moyens humains, de méthodes, des outils, des équipements et des nouveaux produits visant la réduction de la consommation énergétique.

3.3. Politiques d'efficacité énergétique pour le logement collectif

3.3.1. Politiques d'efficacité énergétique en Europe

Les recherches européennes sur les bâtiments économes en énergie ont eu lieu, suite aux crises pétrolières. Les premiers pays à développer des études sur la *conception passive* sont l'Allemagne avec sa norme *Niedrigenergiehaus* qui donnera lieu au mouvement *passivhaus*⁷⁴ dans les années 1970, ainsi que l'Autriche, la Suisse et la Suède, qui formalisera ces recherches à travers le *Institut für Wohnen und Umwelt / Institute for Housing and the environment*⁷⁵ en 1988. Les initiatives sur les économies d'énergie se sont ainsi développées de manière autonome dans chaque pays, avant la mise en place des directives de l'Union Européenne.

La plupart des pays en Europe a transposé la Directive Européenne⁷⁶ d'efficacité énergétique dans leurs politiques nationales. Une des premières conséquences a été la mise en place des Certificats de Performance Energétique et les consignes de performance pour la rénovation des bâtiments de plus de 1000 m². Chaque pays a mis en place des exigences à l'échelle de son territoire avec des modulations par zones climatiques ou par régions.

⁷⁴ Passivhaus Institut. <http://www.passiv.de/>

⁷⁵ IWU Institut Wohnen und Umwelt. <http://www.iwu.de/en/>

⁷⁶ Directive Européenne 2002/91/CE (Energy Performance Building Directive)

3.3.1.1. Objectifs et réglementations européennes

L'UE adoptera des mesures en faveur de l'efficacité énergétique à partir de 1992, notamment avec la directive sur la consommation d'énergie des appareils domestiques et son étiquetage⁷⁷. C'est le début du label énergétique. La première directive concernant l'efficacité énergétique des bâtiments est apparue en 2002⁷⁸, obligeant les états à mettre en œuvre des programmes en faveur de :

- La mise en place d'une méthode harmonisée de calcul de la performance énergétique des bâtiments.
- Le respect des standards minimaux de performance pour tous les bâtiments de plus de 1000 m² de surface.
- La mise en place des *Certificats de performance énergétique* pour les bâtiments.
- Des inspections régulières des systèmes de chauffage et climatisation

Face aux enjeux stratégiques de l'énergie en Europe, la commission Européenne publie en 2005 le *livre vert sur l'efficacité énergétique*⁷⁹ en invitant les pouvoirs publics à responsabiliser les citoyens et les entreprises à travers des systèmes d'encouragement des économies d'énergie. Ceci donnera lieu à la *Politique Européenne de l'efficacité énergétique*.

En 2007 l'Union Européenne se fixe l'objectif « 3x20 » qui consiste, à l'horizon 2020 :

- à augmenter de 20% l'efficacité énergétique ;
- à diminuer de 20% les émissions de CO²
- à couvrir 20% des besoins énergétiques à travers les énergies renouvelables.

Cet objectif va impacter différemment la politique énergétique des pays membres, notamment à cause de leurs différences en termes d'approvisionnement d'énergie. Chaque

⁷⁷ Directive 92/75/CEE du 22 septembre 1992.

⁷⁸ Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002.

⁷⁹ Green Paper on Energy Efficiency http://ec.europa.eu/energy/index_en.htm

pays est censé de faire des efforts en fonction de leur contexte économique et énergétique pour atteindre cet objectif.

Même si la France est placée en position privilégiée compte tenu du fort développement de son industrie d'énergie nucléaire qui lui permet notamment d'afficher des faibles taux d'émission de CO², cette initiative va déclencher dans la société globale des réflexions autour de la question du développement durable et de la gestion de l'énergie. Ceci donnera naissance au Grenelle de l'environnement en octobre 2007.

En 2010 l'Europe adopte une directive sur la performance énergétique des bâtiments⁸⁰ dans laquelle elle prévoit que tous les bâtiments construits dès 2020 devront approcher la non-consommation d'énergie soit la norme « *Nearly Zero energy* »⁸¹. La France va transposer à nouveau les directives de la CE dans sa législation en se fixant l'objectif de la construction de bâtiments « à énergie positive » à partir de 2020.

3.3.1.2. Labels et réglementations dans différents pays

Nous nous sommes intéressés à l'état actuel et aux pratiques de cinq pays européens à propos de la conception de logements collectifs à haute performance énergétique: l'Allemagne, la Suisse, l'Italie, l'Espagne et la France. Cette étude met en évidence l'état général des démarches de qualité environnementale dans chaque pays, en valorisant les stratégies énergétiques mises en place dans la conception des logements⁸².

Afin de mieux situer la France dans le contexte européen en termes d'objectifs de performance énergétique des logements, nous avons comparé l'information relative aux exigences techniques en termes de consommation énergétique sous la forme de *fiches techniques* pour chaque pays, qui contiennent les principaux *chiffres clé* et les *performances* visées pour chaque label en termes de consommation d'énergie.

⁸⁰ Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010.

⁸¹ *Nearly zero energy* est défini comme « la quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité » source : Directive 2010/31/UE

⁸² Source : ADEME /. *RENOVENERGIE : la rénovation énergétique des logements du secteur privé. Rapport final. 2011*

3.3.2. Politiques d'efficacité énergétique en France

Lors des chocs pétroliers dans les années 70, il a été mis en place une stratégie de fond au niveau mondial en faveur de l'efficacité énergétique⁸³. Les objectifs du protocole de Kyoto ont marqué le début du renforcement des politiques d'augmentation de la performance énergétique. Compte tenu de la problématique énergétique du secteur résidentiel, l'amélioration de la performance énergétique dans le résidentiel est devenu ainsi une priorité. Les gouvernements à travers le monde -et notamment en Europe- se sont fixé des objectifs ambitieux en termes de réduction de la consommation d'énergie des logements.

Dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'est engagée à améliorer de 20% de l'efficacité énergétique de l'UE en se fixant des objectifs ambitieux en termes environnementaux. En 2007, le Grenelle de l'environnement a renforcé la politique énergétique du pays en fixant des politiques de diminution de la consommation d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

3.3.2.1. Stratégies nationales

Le pays a adopté plusieurs mesures en faveur du développement durable et l'efficacité énergétique. Afin de respecter l'engagement du « facteur 4 » des émissions de GES, la France a inscrit cet objectif à travers plusieurs politiques :

- La stratégie nationale de développement durable (2003)
- Le Plan Climat (2004)
- La loi de programme du 13 juillet 2005 qui fixe les principales orientations de la politique énergétique (2005)
- La directive Européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB)
- Le Grenelle de l'environnement (2007)
- Le Grenelle I (2009)
- Le Grenelle II (2010)

⁸³ Source: Conseil Mondial de l'énergie. *Les politiques d'efficacité énergétique : une vision mondiale*. Résumé, 2007.

3.3.2.1.1. La stratégie nationale de développement durable

La France met en œuvre cette politique le 3 juin 2003 afin de s'inscrire dans le cadre de la « Stratégie Européenne de Développement Durable » mise en place par le Conseil Européen en 2001. Cette stratégie articule pour la première fois l'action internationale et l'engagement de l'Etat en matière de développement durable.

3.3.2.1.2. Le Plan Climat

Le Plan Climat présenté par le gouvernement en juillet 2004, a été mis en place afin d'atteindre les objectifs du protocole de Kyoto. Il regroupe l'ensemble des mesures qui visent la réduction de 54 millions de tonnes CO₂ par an en 2010 et définit une stratégie de recherche technologique afin de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050.

Plusieurs actions concernent le secteur du bâtiment notamment :

- L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments : une amélioration de 15% de la performance énergétique globale dès 2005 avec un objectif d'amélioration de 40% jusqu'en 2020. Cet objectif est fixé, en prévoyant de renforcer progressivement les exigences de la réglementation thermique.
- La mise en application d'une réglementation pour la rénovation des bâtiments.
- La création d'un Certificat de Performance Energétique des bâtiments (en France appelé DPE).
- La mise en place de certificats d'économie d'énergie, de crédits d'impôts et d'aides publiques orientées à la performance énergétique.
- La mise en œuvre d'un outil de suivi des performances et des évolutions.
- La création du PREBAT : Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans les Bâtiments.
- La minimisation des impacts énergétiques dus à la climatisation

3.3.2.1.3. La loi de programme sur les orientations de la politique énergétique

Cette loi adoptée en juillet 2005 contient 110 articles qui définissent les objectifs en matière de politique énergétique et les moyens à mettre en œuvre. Ces objectifs sont divisés en 4 grands axes :

- Contribuer à l'indépendance énergétique nationale, garantir la sécurité d'approvisionnement et assurer la compétitivité du prix de l'énergie
- Préserver la santé et l'environnement, en particulier dans la lutte contre le réchauffement climatique
- Garantir l'adhésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie

A travers cette loi, le pays a fixé des objectifs chiffrés à suivre à l'horizon 2030 :

- La réduction de 2 % par an de l'intensité énergétique finale⁸⁴ jusqu'en 2015 et de 2,5 % jusqu'en 2030.
- La production de 10 % des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergies renouvelables à l'horizon 2010.
 - Une production interne d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21% de la consommation en 2010 contre 14 % en 2003, soit + 50 %.
 - Le développement des énergies renouvelables thermiques pour permettre à l'horizon 2010 une hausse de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable.
 - L'incorporation de biocarburants et autres carburants renouvelables à hauteur de 2 % jusqu'à la fin 2005 et de 5,75 % jusqu'à fin 2010.
 - La mise en œuvre de plans mobilisateurs pour les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelable

⁸⁴ Intensité énergétique finale : Rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique.

3.3.2.1.4. Directive Européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB)

Cette Directive dérive de la loi sur les orientations de la politique énergétique. Elle contient des mesures concrètes pour atteindre les objectifs fixés préalablement. Elle impose la mise en application des dispositions législatives, réglementaires et administratives. Les différentes exigences concernent principalement :

- Article 3 : La disponibilité d'une méthode de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui devra être exprimée clairement et pourra être complétée par un indicateur d'émission de CO₂
- Article 4, 5, 6 : Des exigences minimales en matière de performance énergétique revues tous les cinq ans, pour les bâtiments neufs et les bâtiments existants de surface supérieure à 1000 m², avec l'intégration d'études de faisabilité technique.
- Article 7 : La mise en place d'un Certificat de Performance Energétique dénommé en France "Diagnostic de performance énergétique (DPE)", comportant la consommation énergétique et des recommandations destinées à améliorer la rentabilité de la performance énergétique qui devra être fourni aux acheteurs et aux locataires pour les locaux faisant l'objet de transactions. Il sera également affiché de manière visible dans tous les locaux publics recevant du public, de surface supérieure à 1000 m².
- Article 8, 9 : La mise en œuvre d'une inspection périodique des chaudières à combustibles de 20 à 100 kW et des systèmes de climatisation de plus de 12 kW. La mise en place également d'une inspection ponctuelle des systèmes de chauffage de plus de 20 kW âgés de plus de 15 ans, suivie de recommandations pour des éventuelles améliorations.
- Article 10 : La réalisation des diagnostics de performance énergétique, ainsi que des inspections et des recommandations par des experts qualifiés et/ou agréés par les Etats membres.

3.3.2.1.5. Le grenelle de l'environnement (2007)

Le grenelle de l'environnement s'est fixé pour objectif de prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et développement durable. Il a réuni le gouvernement et les représentants de la société civile afin de définir une feuille de route en faveur du développement durable.

Les principales mesures adoptées dans le secteur du bâtiment concernent la promotion de l'éco-construction, à travers le lancement d'un chantier de rénovation thermique des bâtiments existants et la généralisation des bâtiments neufs à consommation d'énergie finale annuelle inférieure à 50 kWh/m².an à l'horizon 2012, et les bâtiments neufs à énergie positive à l'horizon 2020.

3.3.2.1.6. Le grenelle I (2009)

La loi du grenelle I adoptée le 23 juillet 2009 est la traduction législative des discussions menées au grenelle de l'environnement. Elle décrit les objectifs et les moyens financiers à mettre en œuvre. La loi met en avant plusieurs préconisations pour le secteur du bâtiment :

- Le renforcement de la réglementation thermique
- La réduction de 38% de la consommation d'énergie du parc immobilier existant à l'horizon 2020. L'Etat fixe comme objectif la rénovation de 400 000 logements par an à compter dès 2013.
- La formation et la qualification professionnelle des différents acteurs du secteur du bâtiment à l'efficacité énergétique.
- La promotion du bois comme matériau écologique à absorption de CO², ainsi que l'adaptation des normes de construction à ce matériau.
- L'amélioration de la gestion des déchets.
- L'amélioration de la qualité de l'air intérieur des bâtiments.
- La mise en place des Certificats d'Economie d'Energie.
- La subvention des opérations de réhabilitation.

3.3.2.1.7. Le grenelle II (2010)

La loi du grenelle II adoptée le 29 juin 2010 constitue un « engagement national pour l'environnement ». Elle complète les engagements de la loi du Grenelle I, et décline les propositions par secteurs et chantiers. C'est ainsi que la loi définit « six grands chantiers » à savoir : Bâtiments et urbanisme, transports, énergie et climat, biodiversité, risques santé déchets et gouvernance.

En ce qui concerne le chantier Bâtiments et Urbanisme, les principales mesures adoptées pour la conception des bâtiments neufs sont :

- L'inclusion du DPE dans le contrat de location. Le certificat doit être transmis à l'ADEME et publié dans les annonces immobilières à partir de 2011. Il devra calculer les émissions de GES à partir de 2013.
- Limitation des émissions de GES
- L'attestation d'une étude sur l'approvisionnement en énergie et la mise en conformité avec la réglementation thermique pour la construction de tous les bâtiments neufs.

Les mesures adoptées pour la réhabilitation des bâtiments sont :

- La mesure des performances énergétiques et environnementales.
- Une attestation de prise en compte de la réglementation thermique et acoustique.
- L'obligation des études du risque de pollution des sols.
- L'augmentation des aides aux travaux de renforcement du bâti (augmentation du crédit d'impôt de 15% à 40% avec un plafond de 30 000 €).
- Un diagnostic sur la gestion des déchets avant les travaux de démolition ou réhabilitation lourde.

3.3.3. Les réglementations thermiques

Pour comprendre le cadre réglementaire et technique de notre recherche, il est nécessaire d'étudier l'évolution de la réglementation thermique pendant la période de notre travail de thèse. En effet, un des objectifs de cette recherche est de comprendre l'évolution du processus de conception par rapport à l'évolution des exigences en termes de performance énergétique.

3.3.3.1. RT 1974

Suite au premier choc pétrolier en 1973, la France a adopté sa première réglementation thermique en 1974, afin de réduire la consommation énergétique des bâtiments neufs. Elle a fixé un objectif de réduction de 25% de la consommation d'énergie par rapport aux normes de la fin des années 50. Ceci constitue une évolution majeure dans la conception des bâtiments avec l'apparition de l'isolation des parois extérieures et la régulation du renouvellement d'air afin de réduire les *déperditions de chaleur*.

Cette réglementation a introduit le coefficient K ($W/m^2.K$) de « *transmission surfacique* », qui évalue la capacité d'un matériau à transférer de l'énergie à travers une paroi pour une variation d'un degré kelvin entre la température extérieure et intérieure. En ce qui concerne les pertes de chaleur par renouvellement d'air, la RT 1974 a défini le coefficient G ($W/m^3.K$) de « *déperditions globales* », qui correspond aux pertes d'énergie par rapport au volume habitable chauffé du bâtiment.

Le mode de calcul de la réglementation thermique a introduit le « coefficient de forme » contraignant ainsi les architectes à concevoir la « forme optimale ». Le *coefficient de forme*, ou de *compacité*, mesure le rapport de la surface de l'enveloppe déperditive au volume habitable (m^2/m^3). Il permet de qualifier les volumes construits en indiquant leur degré d'exposition aux conditions climatiques ambiantes.

Cependant le mode de calcul n'a été abouti que jusqu'en 1977 et il a connu plusieurs modifications postérieures qui avaient pour objectif de renforcer les exigences en termes de diminution des déperditions d'énergie. Une réglementation spécifique aux bâtiments non-résidentiels a été mise en place en 1988.

3.3.3.2. RT 1982

Un deuxième choc pétrolier a frappé le monde à la fin des années 70. La hausse vertigineuse du prix de pétrole entre 1978 et 1981 entraînera la mise en place d'une nouvelle réglementation thermique ayant cette fois pour objectif de réduire de 20% la consommation d'énergie par rapport à la RT 1974.

Les mesures adoptées dans cette réglementation concernent principalement la réduction des besoins de chauffage, en renforçant le coefficient G de déperdition de chaleur en fonction du volume et en créant un nouveau coefficient B (W/m³.K) qui correspond aux « besoins de chauffage ». Ce coefficient permet de mesurer les besoins annuels en chauffage en tenant compte des apports énergétiques extérieurs et intérieurs, soit l'énergie solaire et l'énergie dégagée par les activités humaines.

Pour la première fois, le climat par zones est pris en compte dans une réglementation, sans pour autant signifier que l'approche bioclimatique est normalisée. Les surfaces vitrées acquièrent non seulement une grande importance en termes d'isolation contre les basses températures, mais également en termes de captage de l'énergie en fonction de leur orientation. Cette réglementation thermique rend obligatoire l'application de la *haute isolation* qui était appliquée depuis 1980 uniquement de façon volontaire.

3.3.3.3. RT 1988

La troisième réglementation thermique est apparue en 1988 s'appliquant aux bâtiments résidentiels et non résidentiels. Cette réglementation a marqué deux évolutions importantes : d'une part elle a introduit le choix des technologies face à l'atteinte d'un objectif de consommation énergétique et d'autre part elle a inclus la part des besoins en eau chaude sanitaire (ECS) et le *rendement* des installations dans le calcul global des besoins énergétiques.

Cette contribution qui semble modeste, constitue une révolution majeure dans le processus de conception architectural. En introduisant la notion de *performance* des installations techniques elle est à l'origine de l'équilibre entre le niveau d'isolation et l'efficacité des équipements techniques. Dans autres termes, depuis la RT1988 la performance énergétique d'un bâtiment s'articule entre son enveloppe et la qualité des systèmes. Ceci fait également l'objet d'une réflexion dans notre recherche.

3.3.3.4. RT 2000

La RT 2000 avait pour objectif la réduction de 15% de la consommation énergétique des bâtiments neufs et des extensions. Les nouveaux aspects correspondent à la prise en compte du confort d'été et de la ventilation naturelle, ainsi que de l'inertie thermique et les protections solaires. L'objectif de cette réglementation est de respecter plusieurs consignes en termes de consommation d'énergie pour les différents usages (chauffage, refroidissement, ECS, et éclairage), ainsi que de fixer les températures maximales.

La RT 2000 a ouvert la voie des réglementations qui lui ont succédé et qui se caractérisent par des niveaux de calcul complexes sur le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment. Les réglementations précédentes étaient centrées uniquement sur la consommation d'énergie, tandis que la RT 2000 a intégré la notion réglementaire de *confort* dans la conception des bâtiments d'habitation.

3.3.3.5. RT 2005

La réglementation thermique RT 2005 se fixe comme principaux objectifs une amélioration de la performance énergétique des bâtiments neufs de 15%, la valorisation des énergies renouvelables, le confort d'été et la limitation du recours à la climatisation. Elle prévoit une révision quinquennale des objectifs afin de réduire la consommation d'énergie de 40% entre 2000 et 2020 et de la diviser par 4 à l'horizon 2050.

La réglementation s'appuie sur huit zones climatiques (voir Fig.35) regroupées en 3 zones d'hiver (période de chauffage) H1, H2 et H3, ainsi que sur 4 zones d'été (période de non chauffage) : a, b, c et d.

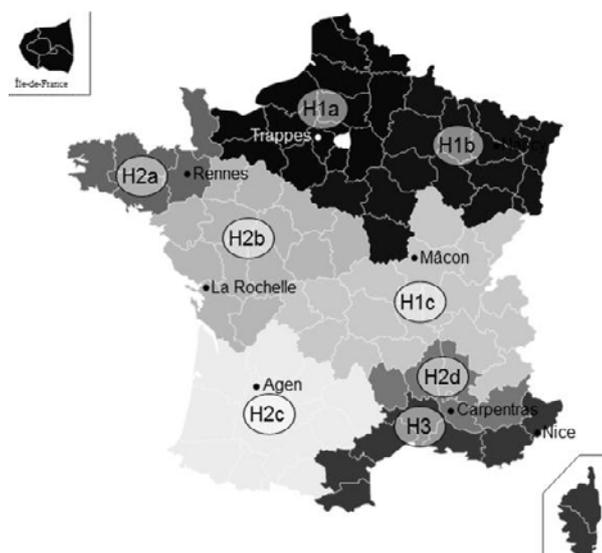


Figure 35. Zones climatiques de la Réglementation thermique de 2005 et de 2012.

La RT 2005 impose ainsi des exigences à satisfaire sur la consommation d'énergie, la température maximale, et sur les performances des différentes composantes du bâtiment (isolation, ventilation, système de chauffage ...).

Le principe du calcul thermique dans la RT2005 est le même que la RT 2000 : il consiste à comparer le bâtiment étudié à un bâtiment dit « de référence » qui est identique dans ses dimensions mais qui doit respecter des valeurs de référence.

Elle doit respecter ainsi trois conditions :

- *La consommation conventionnelle d'énergie* : la consommation d'énergie d'un bâtiment (chauffage, ventilation, refroidissement, ECS, éclairage et auxiliaires) (pour des bâtiments non résidentiels) s'exprime sous la forme d'un coefficient noté « Cep » (kWh/m²). La surface prise en compte est égale à la surface de plancher hors œuvre nette (SHON). Le coefficient Cep d'un bâtiment doit être inférieur ou égal au coefficient de référence « Cep-réf », déterminé sur la base des caractéristiques thermiques du bâtiment de référence.
- *La température intérieure conventionnelle* : la température intérieure conventionnelle atteinte en été, « Tic », est la valeur maximale horaire de la température opérative en période d'occupation. Pour le résidentiel, la période d'occupation considérée est la journée entière. Elle est calculée en adoptant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone climatique. La température intérieure conventionnelle « Tic » doit être inférieure à la température intérieure conventionnelle de référence, notée « Tic-réf », déterminée sur la base des caractéristiques thermiques du bâtiment de référence.
- *La performance de l'enveloppe et des équipements* : la RT 2005 définit des « gardes fous » soit des valeurs de référence à respecter pour les différents composants du bâtiment.

3.3.3.6. RT 2012 : La nouvelle réglementation

La nouvelle réglementation thermique, RT 2012 vient renforcer aujourd'hui les exigences concernant la performance thermique des bâtiments avec l'incorporation de deux grandes nouveautés : l'intégration de la construction bioclimatique et la prise en compte des énergies renouvelables.

Dans un premier temps, la prise en compte des aspects bioclimatiques se fait à travers la valorisation des apports solaires pour diminuer les besoins de chauffage et améliorer le confort d'été. En ce qui concerne les énergies renouvelables, la RT 2012 intègre ses données de performance dans les calculs de référence.

Les exigences de résultats imposées par la RT2012 sont de trois types⁸⁵ :

- L'efficacité énergétique du bâtiment. L'exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti est définie par le coefficient « Bbiomax » (besoins bioclimatiques du bâti). Cette exigence impose une limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage), imposant ainsi son optimisation indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre.
- La consommation énergétique du bâtiment. L'exigence de consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire se traduit par le coefficient « Cep max », portant sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'auxiliaires (pompes et ventilateurs). Conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, la valeur du Cep max s'élève à 50 kWh/(m².an) d'énergie primaire, modulé selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre pour le bois énergie et les réseaux de chaleur les moins émetteurs de CO₂. Cette exigence impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le Bbio, le recours à des équipements énergétiques performants, à haut rendement.

⁸⁵ Source : ADEME

- Le confort d'été dans les bâtiments non climatisés. A l'instar de la RT 2005, la RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement. Pour ces bâtiments, la réglementation impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été n'excède pas un seuil.

La RT 2012 définit une exigence globale de consommation d'énergie primaire fixée à 50 kWh/ m²/an modulés par zone climatique à l'instar de la RT 2000. Cet objectif devrait permettre d'économiser de 13 à 35 millions de tonnes de CO² évitées sur la période 2013-2020.

Depuis l'arrêté du 26 octobre 2010 qui fixe les exigences en termes de performance énergétique et environnementale à partir de 2012, la France a ainsi défini deux objectifs ambitieux pour les bâtiments neufs⁸⁶:

- Bâtiments basse consommation (BBC Effinergie) dès 2012, avec un niveau de consommation de référence de 50 kWh/ m²/an ep
- Bâtiments à énergie positive (BEPOS) à l'horizon 2020

La réglementation met en œuvre plusieurs exigences :

- Un niveau de consommation d'énergie maximale (en fonction de la zone climatique)
- Un calcul des consommations électriques annexes (en favorisant l'éclairage naturel)
- Un calcul de la production locale d'énergie
- La mesure de la perméabilité à l'air et la vérification des débits de ventilation

⁸⁶ Source : Effinergie

3.3.4. Les démarches normatives de qualité

La qualité du logement est sujet de nombreuses recherches depuis les années soixante-dix, lors de l'interdiction de la construction de nouveaux grands ensembles de logements collectifs issus du mouvement moderne. Face à la détérioration des conditions de vie et à l'échec sur le plan social de l'urbanisme « de barre », en 1973 le ministre de l'Équipement, du Logement et des Transports signe une circulaire « visant à prévenir » ces formes d'urbanisation afin de lutter « contre la ségrégation sociale par l'habitat »

En 1974 est créée l'association QUALITEL⁸⁷ dans l'objectif de promouvoir la qualité de l'habitat à travers la normalisation des exigences pour la construction des logements. Elle a mis en place un système de normes, labels et certifications. Actuellement il délivre ses certificats à travers les filiales CERQUAL, CERQUAL PATRIMOINE, et CEQUAMI en collaboration également avec le groupe AFNOR.

Les principales certifications qui correspondent à la conception de logements collectifs neufs sont : la certification *NF logement*, la certification *Qualitel* et la certification *Habitat & Environnement*.

La certification NF logement est destinée aux promoteurs de logements neufs. Il s'agit d'une marque appliquée au logement qui est délivrée par AFNOR Certification, un organisme du groupe AFNOR⁸⁸. Pour obtenir le droit d'usage de la certification NF Logement, le promoteur doit s'engager à trois niveaux : le management des processus opérationnels de construction, la qualité technique des ouvrages et la qualité de service apportée aux acquéreurs. Cette certification de « produit et des services associés » datant de plus de 50 ans, est destinée à assurer les conditions de *qualité* et de *sécurité* en remplissant un certain nombre de *critères* qui définissent la composition et l'installation des matériaux.

Depuis décembre 2007, les promoteurs peuvent intégrer également l'option *démarche HQE*, basée sur les 14 cibles de l'association HQE. La qualité technique et environnementale de

⁸⁷ QUALITEL. Association pour la qualité du logement. Depuis 1984, 1 272 000 logements ont fait l'objet d'une certification. <http://www.qualitel.org/>

⁸⁸ AFNOR. Le groupe AFNOR est un groupe international de services organisé autour de 4 grands domaines de compétences : la normalisation, la certification, l'édition spécialisée et la formation.. <http://www.afnor.org/>

chaque projet certifié NF Logement démarche HQE® est évaluée selon trois niveaux de performance : Base (B), Performant (P), Très Performant (TP). Les 14 cibles de la démarche HQE® doivent être traitées de façon à obtenir 7 cibles maximum en Base, 4 cibles minimum en Performant et 3 cibles minimum en Très Performant.

La certification *Qualitel* est destinée aux professionnels et aux particuliers à travers CERQUAL, la filiale de l'Association QUALITEL qui est chargée de donner la certification des produits destinés aux logements. Compte tenu de l'évolution des procédés et des techniques dans le secteur de la construction, l'association assure la démarche de qualité avec la mise en place d'indicateurs et de références. La certification *Qualitel* est attribuée en fonction de *préconisations techniques* dans en termes de confort acoustique et thermique d'un bâtiment. C'est ainsi qu'on constate qu'elle répond aux problématiques évoquées préalablement (Attentes des usagers § 3.1.2.1) concernant les principales préoccupations dans un logement. La certification vise également la maîtrise des charges et s'appuie sur un référentiel technique.

La certification *Habitat & Environnement* a pour volonté de prendre en compte la conservation de l'environnement tout au long du cycle de vie du logement. Délivrée par CERQUAL, organisme certificateur, elle est applicable aux opérations de logements neufs en immeubles collectifs et individuels groupés. Les maîtres d'ouvrage et promoteurs souhaitant obtenir la certification Habitat & Environnement doivent respecter un référentiel existentiel portant sur les thèmes suivants : le management environnemental de l'opération, le chantier propre, l'énergie et la réduction de l'effet de serre, le choix des matériaux, l'eau, le confort et la santé, les gestes verts. Depuis son lancement en 2003, 165 opérations ont été certifiées Habitat & Environnement, soit 6.000 logements dont 25 % sont issus de la promotion privée.

3.3.5. Les labels de performance énergétique

Les labels de performance énergétique avaient pour objectif de valoriser les bâtiments qui obtenaient un niveau de performance énergétique supérieur au niveau réglementaire. Ils étaient attribués par des organismes en convention avec l'État, jusqu'en 2012, date à partir de laquelle tous les bâtiments neufs doivent répondre aux critères du label BBC – Basse consommation énergétique.

Nous verrons dans un premier temps quels sont les niveaux d'exigence en termes de dispositifs et de consommation d'énergie pour chacun de ces labels, mais nous nous pencherons plus précisément sur la question de la performance énergétique d'un point de vue technique dans le chapitre suivant, afin de comprendre les spécificités du système énergétique dans la conception d'un projet résidentiel.

Les labels sont :

- **HPE 2005** / Haute performance énergétique: Consommation conventionnelle d'énergie inférieure de 10 % à la consommation conventionnelle de référence.
- **THPE 2005** / Très haute performance énergétique: Consommation conventionnelle d'énergie inférieure de 20 % à la consommation conventionnelle de référence.
- **THPE EnR 2005** / Très haute performance énergétique énergies renouvelables et pompes à chaleur : Ce label correspond au label THPE et exige en addition, le respect de l'une des conditions suivantes :
 - Le bâtiment doit être équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations de l'eau chaude sanitaire et la part de la consommation conventionnelle de chauffage par un générateur utilisant la biomasse est supérieure à 50 %.
 - Le bâtiment doit être équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations d'eau chaude sanitaire et le système de chauffage est relié à un réseau de chaleur alimenté à plus de 60 % par des énergies renouvelables.

- Le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % de l'ensemble des consommations de l'eau chaude sanitaire et du chauffage.
 - Le bâtiment est équipé d'un système de production d'énergie électrique utilisant les énergies renouvelables assurant une production annuelle d'électricité de plus de 25 kWh/m² SHON en énergie primaire.
 - Le bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur ayant un coefficient de performance annuel supérieur à 3,5.
 - Pour les immeubles collectifs et pour les bâtiments tertiaires à usage d'hébergement, le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations de l'eau chaude sanitaire.
- Labels Effinergie et bâtiment basse consommation énergétique **BBC 2005** : il s'agit de labels gérés par l'association Effinergie dont le but est de promouvoir les constructions à basse énergie et de développer en France un référentiel de performance énergétique des bâtiments neufs ou existants en regroupant les professionnels de la construction et les collectivités locales. Ces labels s'appuient sur le standard Suisse Minergie (Minergie, 2007), mais en l'adaptant aux particularités constructives, réglementaires, normatives et climatiques du marché français. Ces labels utilisent la méthode de calcul de la RT2005.

Les exigences de ce label dépendent du type de bâtiment :

- Pour les bâtiments à usage d'habitation, la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment Cep (kWh/m²/an ep) inclue le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. La consommation ne doit pas excéder la valeur exprimée par l'équation : $Cep = 50 \times (a + b)$, où a est le coefficient de correction climatique et b est le coefficient de correction par altitude.

3.3.6. La Haute Qualité Environnementale HQE®

La Haute qualité environnementale est un concept pionnier qui date des années 1990 et qui a donné lieu à la certification « NF Ouvrage Démarche HQE® » par l'AFNOR⁸⁹. La démarche HQE est une démarche volontaire qui implique une prise en compte de l'environnement à toutes les étapes de l'élaboration et de la vie des bâtiments. En effet, la construction, l'entretien et l'usage de tout bâtiment induisent un impact sur l'environnement, et donc un coût global, que la HQE tentera de réduire ou compenser. Le principe repose sur un ensemble d'objectifs visant à approcher ou atteindre 14 « cibles » (Fig.36) définies au moment de la conception. La cible est atteinte si le niveau relatif de performance est égal à celui du meilleur projet connu au même moment dans le domaine concerné. Diverses normes visent certains des objectifs qui sont aussi ceux de la démarche environnementale appliquée à l'architecture.

Site et construction	
Cible n°1	Relation du bâtiment avec son environnement immédiat
Cible n°2	Choix intègre des produits, systèmes et procédés
Cible n°3	Chantier à faible impact environnemental
Gestion	
Cible n°4	Gestion de l'énergie
Cible n°5	Gestion de l'eau
Cible n°6	Gestion des déchets d'activités
Cible n°7	Maintenance - Pérennité des performances environnementales
Confort	
Cible n°8	Confort hygrothermique
Cible n°9	Confort acoustique
Cible n°10	Confort visuel
Cible n°11	Confort olfactif
Santé	
Cible n°12	Qualité sanitaire des espaces
Cible n°13	Qualité sanitaire de l'air
Cible n°14	Qualité sanitaire de l'eau

Les 14 cibles de la démarche HQE

Figure 36. 14 cibles de la démarche HQE.

Pendant plusieurs années les cibles HQE ont été une référence pour la conception durable des projets. Cependant, les 14 cibles sont devenues une liste de thèmes à traiter, et n'ont pas constitué une réflexion globale sur la qualité environnementale. La question de la qualité environnementale était souvent associée à un tableau à prendre indiquant les différentes stratégies du projet en faveur de l'environnement.

⁸⁹ AFNOR : Association Française de Normalisation

Conclusion du chapitre

La problématique énergétique constitue un enjeu majeur à l'échelle de la planète et le secteur de la construction représente un axe de développement important face à la croissance économique et démographique des pays. La performance énergétique des logements répond à une problématique environnementale globale dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources fossiles.

La question de l'énergie dans le secteur résidentiel est encadrée depuis quelques années à travers des politiques d'efficacité énergétique à l'échelle mondiale, européenne ou nationale, qui permettent l'évolution des enjeux environnementaux et des objectifs de réduction de la consommation d'énergie dans la construction.

Or, les différentes politiques et réglementations mises en place en France ont incorporé les notions de *qualité*, de *performance* et de *confort* dans des périodes différentes de l'évolution du secteur du bâtiment. La *qualité de l'enveloppe* a été privilégiée depuis 1974 jusqu'en 1988 dans l'objectif de diminuer les déperditions d'énergie. Le mode de calcul de la RT74 contraignait l'architecte à la forme « thermiquement optimale », mais la RT88 a introduit la notion de *performance* et de *rendement* des systèmes qui a permis de développer la technique dans le bâtiment. L'enveloppe n'est plus la seule à être impliquée dans la recherche de la performance énergétique. Mais c'est à partir de la réglementation thermique de l'année 2000 qu'a été introduite la notion de *confort*, se constituant comme un élément essentiel dans la réflexion sur la conception des bâtiments.

Ce déphasage dans les réglementations aurait conditionné - dans la pratique - le concept d'équilibre entre *l'enveloppe*, les *systèmes* et le *confort* qu'on connaît dans l'actualité et qu'on étudiera plus en détail dans le chapitre suivant. Les concepteurs ont intégré *successivement* ces trois éléments à la réflexion sur le projet architectural. Si bien il est certain que cette dynamique a suivi l'évolution des enjeux environnementaux et des techniques constructives des bâtiments, l'introduction d'objectifs quantifiés dans les réglementations thermiques pour chacune de ces trois aspects (indices de *performance* de l'enveloppe, *rendement* des systèmes, et *température* conventionnelle) a donné du poids aux corps techniques dans la conception. L'architecte a été placé face au défi de la technique et des connaissances dans le domaine de l'énergie, s'éloignant ainsi de la maîtrise de tous les aspects du projet.

Par ailleurs le développement de l'informatique et les nouveaux outils logiciels qui ont suivi l'évolution des réglementations thermiques se sont spécialisés essentiellement sur les principales problématiques liées à la *technique* dans la conception des projets : la question thermique, l'éclairage et l'acoustique. Plus particulièrement la problématique thermique – énergétique est devenue une préoccupation centrale dans la conception du projet dans la mesure où la réglementation thermique imposait un calcul spécifique de cette rubrique en détriment d'autres aspects de la conception qui étaient jugés de façon qualitative.

Face à ce défi, l'approche par cibles a permis aux concepteurs de s'approprier des questions environnementales et d'intégrer des réflexions sur la performance énergétique à partir d'une liste de critères et d'objectifs à atteindre. Mais ceci aurait conduit à la construction de réponses techniques individuelles pour répondre à des questions concernant l'efficacité énergétique du projet. En d'autres termes, cette approche aurait divergé vers l'individualisation des problématiques environnementales en détriment d'une réflexion globale sur la conception.

La question serait-elle mal posée ? Il serait peut-être préférable d'étudier le fonctionnement d'un bâtiment à travers un regard systémique dans le but de comprendre les relations fonctionnelles entre la conception architecturale et les aspects techniques. On pourrait alors proposer une représentation de la performance énergétique tout au long du processus de conception. Cet exercice fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4. Conception énergétique d'un bâtiment d'habitation

« Les bâtiments intelligemment conçus et exploités, parfois appelés à tort 'bâtiments intelligents' ne se distinguent pas par la présence d'un haut degré d'automatisation des systèmes d'information, de communication et de construction, mais plutôt par le fait qu'ils peuvent répondre aux besoins des utilisateurs directement à partir de l'environnement en évitant l'utilisation des installations techniques.»

Klaus Daniels (1988)

La conception de logements a connu plusieurs évolutions durant le XXe siècle. L'évolution des matériaux et des modes constructifs d'après-guerre jouera un rôle essentiel dans la construction des grands ensembles d'habitation à partir des années 1950-60. A ceci devra s'ajouter l'évolution des *modes d'habiter* avec l'apparition de la notion de *confort*, conditionnant les espaces aux installations techniques performantes du point de vue de leur matérialité et de leur fonctionnement. Par conséquent, les bâtiments se sont transformés progressivement en *machines* consommatrices d'énergie.

Certes la question énergétique est au cœur de la conception et touche à plusieurs aspects techniques liés au confort et aux paramètres sensibles de l'occupant. Il serait hasardeux d'explorer ces concepts sans un positionnement disciplinaire qui permette de faire la liaison entre l'architecture et la technique. Dans cette mesure, nous nous intéressons ici au bâtiment comme une *machine architecturale* et comme *entité énergétique* à travers l'étude de ses différents aspects techniques..

L'objectif n'est pas de réaliser un inventaire mais de comprendre le fonctionnement du bâtiment et d'établir de quelle façon les choix du projet peuvent conditionner son comportement énergétique. Dans cette mesure, nous établirons la liaison entre les aspects techniques et les thèmes évoqués dans la reconstitution des phases de conception en §5.1., de façon à évaluer l'impact des décisions du concepteur sur la performance énergétique du projet.

4.1. La machine architecturale

La relation entre *architecture* et *système* n'est pas récente. Le Corbusier a fortement influencé cette idée dès 1910, attiré par le monde machiniste de l'industrie et la production en masse de l'automobile. Il inventera en 1914 le système « dom-ino »⁹⁰ pour la construction des bâtiments à partir d'un procédé standardisé, anticipant ainsi la question de la reconstruction massive des villes d'après-guerre. A partir de ce principe, il repensera la ville et il proposera une conception a priori purement *fonctionnelle* de l'habitat: « *une maison est une machine à habiter* » [Le Corbusier, 1924]. Les innovations introduites par le système « dom-ino » (plan libre, façade libre, pilotis, toit terrasse et fenêtre en longueur) constitueront la base des préceptes du mouvement moderne « *les cinq points pour une architecture moderne* ». Ainsi, les congrès du CIAM⁹¹ – dont Le Corbusier est membre fondateur en 1928 – ont impulsé une révolution architecturale et urbaine en considérant le logement comme une unité *fonctionnelle* dans la «ville nouvelle» : il ferait partie d'un système dans l'ensemble des activités de la ville décrites dans la charte d'Athènes⁹² (habiter, travailler, circuler, se recréer).

Mais nous avons vu que le logement a connu aussi l'évolution des modes de vie des habitants. Le logement devient ainsi une « machine architecturale » : une unité fonctionnelle de la ville, un espace dans lequel ont lieu les activités humaines et une *machine* capable de garantir le confort de l'occupant. Cette conception *mécaniciste* du logement, issue de l'évolution des techniques constructives et de la façon de concevoir l'espace, permet de comprendre un système à différentes composantes et dont le fonctionnement obéit à plusieurs variables d'ordre technique.

⁹⁰ Le système Dom-ino (du latin domus –maison- et innovation) évoque le jeu de dominos où on associe les pièces les unes aux autres et qui correspondent à des éléments préfabriqués dans la construction. Le système Dom-ino, est un assemblage de construction en béton dont le principe se résume à une simple trame de poteaux portant des planchers et reposant sur des dés comme fondation. La trame permet de composer librement façades et plans. Ce système contient cinq innovations techniques : les pilotis, le toit-terrasse, le plan libre, la façade libre et la fenêtre en bandeau, qui constituent dès lors les cinq points de « l'architecture nouvelle ».

⁹¹ CIAM : Congrès International d'Architecture Moderne. Le premier congrès a été organisé en 1928 par un groupe de 28 architectes dont Le Corbusier a joué un rôle d'influence très important. Ils avaient pour objectif établir les bases de l'architecture moderne, à partir d'une architecture et un urbanisme fonctionnels qui emploieront des nouveaux matériaux et techniques constructives

⁹² La « charte d'Athènes » est issue de l'IVème congrès International de l'Architecture Moderne en 1933. Urbanistes et architectes débattrent sur l'extension rationnelle des villes. Le Corbusier publiera en 1941 la Charte d'Athènes, contenant 95 points sur la planification des futures villes sous le titre de « La ville fonctionnelle ».

4.1.1. Composantes

La configuration actuelle des bâtiments de logements trouve son origine dans les années 1950 – 60 avec la construction des grands ensembles d’habitation. Ce phénomène issu du mouvement moderne et du besoin de nouveaux logements a donné lieu à un urbanisme de barres et de tours appelées *unités d’habitation*, disposées selon un système strictement *ordonné* d’après la pensée théorique de Le Corbusier. Dans un premier temps, cet *ordre* naît d’une conception austère et rationnelle de la beauté sans doute inspirée par le courant du Purisme⁹³ des années 1920 : la ligne droite. C’est ainsi qu’il décrira dans son traité *Urbanisme* : « la droite est dans toute l’histoire humaine, dans toute intention humaine, dans tout acte humain » [Le Corbusier, 1925]. D’autre part, cet *ordre* permettrait d’optimiser la relation entre l’homme et la ville à partir de l’observation des lois de la nature, soit l’étude de ces besoins universels. Les besoins de l’individu seraient « peu nombreux, ils sont très identiques entre tous les hommes, les hommes étant tous faits sur le même moule » [Le Corbusier, 1925]. Cette idée l’amènera à proposer le Modulor⁹⁴ en 1945 comme structure standardisée de l’être humain, dans la recherche d’une relation de *confort* entre l’homme et l’espace.

A partir de cette réflexion, nous pouvons identifier trois principales composantes de cette « machine architecturale » que constituent les logements collectifs depuis le mouvement moderne. La première composante est de toute évidence, *l’objet architectural*. Espace conteneur ou contenu, il est constitué par l’édifice qui abrite la somme des logements individuels et les services collectifs. La deuxième composante sur laquelle se centre l’ensemble de notre recherche correspond à *l’entité énergétique*, aspect mécaniciste du logement qui garantit les conditions de confort de l’occupant. La troisième composante est par conséquent, la *composante humaine* qui va déterminer l’objet, les conditions et l’usage de cette « machine architecturale ».

⁹³ Le *Purisme* est un mouvement dit post-cubiste créé par un groupe d’artistes qui représentent des objets de la vie quotidienne. Le Corbusier et Ozenfant sont théoriciens de ce mouvement et préconisent le retour à l’ordre, les formes simples et la machinerie. Ils signeront le manifeste *Le Purisme* en 1918 et *La peinture moderne*, en 1925.

⁹⁴ Le *Modulor* est une silhouette humaine standardisée qui représente un système métrique adapté à la morphologie humaine. Cette structure permettrait de mettre en relation l’homme et l’espace dans une relation de *confort* optimal.

4.1.1.1. *Objet architectural*

La construction de bâtiments d'habitation suit les doctrines architecturales et les politiques gouvernementales en réponse aux besoins de la population. L'architecture d'après-guerre est une réponse à la demande croissante de logements. Le mouvement moderne a donné lieu ainsi à la standardisation industrielle du logement, dans un contexte économique particulier, légitimée par le fonctionnalisme et le taylorisme. La rationalisation des équipements et des surfaces vers un habitat minimal⁹⁵ conduit depuis 1929 à la répétition industrielle de la *cellule* d'habitation [SEGAUD, BONVALET, BRUN, 1998]. Ces unités individuelles et leur forme d'assemblage, sont à la source de la conception des grands ensembles. On peut donc affirmer que l'architecture du logement donne forme à la ville.

L'objet architectural correspond ainsi à un espace qui peut être défini à la fois comme espace *conteneur* et espace *contenu*. Il s'agit d'un espace conteneur dans le sens où le bâtiment contient différentes cellules de logements et un ensemble de services (espaces intermédiaires) destinés à cette collectivité. Le bâtiment correspond à la somme d'espaces individuels mais il constitue en soi une grande enveloppe qui permet de mutualiser les différents besoins.

D'un point de vue technique, la configuration de cette enveloppe a évolué vers la préfabrication lourde du gros-œuvre avec la production de panneaux en béton en usine ou in situ, ce qui a augmenté l'efficacité et la rapidité de construction de manière redoutable. Ceci a conduit à produire des centaines, voire des milliers de logements en masse dans les années 1960. On parlera d'*unité* ou d'ensemble d'unités, soit une conception où la totalité l'emporte sur les parties.

Les recherches typologiques amorcées à la fin du siècle dernier portaient initialement sur la façon d'assembler des logements en une unité d'immeuble pensé par rapport à un type de parcelle. Mais elles ne concernaient que les logements économiques de 2 pièces. Ces recherches auraient donc échoué. A partir de ce moment les recherches typologiques connaissent deux tendances : la première, d'un point de vue extérieur, concerne des modules abstraits d'assemblages urbains ; la deuxième, porte sur la définition des espaces intérieurs du point de

⁹⁵ L'architecture des logements vers un habitat minimal fait le thème du IIème Congrès International d'Architecture Moderne, à Francfort en 1929.

vue du confort de l'occupant [Moley, 2002]. Les concepteurs ont compris que les pièces constituent la dernière échelle de la parcellisation dans la construction de la ville, raison pour laquelle est apparue la focalisation sur l'aménagement de la cellule et par conséquent sa pensée normative postérieure. C'est ainsi que la normalisation est allée dans le sens d'une conception de plus en plus fragmentaire. Le processus de dissociation des échelles (ville, immeuble, logement, pièce) à travers la norme, a ainsi modifié la conception du projet.

La notion de *confort* gagnera de plus en plus de place dans la conception des logements à travers le temps. L'apparition de la machinerie domestique modifiera les modes de vie à l'intérieur des logements et on parlera du concept de *domotique* pour définir l'ensemble des automatismes de gestion dans l'habitat : ceux-ci s'ajouteront au concept de « maison machine ».

La conception moderne des logements a donc incorporé les différents aspects réglementaires et techniques de l'échelle urbaine à l'échelle de la cellule. Le logement devient un objet de plus en plus complexe, car les aspects liés au *confort* à l'échelle de l'individu prennent de plus en plus de place dans le processus de conception. C'est ainsi que la *technique* conditionnera l'approche globale sur la configuration des espaces d'habitation. Les exigences techniques des réglementations thermiques vont accentuer cette tendance : les bâtiments seront considérés comme des machines consommatrices d'énergie qui doivent garantir des conditions minimales de confort. On passera de *l'objet architectural* à *l'entité énergétique*.

4.1.1.2. Entité énergétique

La question de la conception énergétique en architecture a été abordée sous différentes perspectives. Dans un premier temps ces questionnements ont suivi une logique de réduction de la consommation d'énergie après les chocs pétroliers. Les réglementations ont d'abord imposé des mesures d'ordre technique dans un objectif de *réduction* des déperditions d'énergie, et plus tard elles ont intégré progressivement les préoccupations environnementales qui tiennent compte du contexte climatique, urbain et architectural du projet dans une logique *d'optimisation* de la consommation énergétique.

Cependant, cette approche a connu des difficultés dans son intégration au projet. Nous avons vu dans quelle mesure cette transition de *l'objet* à la *machine* a été abordée d'un point de vue normatif avec la mise en place des trois *critères* environnementaux : la performance de

l'enveloppe, la consommation d'énergie en kWh et la température intérieure. Les autres critères qui sont apparus avec la méthode HQE dans les années 1990 étaient plutôt associés à une démarche *qualitative* et non *quantitative*, ce qui s'est traduit par la mise en place d'une série de préconisations comme les cibles du *confort* ou *santé* qui ne remettaient pas forcément en cause la conception globale du projet.

L'approche du logement – *machine* a conditionné la vision mécaniciste dans la conception des bâtiments au point de mesurer leur consommation d'énergie comme critère d'efficacité. On parlera « d'efficacité énergétique » pour désigner « *le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour le faire fonctionner* ». Les avancées techniques ont permis d'augmenter l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments avec la réduction au minima de la *consommation* d'énergie, et la *production* d'énergie à partir des énergies renouvelables. L'objectif à l'horizon 2020 est celui de concevoir des bâtiments autonomes et producteurs d'énergie.

Cependant, cette approche est basée sur la capacité des installations à être de plus en plus performantes. L'efficacité des matériaux et des systèmes producteurs d'énergie ont rajouté des nouvelles composantes techniques dans le processus de conception, qui sont au-delà des connaissances du concepteur - architecte. Or, le bâtiment comme d'autres secteurs économiques, se dirigent de plus en plus vers une approche *globale* qui va au-delà de l'économie d'énergie consommée ou produite sur place mais qui tient compte de l'ensemble de ressources mises en jeu dans un projet. Klaus Daniels [Daniels, 1998] étudiera dans les années 90 le concept du *cycle de vie* ou *vie utile* du bâtiment, à partir de trois critères : « l'usage minimal de matériaux, le minimum de consommation d' 'énergie grise' et un maximum de recyclage ». D'après Daniels, les bâtiments de « l'ère informatique » doivent s'inscrire dans une logique durable à partir de la conception et non pas à partir de la technique :

« Le concept de bâtiment durable conduit à l'analyse de toutes les options disponibles pour l'optimisation du bâtiment. Les bâtiments intelligemment conçus et exploités, parfois appelés à tort 'bâtiments intelligents' ne se distinguent pas par la présence d'un haut degré d'automatisation des systèmes d'information, de communication et de construction, mais plutôt par le fait qu'ils peuvent répondre aux besoins des utilisateurs directement à partir de l'environnement en évitant l'utilisation des installations techniques »

L'objectif de réduction de la consommation *d'énergie grise*, correspond à économiser l'énergie qui sert à la production des différents matériaux et composantes du bâtiment. La

réflexion sur le projet doit donc tenir compte de l'ensemble des processus liés à la fabrication, le transport, la mise en place de ces composantes, leur exploitation et leur recyclage en fin de vie. De ce point de vue, le bâtiment ne serait plus un simple objet ou un mécanisme mais *un organisme vivant*, dans la mesure où il a un comportement propre et qu'il interagit avec l'utilisateur et son environnement dès la collecte des matières premières pour la fabrication de ses composantes.

On pourrait ainsi affirmer que cette approche architecturale n'est guère plus *mécaniciste* mais *organique*. Le bâtiment est une *entité* par elle-même dans un milieu spécifique qu'on appellera milieu urbain, et dont le comportement peut être décrit en interaction avec son environnement. On parlera d'*entités énergétiques* qui composent un *système* urbain.

4.1.1.3. La composante humaine

Certes le comportement du bâtiment répond à un certain nombre de conditions externes comme le climat, l'ensoleillement, les vents, ou d'autres influences externes qu'on peut appeler des *stimulis*. Mais son fonctionnement est strictement lié à l'activité humaine et au comportement propre de l'usager. Si bien les aspects techniques répondent à des *consignes* en termes de conditions de confort, l'occupant joue un rôle essentiel dans la configuration globale des espaces.

Dans un premier temps, les activités des occupants et la forme d'utilisation des espaces ont changé à travers le temps. Nous avons vu dans quelle mesure les logements ont connu des mutations liées aux modes d'habiter dans une société où les relations entre les individus sont en constante évolution. Les espaces sont de plus en plus flexibles et accueillent différentes activités dans une logique d'adaptation aux nouveaux besoins.

D'autre part, les habitants utilisent des nouveaux moyens de communication et le numérique prend de plus en plus de place dans leurs modes de vie. Le concept de domotique apparu dans les années 70 a évolué vers une connexion systématique et personnalisée avec le réseau internet. Les fonctions de culture ou divertissement sont maintenant liées à un réseau d'appareillages sans-fil ou à des systèmes de communication en ligne partagé par une communauté d'utilisateurs qui se sont rajoutés à l'électroménager traditionnel.

Par conséquent, il existe une tendance à intégrer certaines fonctions du logement à un réseau domotique qui permet à l'individu de contrôler l'éclairage, les systèmes de son, certains appareils électroménagers, la température ou la ventilation. Ces innovations font partie intégrante du logement et vont modifier la notion de *confort*.

Enfin, l'utilisateur conditionne les espaces d'habitation par une occupation prolongée dans une journée. Ce n'est pas le cas d'autres usages comme les espaces d'enseignement ou le tertiaire, où les horaires d'occupation sont courts et dans lesquels la nuit joue un rôle de régulateur des ambiances thermiques. En effet, les apports d'énergie internes sont continus pendant le soir, à la différence des espaces où la chaleur peut être dégagée à travers d'autres mécanismes dans les horaires de non-occupation. La conception climatique, technique et spatiale du confort dans un logement, doit tenir compte des horaires aléatoires d'interaction de l'utilisateur avec le bâtiment.

Tous ces aspects vont conditionner non seulement la relation entre le bâtiment l'utilisateur, mais également le comportement énergétique global du projet. Afin de simplifier l'analyse, les aspects liés au comportement de l'utilisateur seront donc inclus dans le comportement global du bâtiment.

4.1.2. Fonctionnement

Afin de comprendre le fonctionnement d'un bâtiment et les modes d'intégration de la composante énergétique, il est important de faire un rappel sur les phénomènes physiques mis en jeu dans la conception énergétique d'un bâtiment.

D'un point de vue *thermique* on peut considérer un logement comme une *enveloppe* qui permet de se protéger des conditions externes telles que le climat ou les pollutions extérieures, ainsi qu'elle permet d'isoler un espace d'habitation des autres. Cette enveloppe représente une *limite* qui peut être plus ou moins diffuse, robuste, transparente ou opaque. L'enveloppe permet de distinguer deux *milieux* qui sont en interaction constante : le *bâtiment*, et son *environnement, bâti ou non*.

D'un point de vue énergétique⁹⁶, ces deux milieux font partie d'un *système* dans lequel les échanges qui se produisent entre l'intérieur et l'extérieur vont modifier son état. Dans le cas de notre étude, ce *système* présentera des transformations qui correspondent aux échanges d'énergie entre le milieu « bâtiment » et son environnement externe. Ceci correspond à un système dit « fermé » selon les lois de la thermodynamique classique et on exclura donc les systèmes « ouverts » qui tiennent aussi compte des échanges de *matière* entre les milieux.

Il est question d'étudier ces principes physiques, car ils constituent la base de l'outil méthodologique que nous présenterons dans le dernier chapitre.

4.1.2.1. Lois de la thermodynamique

D'après *la première loi de la thermodynamique*, les systèmes fermés suivent un principe de *conservation* de l'énergie. Au cours de la transformation d'un de ces systèmes, la *variation* d'énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur. Elle correspond à la somme de l'énergie sous forme de chaleur et sous forme de travail. Ceci nous

⁹⁶ Selon la définition, *l'énergie* est un ordre de grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction et à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur. Larousse.

permet d'analyser le comportement énergétique d'un bâtiment à partir d'un bilan thermique qui tient compte des « entrées » et des « sorties » d'énergie dans un système en équilibre constant.

Cette variation d'énergie du système peut s'exprimer ainsi de la façon suivante :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q \quad (1)$$

ΔE correspond à la variation totale d'énergie du système.

ΔU est la variation de l'énergie interne du système

ΔE_c est la variation de l'énergie cinétique

ΔE_p est la variation de l'énergie potentielle

W est l'énergie qui correspond au travail échangé avec le milieu extérieur.

Q est la quantité d'énergie sous forme de chaleur.

Dans le cas des transformations thermodynamiques - soit la plupart des échanges thermiques entre un milieu et un autre – les systèmes sont considérés *au repos*, c'est-à-dire que l'énergie cinétique E_c (mouvement du système dans un référentiel donné) et l'énergie potentielle E_p (interaction avec des champs gravitationnels ou électromagnétiques) restent constantes et seulement l'énergie interne U varie.

La réflexion sur les échanges énergétiques a été abordée par Philippe Samyn, architecte et ingénieur dans la conception de grands ouvrages. D'après lui, la maîtrise de l'énergie dans les bâtiments ne devrait pas supposer un défi plus important car leurs structures sont statiques. Or, c'est le *mouvement* qui exige les plus grandes dépenses énergétiques. De ce point de vue nous pouvons considérer que les échanges énergétiques dans notre cas d'étude ont lieu sous forme de *travail* et de *chaleur*.

La *deuxième loi de thermodynamique* (ou principe de Carnot), établit d'une part l'*irréversibilité* des échanges thermiques, et d'autre part la notion d'*entropie*. L'*irréversibilité thermodynamique* explique dans quelle mesure la nature des transformations comme la perte de *chaleur* est irréversible. Dans un système fermé, - comme le cas de notre étude – il existe des transferts de chaleur entre le bâtiment et le milieu extérieur, par conséquent, la quantité d'énergie du milieu extérieur établie dans un bilan d'équilibre positif. L'énergie se dissipera vers l'extérieur de façon *irréversible*, ceci en supposant que le phénomène a lieu en période froide.

L'*entropie* permet d'expliquer la nature de ces échanges. Elle est définie comme la variation d'une *fonction d'état* qui correspond au rapport Q/T entre la quantité Q de chaleur échangée par un système à une température T . Les transformations réelles de dissipation d'énergie sont dites « irréversibles » car le système ne peut pas revenir en arrière et récupérer l'énergie perdue sous forme de chaleur dans le milieu extérieur. D'après la définition, il y a création d'entropie dans le sens où la somme de l'énergie du système et de l'énergie du milieu extérieur reste toujours positive. Ce principe permet d'expliquer également les *variations d'entropie* entre deux corps avec des températures différentes, notamment la transmission de la chaleur du corps à température plus élevée vers le corps à température plus basse. La *chaleur* est donc associée à une variation d'entropie.

A partir de ces deux lois nous pouvons comprendre le fonctionnement général du système composé par un bâtiment ou un ensemble de bâtiments dans un environnement extérieur. Les flux de chaleur se déplaceraient vers les zones plus froides, créant ainsi des circuits énergétiques. A priori ces conditions qui sembleraient purement techniques n'auraient pas de répercussions pour le concepteur dans un premier abord. Cependant, cet aspect thermique étant traditionnellement étudié dans les phases tardives de conception, placerait les questions relatives au Zonage hygrothermique [Morphologie] comme prioritaires dans la définition d'un projet. De plus, on pourrait considérer la somme des objets architecturaux comme des *entités* indépendantes qui peuvent également s'influencer entre elles.

4.1.2.2. Principes de chaleur et température

Les transferts de chaleur sont des transferts d'énergie thermique dus à l'agitation désordonnée des atomes et des molécules d'un objet. Il est essentiel de distinguer entre *potentiel* de température (T) et *quantité* de chaleur (Q). La température est usuellement repérée sur deux échelles : l'échelle Celsius ($^{\circ}\text{C}$) dont le zéro correspond à la température de fusion de la glace et l'échelle Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) dont la base correspond au zéro absolu, soit environ -273°C .

La chaleur est la quantité d'énergie échangée entre l'intérieur et l'extérieur sous une différence de potentiel ou un écart de température entre ces deux milieux. Dans ce sens là, la chaleur est quantifiable et exprimée en joules (J) ou en calories –soit des unités d'énergie - d'après la relation : $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$, ce qui permet de l'associer à une consommation énergétique.

La *puissance* thermique P correspond à la quantité d'énergie Q échangée pendant un temps t . Elle est définie par l'équation suivante :

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

P est exprimée en W ou kW, la quantité de chaleur Q en Joules, et le temps t en secondes ou en heures par la relation $1\text{Wh} = 3600\text{ J}$ et $1\text{ kWh} = 3600\text{ kJ}$.

Ainsi, tout matériau (solide ou liquide) possède la capacité de stocker ou céder de l'énergie à travers des échanges de chaleur qui produisent des *variations de température* ou des *changements d'état* de la matière. On distingue deux types de transferts : le transfert par *chaleur sensible* et le transfert par *chaleur latente*.

4.1.2.2.1. Chaleur sensible

Un corps a la capacité d'absorber ou céder de la chaleur sans changer d'état. La *chaleur sensible* est quantifiée à partir de la *chaleur massique* ou *chaleur spécifique* C , qui permet d'exprimer la quantité de chaleur absorbée ou fournie par une unité de masse M qui s'élève ou baisse de 1°C , selon la relation suivante :

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad (3)$$

La chaleur massique C est exprimée en $(\text{kJ} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{K})$, la quantité de chaleur Q en (kJ) , l'accroissement de température Δt $(^\circ\text{K})$, et la masse M du matériau en (kg) .

D'après cette expression, si un matériau subit un changement de température, la quantité de chaleur Q absorbée ou fournie est :

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t \quad (4)$$

Afin d'estimer la quantité d'énergie dans un bâtiment et plus particulièrement dans un espace, on doit rapporter la masse M à un volume V . Si $M = \rho \cdot V$, ρ étant la masse volumique (kg/m^3) , et V le volume du matériau (m^3) , on détermine que :

$$Q = V \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta t \quad (5)$$

La *chaleur volumique* ρC (kJ /m³. °K) est donc la quantité de chaleur absorbée ou fournie par 1 m³ d'un matériau quand la température varie de 1 °C.

Les fluides se comportent de la même façon en termes d'absorption ou de dégagement de chaleur. Cependant ceux-ci présentent transfèrent de l'énergie à travers des débits. Leur calcul doit donc inclure le débit-volume Dv , afin d'estimer la puissance thermique absorbée ou dégagée par un fluide qui traverse un objet ou un espace pendant une unité de temps. On considère donc la relation suivante :

$$\frac{Q}{t} = \frac{V}{t} \rho \cdot C \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\text{Si } P = \frac{Q}{t}, \quad P = Dv \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta t \quad (7)$$

Soit P la puissance thermique exprimée en (W) et le débit volume que Dv en (m³/h).

Ces formules nous permettent de calculer la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ou refroidir un bâtiment d'une masse M déterminée et plus précisément le débit nécessaire d'un fluide à travers un espace ou un objet pour chauffer ou refroidir cette structure.

4.1.2.2.2. Chaleur latente

Un matériau peut absorber ou céder de la chaleur tout en conservant une température constante mais en *changeant d'état*. La *chaleur latente* exprime la quantité de chaleur absorbée ou dégagée par changement d'état (fusion, solidification, vaporisation ou condensation) par unité de masse. Dans le cas de l'eau et de la glace, la température de fusion ou solidification est de 0 °C.

D'autres recherches ont permis de développer des *matériaux à changement de phase* (MCP) qui ont la capacité de stocker et de libérer grandes quantités d'énergie en fonction de la température extérieure et sans fluctuations importantes de température à l'intérieur du bâtiment. Cette caractéristique permet de jouer un double rôle dans la régulation des ambiances. D'une part le matériau se constitue en isolant efficace en absorbant de l'énergie dans un élément de plus faible épaisseur. D'autre part, il permet de réaliser une régulation thermique passive tout au long d'une journée : en stockant la chaleur du soleil pendant le jour et en libérant la chaleur pendant la nuit.

4.1.2.3. Transferts de chaleur

Nous allons considérer un système dit en *déséquilibre*, soit pour lequel la température extérieure et la température intérieure sont différentes mais constantes. On parlera ainsi d'un régime *permanent* ou *statique*. Les flux de chaleur se déplacent des zones chaudes vers les zones froides : dans le cas où la température intérieure est supérieure à la température extérieure, la quantité d'énergie cédée à l'extérieur à travers l'enveloppe correspond au *flux thermique* Φ et elle est exprimée en kW. La quantité d'énergie qui passe à travers 1 m² de paroi de cette enveloppe est appelée la *densité de flux* ϕ , et elle est exprimée en W/m².

Il existe une relation de proportionnalité entre le *flux thermique* Φ ou la *densité de flux* ϕ et l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur ΔT . La *conductance* et la *résistance* permettent de comprendre cette relation. La *conductance* U caractérise la capacité de conduire le flux de chaleur dans un milieu et s'exprime en W/m².°C. La *résistance* (r pour un ensemble et R pour une unité de surface) caractérise la capacité de résister au flux dans ce milieu. Soit :

$$U = \frac{1}{R} \quad (8)$$

Ces deux concepts étant l'inverse l'un de l'autre, on établit la relation suivante avec ΔT :

$$\Delta T = r \Phi \quad \text{et} \quad \Delta T = R \phi \quad (9)$$

Avec ΔT comme accroissement de la température (°C), r (°C. W) et R (°C. m²/W).

Les flux thermiques peuvent traverser l'enveloppe soit en parallèle (Fig.37), soit en série. Dans un bâtiment où le flux thermique total traverse les conductances en parallèle de l'enveloppe, la conductance totale correspond à la somme des conductances K en parallèle pour les différents types de parois.

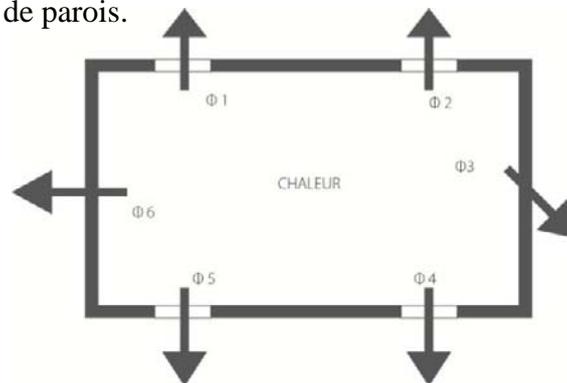


Figure 37. Flux de chaleur en parallèle à travers une enveloppe.

D'après la relation :
$$\Phi = K \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) \Delta T$$

$$\text{Soit } \Phi = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) \Delta T$$

On peut affirmer que la conductance totale d'un bâtiment est équivalente à la somme de chacun des constituants de l'enveloppe.

Dans le cas d'une paroi multicouches (Fig.38) qui serait composée par différents matériaux avec des résistances R propres, pour 1 m² de paroi et une densité de flux ϕ identique on établit :

$$\Delta t = R \cdot \phi \quad (11)$$

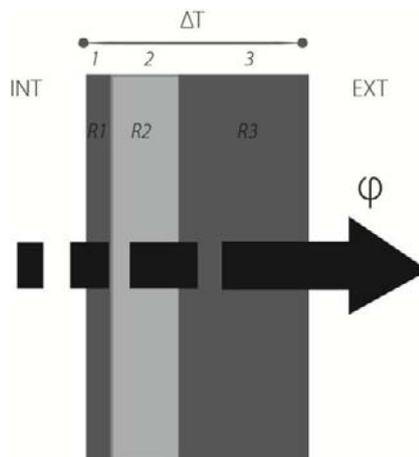


Figure 38. Flux de chaleur en série à travers une paroi.

$$\text{D'après } \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot \phi$$

$$\text{Soit } \Delta T = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot \phi$$

La résistance R totale de la paroi est donc équivalente à la somme des résistances en série. D'après ces formules, on peut établir les relations suivantes :

$$K = U \times S \quad \text{et} \quad r = \frac{R}{S} \quad (12)$$

Soit K comme conductance et r comme résistance d'une paroi de surface S , ainsi que U et R comme conductance et résistance par unité de surface.

4.1.2.4. Modes de transfert

A partir de ces principes physiques nous pouvons déduire les valeurs des conductances et des résistances en étudiant les modes de transmission de la chaleur à l'intérieur d'un système. Il y existe quatre modes de transfert : la conduction, la convection, le rayonnement et le changement de phase.

4.1.2.4.1. Transfert par conduction

La *conduction* correspond à un mode de transfert d'énergie interne. Elle se produit dans un milieu en *déséquilibre* et son retour à l'équilibre se traduit par un flux thermique entre les régions chaudes et les régions froides. Ce transfert nécessite donc la présence d'un milieu matériel. La transmission est provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact physique. La conduction se fait sans mouvement macroscopique de matière : il n'y a pas de mouvement appréciable des atomes ou des molécules. Il s'agit du mode de transfert d'énergie prépondérant dans les solides.

Dans un système en régime *permanent*, la densité de flux φ traverse un matériau d'épaisseur e , on peut constater que : φ est proportionnelle à ΔT , φ est inversement proportionnelle à e , et dépend de la conductivité λ du matériau. On peut établir les relations :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta T \quad (13)$$

avec λ exprimée en (W /m. °K).

Si $\varphi = U \cdot T$ on peut déduire que la conductance d'un solide équivaut à la relation:

$$U = \frac{\lambda}{e} \quad (14)$$

Et la résistance surfacique d'une couche de matériau est équivalente à la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (15)$$

La conductivité thermique λ détermine la capacité des matériaux à isoler ou à transmettre l'énergie. Cette donnée constitue le point de départ de la réflexion sur les déperditions thermiques d'un bâtiment et explique la tendance à utiliser des matériaux comme le bois qui ont une faible conductivité en comparaison avec les minéraux ou les métaux.

Dans un système en régime *dynamique*, soit dans lequel la température extérieure n'est pas constante mais varie en fonction de l'ensoleillement et des saisons, la transmission de chaleur dans un matériau varie en fonction du temps.

On constate que la température varie dans un matériau soumis à une densité de flux φ de la façon suivante :

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e} \quad (15)$$

On sait que la conductivité λ est constante et que la température varie dans le sens de la densité de flux φ . Elle est représentée par une droite décroissante dans l'abscisse x en fonction de l'épaisseur de la paroi. Ceci correspond au *gradient thermique* et il s'exprime selon la relation :

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

avec : φ (W/m²), λ (W /m. °K), $\frac{dT}{dx}$ (°K/m).

dT représente l'accroissement élémentaire de la température T , et dx représente l'accroissement élémentaire de l'abscisse x . On peut donc affirmer qu'en régime dynamique le gradient de température n'est pas constant ni en fonction de x , ni en fonction du temps.

4.1.2.4.2. Transfert par convection

A différence du transfert par *conduction*, la convection se fait à travers le déplacement de molécules, soit par un transfert de matière. Cependant, ce mode suppose également la présence d'un milieu matériel (généralement un fluide) qui n'est pas en situation *d'équilibre*.

Nous pouvons distinguer deux types de convection : la convection *naturelle* et la convection *forcée*. Dans la convection *naturelle*, les flux de chaleur à l'intérieur du fluide, sont transmis dans le sens de la température plus haute vers la plus basse. Dans le cas d'un échange thermique entre un fluide (air) à une température T_a et une paroi à une température T_p , on peut déterminer que :

$$\varphi_{cv} = U_{cv} (T_a - T_p) \quad (17)$$

Soit ϕ_{cv} la densité de flux par convection, (W/m^2) et U_{cv} la *conductance* par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ K$). Cette *conductance* correspond à un phénomène de surface et non pas d'épaisseur.

La convection *naturelle* a lieu dans un bâtiment de différentes façons, en fonction des surfaces d'échange, des masses d'air ou de la volumétrie. On citera l'exemple de la convection naturelle de l'air, dont la densité diminue avec la chaleur. Les masses d'air chaud auront tendance à monter, tandis que l'air froid descend.

La convection *forcée* a lieu quand le déplacement du fluide (généralement l'air) est provoqué artificiellement par action mécanique. Le dispositif mécanique (ventilateur) déplace les molécules d'air vers les zones chaudes. La *conductance* U_{cv} est plus importante en fonction de la vitesse d'air.

4.1.2.4.3. Transfert par rayonnement

Les échanges par rayonnement sont complexes et trouvent leur origine dans le mouvement des charges électriques présentes dans la matière, soit le rayonnement électromagnétique. Quand la température d'un corps augmente il rayonne dans les fréquences élevées du spectre invisible (Fig.39), mais tout corps émet un rayonnement qui peut être composé de plusieurs longueurs d'onde. Nous retiendrons principalement les phénomènes associés à l'irradiation solaire, dont la moitié du rayonnement correspond à la lumière visible et l'autre moitié se situe dans l'infrarouge, avec un léger pourcentage dans le spectre ultraviolet.

Un des phénomènes plus importants dans la conception d'un bâtiment est *l'effet de serre*, car les corps transparents ont une sélectivité particulière. Les matériaux comme le verre sont transparents pour les faibles longueurs d'onde visible et presque complètement opaques pour les grandes longueurs d'onde infrarouges. La densité de flux par rayonnement solaire est transmise par les parois vitrées, tandis que les flux de chaleur réfléchis et absorbés sont faibles. La chaleur transmise à l'intérieur émet un rayonnement infrarouge qui est bloqué par la paroi vitrée, ce qui cause une augmentation de la température.

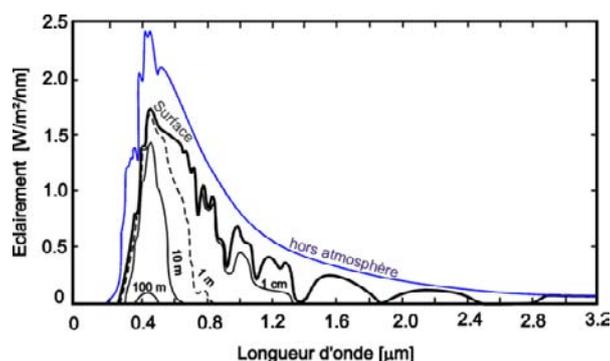


Figure 39. Spectre du rayonnement solaire dans le vide, sur terre et sous l'eau.

4.1.3. Bilan énergétique

A partir de l'étude des phénomènes physiques qui concernent les modes de transfert de la chaleur, il est possible d'établir un bilan des « gains » et des « pertes » totales d'énergie du système, ayant comme objectif de comprendre son fonctionnement et de réduire sa consommation. Le bilan énergétique constituera la base de notre recherche dans une démarche d'optimisation de la performance. Cette démarche que nous étudierons dans le chapitre suivant, tient compte des déperditions énergétiques et valorise les apports d'énergie solaire en vue de concevoir des bâtiments producteurs d'énergie.

4.1.3.1. Déperditions énergétiques

Les déperditions d'énergie dans un bâtiment correspondent principalement à des pertes de chaleur. Dans les systèmes en *déséquilibre*, l'énergie contenue dans l'enveloppe se déplace sous forme de flux vers les régions plus froides. Dans un bâtiment d'habitation la température intérieure est – en hiver – plus élevée que la température extérieure. On considère que le bilan thermique est équilibré car l'énergie fournie est équivalente à l'énergie dissipée dans une durée de temps donnée, selon la loi de conservation de l'énergie. Cependant, l'énergie fournie provient de sources externes et le bâtiment peut être considéré comme déperditif, principalement à cause de plusieurs facteurs : les déperditions par les parois, les déperditions par ponts thermiques, les pertes par renouvellement d'air et les pertes par les systèmes de production et distribution de la chaleur.

4.1.3.1.1. Déperditions par les parois

Les déperditions surfaciques représentent environ 75% des pertes totales d'énergie. Elles correspondent aux pertes à travers les parois opaques, les parois vitrées, les portes et d'autres composantes de l'enveloppe. On détermine les pertes en fonction du *coefficient de transmission thermique* U , soit la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Supposons un milieu *homogène* en régime *permanent* :

Un mur est constitué généralement de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités différentes. Pour calculer les déperditions il faut d'abord calculer la résistance totale R de chaque paroi. Nous savons que ce coefficient correspond à la somme des résistances en série, en incluant les résistances superficielle interne hi et externe he .

$$\text{Or, si } R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{donc,} \quad R = \Sigma \frac{e}{\lambda} + \left(\frac{1}{hi} + \frac{1}{he} \right) \quad (18)$$

On sait que U est inversement proportionnel à la somme des résistances R de la paroi,

$$\text{Si } U = \frac{1}{R} \quad \text{donc,} \quad U = \frac{1}{\frac{1}{hi} + \Sigma R + \frac{1}{he}} \quad (19)$$

Soit U exprimé en (W/m². °C)

A partir de ces formules on peut calculer les déperditions surfaciques selon :

$$Ds = U \times S \times \Delta T \quad (20)$$

Soit Ds en (W/m². °C), U en (W/m². °C), la surface S de la paroi en (m²) et ΔT en (°C).

Le rôle des isolants est d'augmenter la résistance thermique et de diminuer la transmission de chaleur dans une paroi. Les laines minérales et le polystyrène utilisées depuis longtemps sont remplacées au fur et à mesure par des isolants écologiques denses à base de chanvre ou laine de mouton qui peuvent atteindre des coefficients $\lambda = 0,04$ W /m. °K, ou par des composants à base de ouate de cellulose qui ont un coefficient $\lambda = 0,035$ W /m. °K. , soit environ $U = 0,4$ W/m². °K.

Si bien ces isolants sont plus écologiques leur performance n'est pas radicalement améliorée. A partir de recherches actuelles l'industrie a développé des isolants contenant un espace vide à l'intérieur qui permet de diminuer la conductivité avec $\lambda = 0,013 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$, soit environ $U = 0,1 \text{ à } 0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$.

En ce qui concerne les parois vitrées, l'industrie a également optimisé la résistance des vitrages et le U_{global} des menuiseries. Les vitrages ont passé d'un $U_{global} = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ pour un vitrage simple à un $U_{global} = 1,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ en double ou en triple vitrage. Ces améliorations sont en vue d'augmenter la performance énergétique de l'enveloppe, mais la *transparence* est souvent pénalisée car les caractéristiques des vitrages sont modifiées ou des films réfléchissants sont installés à l'intérieur de la menuiserie, réduisant la *transmission lumineuse*.

Or, il est avéré que le bilan énergétique d'une baie vitrée peut être *positif* en fonction du type de matériau et de sa composition. Dans le cas d'une paroi orientée au sud, une double paroi avec des occultations peut présenter un gain énergétique même en période hivernale, sans présenter des effets de surchauffe en été pour une température intérieure de 18°C. (Fig.40a) [Thomas. R, 2006].

Ce constat servira de base pour le développement de notre outil dans le chapitre 6.

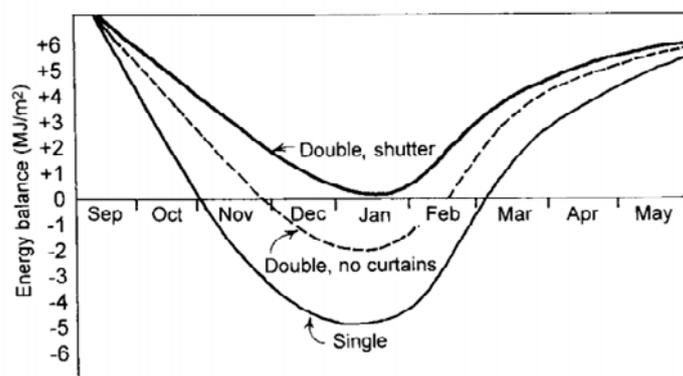


Figure 40a. Bilan énergétique d'une façade sud pour une température interne de 18°C au Berkshire

4.1.3.1.2. Déperditions par ponts thermiques

Les déperditions par les *ponts thermiques* ou *linéiques* (Fig.40b) ont lieu dans des zones ponctuelles d'un bâtiment, généralement à la jonction de deux parois verticales, à l'union entre une paroi horizontale et une verticale (un mur et un plancher), ou dans tout point où la continuité de l'isolation est interrompue (murs, fenêtres, toiture).

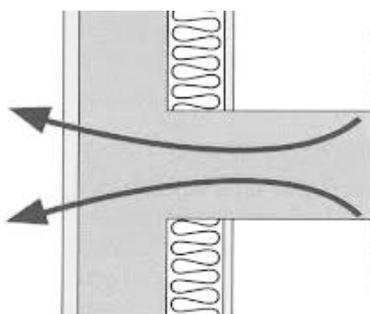


Figure 40b. Flux de chaleur en série à travers une paroi

Les ponts thermiques constituent des zones de forte déperdition énergétique et dans lesquelles l'humidité peut se condenser. Ces déperditions peuvent être ponctuelles mais la plupart du temps elles sont linéiques. Dans ce dernier cas, les pertes par les liaisons Dl sont calculées à partir d'un coefficient de transmission linéique k d'après la formule suivante :

$$Dl = k \times L \times \Delta T \quad (21)$$

Soit k exprimé en (W/m.°K), L en (m) et ΔT en (°K).

Les cas de déperditions par ponts thermiques sont nombreux et concernent les différentes parties du bâtiment. Il n'est pas question de cette étude traiter tous les cas, mais de prendre en compte la problématique liée à la continuité de l'isolant et à l'utilisation de techniques constructives innovantes qui permettent de minimiser les fuites de chaleur à travers ces points.

En comparaison avec les techniques traditionnelles, l'isolation extérieure permet d'éviter la plupart des ponts thermiques. De plus, elle présente de nombreux avantages comme l'augmentation de l'inertie thermique intérieure, ayant pour conséquence l'amélioration du confort d'été. D'autre part, elle permet de diminuer ou dans la plupart des cas, d'éliminer totalement les risques de condensation dans les éléments de construction.

4.1.3.1.3. Déperditions par renouvellement d'air

Le renouvellement de l'air intérieur est nécessaire dans tous les espaces d'un bâtiment. D'une part, la quantité d'air inspiré par personne et par heure est nettement plus faible que la quantité d'air nécessaire pour diluer, à une concentration acceptable, les polluants émis par cette même personne : gaz carbonique, vapeur d'eau, chaleur, odeurs corporelles. D'autre part, les composants des matériaux de construction constituent également une source de pollution olfactive.

Mais le renouvellement d'air hygiénique pose un problème commun à tous les bâtiments : l'apport d'air froid provoque la perte de calories et entraîne une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage. Il existe un débit d'air réglementaire pour chaque pièce comme suit (Fig.41) :

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5	6	7
Débit total minimal en m ³ /h	35	60	75	90	105	120	135
Débit minimal en cuisine en m ³ /h	20	30	45	45	45	45	45

Figure 41. Débits d'air réglementaires en fonction du nombre de pièces par logement.

A partir de ces débits, on peut établir les pertes par renouvellement d'air Hv d'après la formule suivante :

$$Hv = qv \times C_{th} \times \Delta T \quad (22)$$

Soit Hv les déperditions par renouvellement d'air exprimé en (W/K), qv le débit d'air équivalent dans le logement (m³), et C_{th} la capacité thermique volumique de l'air (Wh/m³.K). C_{th} est constant et = 0,34 Wh/m³.K.

Le volume d'air hygiénique doit tenir compte des déperditions par les menuiseries, portes et joints. Il est indispensable d'estimer un taux de renouvellement d'air qui varie en fonction du système de ventilation et de l'étanchéité à l'air. On estime que l'air d'une maison ancienne se renouvelle en ½ heure (soit 0,5 v/h), que celui d'une maison moderne non isolée se renouvelle en 1 heure (soit 1 v/h) et que, sans ventilation, l'air d'une maison bien isolée se renouvelle en 10 heures (soit 0,1 v/h). L'utilisation de la ventilation double flux permet d'améliorer les taux de renouvellement d'air et de diminuer les pertes de calories avec un échangeur de chaleur dans lequel la température de l'air entrant s'approche de celle de l'air sortant, mais ce système

doit encore faire ses preuves dans les logements, où l'utilisateur est responsable de l'efficacité du système.

4.1.3.1.4. Déperditions par systèmes de distribution

Un dernier aspect à prendre en compte concerne les pertes thermiques par le système de production, distribution, ou stockage de la chaleur. Il s'agit principalement des systèmes de chauffage de confort et du système d'eau chaude sanitaire (ECS). Ces pertes peuvent représenter 30% des pertes d'énergie totales en fonction du rendement des installations et de l'entretien des circuits. Sur les pertes de ces deux systèmes, on peut distinguer les "pertes récupérables" et les « non récupérables », car certaines d'entre elles vont rester dans l'enceinte de l'enveloppe et contribuer au chauffage de confort. Les pertes par distribution, production et stockage peuvent éventuellement être récupérées dans des locaux mitoyens, mais les pertes de production des systèmes ECS et chauffage sont difficiles à quantifier.

4.1.3.2. Les apports énergétiques

Les apports énergétiques du bâtiment correspondent aux sources de chaleur positives dans le bilan énergétique. On distingue les apports *internes* et les *externes*. Les apports *internes* (occupants, éclairage, électroménager et autres,) varient en fonction du nombre d'occupants du logement, de leur comportement et de leur mode de vie. Les apports *externes* correspondent aux apports d'énergie solaire à travers les parois, principalement vitrées.

4.1.3.2.1. Apports énergétiques internes

Les occupants constituent la principale source de chaleur d'un bâtiment. On estime qu'une personne en conditions normales d'activité physique à une température de 20 °C, émet de l'ordre de 120 W. Si cette personne exerce une activité physique plus importante, elle peut émettre une quantité d'énergie de l'ordre de 300W. Ces valeurs ne sont pas absolues car elles dépendent de plusieurs variables comme l'âge, le sexe, et bien évidemment le comportement de l'habitant en termes d'activité et d'heures d'occupation. Il est possible d'estimer l'énergie totale interne Q_i à partir de l'énergie interne e_i émise dans un m^2 de foyer en fonction du nombre d'occupants n et de la surface S du logement dans une durée de temps t . Ainsi :

$$\text{Si} \quad e_i = \frac{n}{S} \quad \text{donc} \quad Q_i = e_i \cdot S \cdot t \quad (23)$$

Avec Q_i exprimé en (kWh ou Wh), e_i en (W/m²), S en (m²), t en (h).

Une autre source d'apports énergétiques internes correspond aux activités propres à l'occupant, comme la cuisson des aliments. Cette activité peut générer des apports calorifiques suffisants pour maintenir un logement en température confortable pendant des heures. On peut rajouter à cela, l'ensemble d'apports énergétiques liés à l'éclairage, les appareils électroménagers et depuis quelques années, aux appareils dits de « bureautique ». On doit compter ainsi les ordinateurs, écrans télé, appareils wi-fi, enceintes, consoles de jeu, etc. qui depuis quelques années prennent de plus en plus de place dans le ménage. L'énergie émise par les appareils électroménagers se quantifie également en W/m^2 et se rajoute à e_i pour obtenir des kWh en fonction du temps d'occupation du logement.

4.1.3.2.2. Apports énergétiques externes

Les apports énergétiques externes correspondent principalement aux apports solaires incidents sur un bâtiment. Il est possible de quantifier de façon théorique la quantité d'énergie reçue par une surface déterminée. Dans le cadre de notre recherche, nous considérons l'irradiation solaire incidente sur les différentes entités énergétiques (bâtiments) du système (environnement urbain). Ces apports dépendent de plusieurs facteurs comme la localisation géographique, le taux d'ensoleillement, la surface réceptrice, l'orientation de cette surface, l'angle d'incidence, le taux d'ombrage et le taux de transmission de chaleur à l'intérieur de la cellule. Ainsi on établit pour la France (Fig.42) les valeurs suivantes d'irradiation en fonction de la zone climatique et l'orientation⁹⁷ :

Zones	orientation	valeurs d'irradiation solaire (I_s) en W/m^2											
		janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Zone H1	I_s sud	44,3	76,2	99,5	94,1	99,4	107,4	123,5	127,9	117,6	81,6	40,2	37,9
	I_s ouest	23,4	46,4	72,4	80,2	97,4	116,8	129	116,4	82,3	52,5	26,3	19,6
	I_s nord	18,4	30,9	46,7	60	75,7	86,5	86,1	71,2	55,7	35,5	18,6	14,8
	I_s est	25	42,6	71	83,8	101,7	116,8	136,5	119,8	85,5	47,7	21,7	19,8
	I_s horiz.	38,9	72,6	114,3	144,7	177,2	209,9	242,9	208,5	144,1	83,7	38,4	30,8
Zone H2	I_s sud	84,5	109,2	104,1	117	108,7	115,3	124,	139,1	119	82,9	82,1	58,9
	I_s ouest	37,8	59,3	74,5	102,9	114,8	135,2	148,5	133,7	88,6	52,6	42,1	30
	I_s nord	21,8	32,4	49,3	66	78,6	90	88	74,1	58,3	37,8	27,2	16,8
	I_s est	37	55,9	80,4	102,4	106,5	129,6	135,9	134	83,9	51,6	41,7	24,7
	I_s horiz.	57,7	90,4	123,7	179,5	203,4	243,8	257,9	227	154,1	88,4	64,7	40,3
Zone H3	I_s sud	82,2	71,3	130,1	133,4	138	122,8	136,6	135,4	139,2	132,8	141,8	109,8
	I_s ouest	39,4	42,7	86,4	106,3	140,6	140,5	146,6	115,3	92,3	70,3	61,2	44,4
	I_s nord	23,3	31,2	49,2	69,5	83,1	90,6	86,7	72,3	60,4	41,1	29,9	22
	I_s est	39,3	42,2	94,5	119,5	143	141,4	156	132,8	101,4	71,9	59,8	39,7
	I_s horiz.	59,2	72,5	146,6	203,3	272,2	268,6	290,4	226,8	175,1	120,8	90,7	63,9

Figure 42. Taux d'irradiation solaire I_s (W/m^2) en fonction de la zone climatique et l'orientation.

⁹⁷ En ce qui concerne les logements situés à plus de 800 m d'altitude, les logements en zone H2 seront considérés en Zone H1, et les logements en zone H3 seront considérés en zone H2.

Nous pouvons calculer l'aire réceptrice équivalente A_s selon:

$$A_s = A \cdot F_s \cdot S \quad (24)$$

Soit A_s l'aire réceptrice équivalente exprimée en (m^2), A la surface de la baie en (m^2), F_s le facteur de correction de l'ombrage (indice) et S le facteur solaire (indice).

A partir de ces données, nous pouvons calculer les apports solaires Q_s selon la relation :

$$Q_s = \Sigma (I_{sj} \cdot A_{sj}) \cdot 24 \quad (24)$$

Soit Q_s les apports thermiques exprimés en (Wh), I_{sj} l'irradiation solaire pour l'orientation J en (W/m^2), A_{sj} l'aire réceptrice équivalente d'orientation J, en (m^2).

Les technologies modernes ont permis de convertir ces apports solaires en énergie thermique et en énergie électrique. Ceci constitue un double enjeu dans la conception énergétique d'un bâtiment D'une part les apports thermiques doivent fournir la chaleur nécessaire au bâtiment pour être en conditions de confort optimales pendant les périodes froides de l'année. Nous verrons que les expériences des maisons *passives* montrent que cette source de chaleur est inépuisable et qu'il y a des divers moyens de l'utiliser dans la conception d'un bâtiment collectif. D'autre part, les apports solaires constituent une source d'énergie qui peut être transformée en courant électrique. Depuis l'invention des cellules photovoltaïques, cette industrie n'a cessé d'évoluer. Les rendements de production d'énergie ont passé de 1% à 10% en seulement une dizaine d'années et les prix de production ont considérablement baissé compte tenu de la forte demande de ces produits.

4.1.3.3. Les besoins énergétiques

A partir des apports énergétiques internes et externes, ainsi que des informations concernant les conditions d'utilisation du logement, il est possible d'estimer la quantité d'énergie nécessaire à chauffer un bâtiment ou à produire de l'eau chaude. On appelle ceci les *besoins en chauffage* et les besoins en Eau chaude sanitaire (ECS).

4.1.3.3.1. Besoins en chauffage

Les besoins de chauffage du logement sont directement liés aux conditions climatiques, d'occupation, d'ensoleillement et à la qualité des matériaux. On peut établir ces besoins en définissant :

- Les apports externes (solaires) et internes (apports par pertes récupérables sur l'ECS et apports des occupants)
- la période ou saison de chauffage
- la capacité thermique quotidienne (C_m) qui dépend de l'inertie thermique quotidienne
- le coefficient de déperdition du logement, en W/K.

Le calcul des besoins de chauffage va déterminer de manière générale, le comportement thermique et énergétique du projet. Ce calcul peut se faire de deux façons : soit en utilisant des outils de simulation thermique dynamique, qui permettront d'établir les variations de température interne à partir d'une base de données météo horaire et journalière pour un site particulier, soit à partir de méthodes simplifiées qui vont utiliser les bases de données pour établir une moyenne des écarts de température : c'est le cas des *degrés jours* et les *degrés heures*.

Le nombre de degrés jours d'une période est égal au produit du nombre de jours chauffés par la différence de température (ΔT) entre la température extérieure moyenne et la température intérieure de consigne. La température intérieure de consigne généralement utilisée pour le calcul des DJU est de 18 °C. La difficulté de cette méthode simplifiée est de prendre en compte l'intermittence. On doit donc introduire la notion de degrés heures qui seront ensuite cumulés pour donner la valeur en degrés jours, qui seront à leurs tours cumulés pour obtenir la valeur du mois considéré.

4.1.3.3.1. Besoins en Eau chaude sanitaire (ECS)

Les besoins en ECS dépendent strictement du comportement de l'utilisateur, car ils sont déterminés principalement à partir de la quantité d'eau consommée. Ces besoins peuvent donc varier en fonction du nombre d'occupants, de leurs âges, de leurs professions, de leurs mode de vie, du jour (ouvrable, Week-end ou férié), de la saison, et bien d'autres circonstances encore. Plusieurs études ont montré que les besoins d'un européen pouvaient se situer entre

25 et 60 litres d'eau chaude à 50 °C par jour et par personne, mais ce chiffre peut s'élever à 100 litres par personne en Amérique du nord.

Pour effectuer les calculs, nous avons utilisé deux valeurs par défaut : 50 litres par personne et par jour, ou 1,75 litres par m² de surface habitable. Ces valeurs sont pour tous les jours de la semaine (donc du mois). Si le volume est connu, il est possible d'utiliser ce dernier au lieu des valeurs par défaut.

Le calcul des besoins en ECS est établi selon la formule suivante :

$$QECS = p \times 1,1628 \times V \times (T - T_{ef}) \quad (25)$$

Soit QECS l'énergie nécessaire à la production de l'ECS pour la journée en (Wh), p la masse volumique de l'eau en fonction de sa température T_{ef} (peut être estimée à 1 kg/l), V est le volume d'eau (litres), T est la température de l'eau chaude au point de soutirage (°C), T_{ef} est la température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'ECS (°C), pour une production instantanée.

4.1.3.4. La consommation d'énergie

Nous pouvons ainsi réaliser un bilan à partir des gains et des pertes d'énergie dans une cellule ou dans un ensemble de cellules dans le cas d'un bâtiment collectif. Ce bilan va déterminer l'équilibre entre : la quantité d'énergie fournie pour satisfaire les besoins de l'utilisateur et la quantité d'énergie reçue par irradiation solaire ou récupérée par les propres activités de l'occupant.

La consommation d'énergie correspond ainsi à l'indice qui va nous permettre de déterminer le bilan du comportement énergétique d'un bâtiment. On parlera de *performance énergétique* dans une logique de réduction de la consommation d'énergie par m² habitable, hors œuvre net, ou construit. Dans ce sens il faut constater que généralement le calcul de consommation d'énergie se fait par m² SHON, hors les besoins de chauffage sont estimés en fonction de la surface habitable soit des m² SHAB. Le rapport SHON/SHAB, qui change en fonction de l'épaisseur des murs (épaisseur de l'isolant) va jouer donc un rôle important dans le calcul de la consommation d'énergie du logement.

Nous pouvons synthétiser le bilan énergétique à l'aide du schéma suivant :

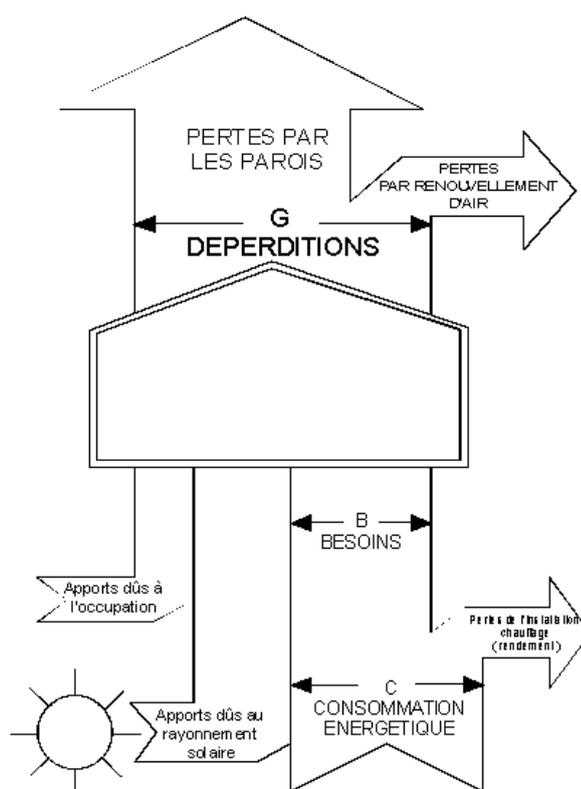


Figure 43. Bilan énergétique d'un logement.

Ce schéma (Fig.43) nous montre ainsi les différentes composantes dans le calcul de consommation d'énergie pour un logement, généralement synthétisées en un seul indice qui est devenu référence: la consommation d'énergie en KWh/m²/an.

Cependant la conception énergétique des bâtiments impose une réflexion sur la nécessité de distinguer un bâtiment *performant* d'un bâtiment à *énergie positive*. La performance est liée à la réduction de la consommation d'énergie par m², mais *l'énergie positive* correspond à un surplus de *production* par rapport à la *consommation* d'énergie. Ceci explique dans quelle mesure un bâtiment qui produit de l'énergie grâce aux nouveaux systèmes et technologies de construction, peut être particulièrement énergivore et peu performant.

La *consommation* est donc un indice qui mesure uniquement une quantité d'énergie mais qui ne permet pas de visualiser la réelle performance du bâtiment en termes d'équilibre du bilan énergétique. Ceci a conduit à privilégier le résultat au détriment de la compréhension globale du fonctionnement du bâtiment en tant qu'entité énergétique. Par ailleurs, des questions essentielles comme le confort hygrothermiques ont été aussi contraintes au résultat.

4.1.4. Le confort hygrothermique

Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. Dans ce sens les conditions spatiales de l'environnement immédiat jouent un rôle primordial car le *confort* dépend de plusieurs aspects autres que la température. Cependant le confort thermique est souvent associé à ce seul indice de mesure : c'est le cas de la réglementation thermique RT2012 qui continue à imposer la Température intérieure conventionnelle (Tic) comme seule consigne d'après la relation : $Tic < Tic\text{ réf.}$ ⁹⁸

D'autres aspects comme l'hygrométrie, le vent, l'habillement, le métabolisme, l'activité physique de l'individu et la perception des ambiances vont conditionner les conditions de confort. Parmi les paramètres mesurables du confort thermique on distinguera la température de l'air, la température des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air, ainsi que les facteurs psychologiques et culturels [Courgey & Oliva, 2006].

4.1.4.1. La température de l'air

La nature des échanges thermiques étudiés préalablement permet d'expliquer les différences de température dans un espace. Les masses d'air chaud ont tendance à monter inversement aux masses d'air froid, d'après un phénomène de *convection*. Les températures d'air confortables sont situées autour de 19° en hiver et 26° en été, mais ces mesures sont variables en fonction de la perception de l'individu.

Ceci a des implications pour le concepteur dans la mesure où la disposition et la forme des espaces vont conditionner le ressenti de la température. C'est le cas pour des bâtiments en hauteur avec des logements en duplex, dont l'architecture va conditionner des écarts de température entre les différents niveaux à cause du phénomène de stratification de l'air.

⁹⁸ La RT2005 a ajouté l'exigence concernant la température du logement. La température intérieure conventionnelle (Tic) doit être inférieure à la Température de référence (Tic réf). La RT2012 n'a pas modifié cet objectif.

4.1.4.2. La température des parois

La température des parois constitue un critère très important dans la conception des logements et il est souvent négligé en contraposition à la température ambiante. Elle dépend principalement de trois aspects : *l'exposition* de la paroi, *l'inertie* du matériau et son *émissivité*. *L'exposition* détermine la quantité de temps que la paroi est soumise au rayonnement solaire ou d'un autre élément émetteur de chaleur. La paroi à son tour va émettre de la chaleur par le phénomène de *rayonnement*. C'est ainsi que la température des parois est couramment appelée *température radiante*. *L'inertie d'un matériau* détermine la modulation dans le *temps* du rayonnement de cette paroi, lors de son exposition à une source de chaleur. *L'émissivité* correspond au rayonnement d'un matériau dans une longueur d'onde déterminée, soit un rayonnement spectral. Sachant que tous les matériaux ont des niveaux d'émissivité différents à des longueurs d'onde particuliers, il est convenable d'étudier leur impact sur le confort du projet.

De ce point de vue, la température des parois constitue un sujet important d'analyse dans la conception d'un bâtiment, car il peut représenter une source de confort ou d'inconfort dans un espace.

4.1.4.3. La température résultante ou opérationnelle

La température opérationnelle est considérée comme une moyenne entre la température de l'air et la température des parois. Ceci pose des questions sur la pertinence de la mesure de la température dans des logements qui ont souvent plusieurs orientations et qui disposent de plusieurs pièces. La température d'une paroi peut conditionner le ressenti de l'individu au point de modifier la consigne de chauffage globale de l'espace.

L'indice de la température intérieure de référence négligerait non seulement plusieurs phénomènes liés au rayonnement des matériaux, mais ne constituerait pas une donnée fiable de mesure du confort.

4.1.4.4. L'humidité relative

L'humidité relative correspond à la teneur en vapeur d'eau, soit la capacité de l'air à garder de cette humidité. Cette capacité dépend de la température de l'air : plus elle est élevée, plus elle peut contenir de la vapeur d'eau. Cet indice mesuré en pourcentage, va déterminer deux questions essentielles dans la conception d'un logement. Dans un premier

temps, elle va conditionner le *ressenti* de la température ambiante. Quand le pourcentage d'humidité augmente, la sensation d'inconfort est plus importante. Au contraire, si l'humidité est très basse, l'ambiance devient sèche et provoque également l'inconfort. Dans un deuxième temps, le taux d'humidité peut provoquer des phénomènes de condensation quand une paroi ou un élément constructif à une faible température rentre en contact avec l'air qui est à une température plus élevée. Ces phénomènes sont à tenir compte dans la conception des systèmes de chauffage et refroidissement qui sont souvent intégrés dans certains espaces.

4.1.4.5. La vitesse et les mouvements d'air

Le mouvement de l'air permet de résoudre des problèmes d'inconfort liés à la température ou à l'humidité. L'air qui circule à une plus grande vitesse accélère les échanges thermiques par convection au niveau de la peau, ce qui peut être confortable en été mais pas en hiver. En effet la vitesse de l'air diminue la *sensation* d'humidité de l'air, améliorant le confort. Les mouvements d'air sont dus aux échanges d'air entre des ambiances à des températures différentes, à des phénomènes de stratification, ou à des différences de pression atmosphérique causées par le vent à l'extérieur du bâtiment.

Sachant que la configuration des espaces va déterminer les mouvements d'air à l'intérieur des espaces, il semblerait utile de coupler l'information relative à la vitesse du vent, la température la forme architecturale.

4.1.4.6. Les facteurs psychologiques et culturels

Nous avons étudié dans le premier chapitre, dans quelle mesure la perception correspond à la représentation mentale d'un concept. Dans le cadre du confort hygrothermique -si bien il s'agit de perceptions physiques comme le froid ou la chaleur- ces perceptions sont également associées à des associations d'images ou des situations vécues. Ceci explique l'importance des facteurs psychologiques et culturels dans la définition du concept de *confort*.

La sensation de *confort* dépend ainsi de plusieurs paramètres *physiologiques* comme l'âge, le sexe, les conditions de santé, mais également de facteurs *psychologiques* comme la perception des couleurs, la lumière, le son, l'environnement, etc. Tous ces facteurs peuvent influencer le *ressenti* et surtout ils peuvent varier d'un pays à l'autre de manière considérable.

4.2. Stratégies d'intégration de la composante énergétique

La compréhension du fonctionnement technique d'un bâtiment nous permet d'aborder la question de l'intégration de la composante énergétique. Nous avons étudié dans quelle mesure cette préoccupation est issue de la nécessité de réduire le recours aux énergies non renouvelables, et de développer des architectures capables de s'adapter à son environnement dans une logique de développement durable.

Les stratégies d'intégration de la composante énergétique vont dans le sens de la réduction des besoins et dans la valorisation des énergies renouvelables existantes et gratuites. Ceci se traduit d'abord par l'amélioration de l'enveloppe,

Les premières approches à cette question datent des années 1970 lors des crises pétrolières et des années 1990 lors du sommet de Rio, avec les recherches sur l'architecture bioclimatique dans une approche « *passive* » des constructions. Lors des politiques d'efficacité énergétique des années 2000, les avancées technologiques ont permis d'intégrer des matériaux et des systèmes performants à travers des approches « *actives* » de conception. La tendance actuelle va dans le sens de l'intégration de nouvelles technologies d'information à la conception d'un projet. On parlera d'une approche « *intégrée* » qui mettra en relation les aspects bioclimatiques et les nouvelles technologies. Ces trois approches ont été définies par Klaus Daniels dans son ouvrage « *Low-tech, Light-Tech, High-Tech* » et expliquent l'évolution de l'architecture dans les techniques et les procédés de conception.

4.2.1. L'approche bioclimatique : « **Low - Tech** »

L'approche « bioclimatique » consiste en l'architecture bioclimatique de chacune des fonctions en privilégiant des solutions faiblement consommatrices d'énergie (forte isolation, faible perméabilité à l'air de l'enveloppe, chauffage solaire passif, ventilation naturelle,...). Au-delà du bénéfice opérationnel évident, cette démarche souffre d'une capacité fonctionnelle souvent limitée par exemple face à un accroissement de l'amplitude des variations climatiques mais aussi aux modifications d'usage du bâtiment.

« Construire avec le climat » est la devise de l'architecture bioclimatique. Nombreuses sont les recherches et les publications sur ce sujet, depuis que le monde se pose la question de l'épuisement des ressources fossiles et l'avenir de la gestion de l'énergie. Edward Mazria écrira en 1979 [Mazria, 1979]:

« Ce livre manifeste une nouvelle attitude face à l'architecture. Il décrit une approche de la construction qui dépend étroitement du site et du paysage, du climat et des matériaux locaux, et bien sur du soleil. Il insiste sur l'importance particulière des phénomènes naturels qui constituent la source inépuisable des énergies vitales. Bien entendu cette attitude n'est pas tout à fait nouvelle puisque, de tous temps, l'architecture régionale ou vernaculaire a reflété un lien étroit avec les fluctuations climatiques journalières et saisonnières. Au cours des dernières décennies, toutefois, on s'est trop fié à cette croyance erronée en une énergie fossile infinie et gratuite en choisissant d'abandonner ces très anciennes considérations sur l'avenir. ⁹⁹ »

Ce postulat reflète la volonté de l'époque de mettre le savoir des anciennes cultures au service de la nouvelle architecture, dans une logique d'économie des moyens et d'exploitation des énergies renouvelables, comme le soleil. En effet, celui-ci constitue la première source d'énergie de la planète, inépuisable et présente dans toutes les latitudes. Elle constitue la base de l'architecture bioclimatique, qui utilise cette ressource pour éclairer les espaces, pour la transformer en chaleur, et pour la convertir en électricité. Des nombreux usages issus de nouvelles technologies sont apparus au travers des années, et nous pourrions comprendre dans quelle mesure elles ont été intégrées dans la conception des bâtiments.

D'après les études sur les procédés solaires passifs, ceux-ci dépendent principalement de cinq facteurs : la localisation du bâtiment, l'orientation, la forme et la composition de l'enveloppe et la disposition des baies vitrées [Mazria, 1979].

4.2.1.1. La localisation

La localisation du projet serait déterminante du comportement bioclimatique du logement. Non seulement elle va influencer les conditions d'intégration au site ou au paysage, mais elle va impacter sur la quantité d'énergie reçue par les constructions. D'après Mazria, dans les années 1980 il semblait utopique de penser à concevoir des logements bioclimatiques dans des latitudes Nord très élevées à cause du faible ensoleillement.

« Les constructions qui ne reçoivent pas le soleil bas de l'hiver entre 9h du matin et 3h de l'après midi, ne peuvent pas utiliser directement l'énergie solaire pour le chauffage¹⁰⁰ ».

⁹⁹ Mazria, E. (1979) *.Le guide de la maison solaire*. Introduction. Parenthèses, France.

¹⁰⁰ Ibid.

Mais les expériences réalisées dans des logements « *passivhauss* » montreront plus tard que les enveloppes peuvent bénéficier des conditions d'ensoleillement extrêmes à condition d'être fortement isolées.

Ceci témoigne de l'importance de l'énergie solaire dans la conception bioclimatique. Il est nécessaire de connaître les caractéristiques du site pour anticiper le comportement du bâtiment soumis à des variations de température tout au long de l'année.

4.2.1.2. L'orientation

L'orientation va conditionner la stratégie énergétique du projet. Elle détermine l'exposition à l'irradiation solaire journalière des surfaces et, par conséquent, a la quantité d'énergie des espaces. A partir de ce critère va découler le concept de « zonage thermique », qui n'est autre que la disposition réfléchie des espaces en fonction des caractéristiques thermiques du volume. La quantité d'énergie reçue sur les façades d'un bâtiment est tellement importante, que la consommation d'énergie pour le chauffage ou la réfrigération des bâtiments peut doubler ou tripler en fonction de l'orientation.

On constate que les valeurs d'irradiation solaire peuvent être très variables en fonction de l'orientation des façades. Par exemple¹⁰¹ à Lille, sur un plan horizontal et sur un plan vertical sud les valeurs sont parfois inversées. L'énergie solaire reçue sur un plan horizontal en été peut être 7 fois supérieure à celle reçue en hiver. Sur un plan vertical sud, elle n'est supérieure que de 60%. A Perpignan, un plan horizontal reçoit 4,5 fois plus d'énergie solaire en juillet qu'en janvier. A l'inverse, un plan vertical sud reçoit 2 fois plus d'énergie en hiver qu'en été. Nous étudierons avec précision cette question dans le chapitre 6. Cependant, la question de l'orientation a bouleversé l'architecture bioclimatique au point de concevoir des architectures héliotropiques, parfois dépourvues d'intérêt architectural. L'architecture bioclimatique connaîtra dans les années 1980 un essor, mais sera souvent critiquée par la mono orientation des espaces et l'apparition systématique des « serres accolées » en façade sud.

¹⁰¹ Courgey, Oliva. *La conception bioclimatique. Des maisons confortables et économes*. Terre vivante, 2006.

4.2.1.3. La morphologie et l'enveloppe

La forme en architecture va conditionner la gestion de l'énergie des bâtiments. Nous aborderons la question de la *morphologie* tout au long de ce travail de recherche, comme élément clé dans la recherche de la performance énergétique.

Une des questions essentielle relatives à la forme, est la notion de compacité. La compacité d'un bâtiment est mesurée par le rapport entre la surface des parois extérieures et la surface habitable. Plus ce coefficient est faible, plus le bâtiment sera compact. La surface de l'enveloppe étant moins importante, les déperditions thermiques sont réduites.

Les pertes de chaleur dépendent de la surface des parois en contact avec l'extérieur ou avec le sol : pour un même volume et une même surface, une habitation plus compacte consomme moins d'énergie. La compacité varie suivant la forme, la taille et le mode de contacts des volumes construits. En effet, la mitoyenneté et l'habitat collectif favorisera la réduction des surfaces de déperditions une très bonne compacité.

L'enveloppe est l'élément principal dans la conception énergétique d'un bâtiment. Elle constitue l'interface avec l'extérieur et de ce point de vue elle conditionne plusieurs aspects liés au comportement thermique et au confort des occupants. L'enveloppe joue un rôle clé dans la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe peut être obtenue par l'isolation, le traitement des ponts thermiques, la maîtrise des transferts d'air et d'humidité, l'amélioration des vitrages, ce qui permet de mieux maîtriser la consommation d'énergie que ce soit pour le chauffage ou la climatisation.

Certaines approches à la forme des bâtiments ont suscité des réflexions sur les modes de planification urbaine. Les dessins de Hugh Ferriss sur l'urbanisme de la ville de New York¹⁰², suggéraient déjà à l'époque les conséquences de la densification. Il semblerait que la lumière « sculptait » la volumétrie des bâtiments (Fig.44), ou en tout cas, montreraient qu'il y a une réflexion à l'échelle urbaine sur les conditions d'accessibilité à l'ensoleillement ou à la lumière.

¹⁰² Hugh Ferriss, *4 drawings*. Architecte et dessinateur, il fut comissionné en 1922 par Harvey Wiley Corbett pour élaborer 4 dessins schématiques qui permettaient de montrer phase par phase, les conséquences des nouvelles règles d'urbanisme préconisées en 1916 par la ville de New York pour l'occupation des parcelles et qui demeuraient parfois incompréhensibles.

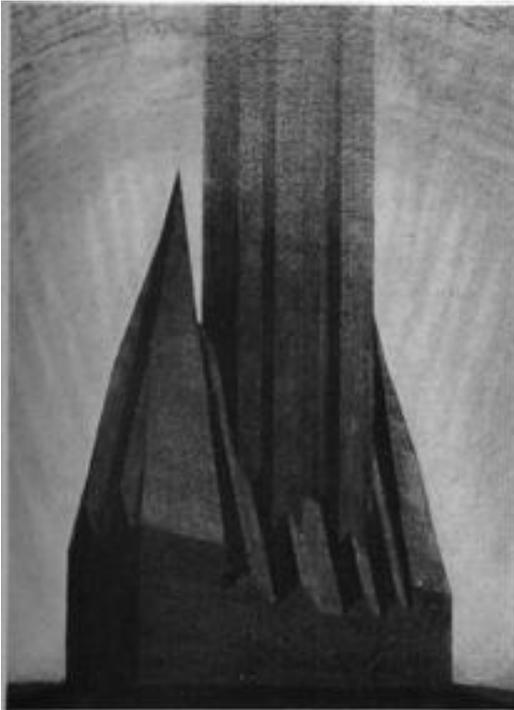
4.2.1.4. La disposition des baies vitrées

La disposition des ouvertures est essentielle à la conception bioclimatique et à l'intégration de la composante énergétique dans le projet. Elle détermine l'accessibilité au soleil par les occupants, les conditions de confort thermique, acoustique et visuel.

Nous pouvons affirmer que la régulation des ambiances réside dans la configuration et la disposition des baies vitrées. Un vitrage classique permet, grâce à l'effet de serre, de récupérer plusieurs centaines de kWh par an : 10 à 25 % des besoins de chauffage (selon l'orientation et les caractéristiques du logement) sont apportés par l'énergie solaire pénétrant par les vitrages d'une habitation. Une conception bioclimatique permet d'optimiser cette part d'apports solaires en jouant sur les orientations, la nature des vitrages et l'inertie thermique. 2/3 des apports en chaleur en été se font par les vitrages.

Pendant des nombreuses années des bureaux d'étude ont mobilisé l'idée que la surface de vitrage ne devait pas excéder 20% de la surface utile pour ne pas avoir des problèmes d'inconfort. Les simulations thermiques dynamiques montraient que pour la qualité de l'enveloppe définie comme « garde fou » ($U_{murs} = 0,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $U_{vitrages} = 1,8 - 2,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), le risque de surchauffe en période estivale était sensiblement plus élevé.

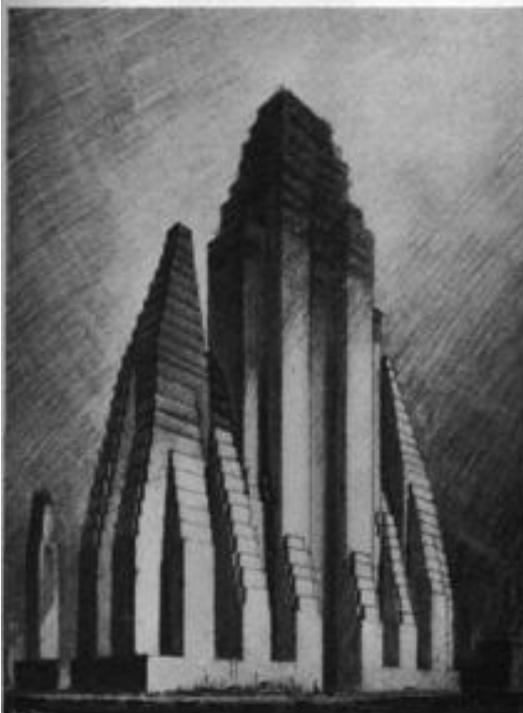
Or, les avancées techniques dans la qualité des vitrages en termes d'isolation et de contrôle du facteur solaire permettent aujourd'hui de remettre en question cette hypothèse.



I. THE ENVELOPE AS DEFINED BY LAW.
Assumed a city block 200 x 800 feet. The number and position (but not the volume) of the Dormers, likewise the shape and position (but not the area) of the tower, are optional with the designer. Otherwise this perspective is simply a pictorial representation of the maximum mass allowed by the present laws.



II. THE ENVELOPE MODIFIED BY A PLAN.
Its appearance after having assumed a plan, and having passed this downward through the original envelope.



III. THE MODIFIED ENVELOPE FILLED WITH RECTILINEAR FORMS.
Its appearance after having substituted for the sloping planes, set-backs occurring at every second floor; tentative limitation being placed upon the tower.



IV. THE MASS MODIFIED BY THE STEEL CONSTRUCTION.
Its appearance after conforming the set-backs to the steel grillage and truncating the pinnacles to the highest floor level, which contains a practicable area. The mass is now ready for architectural articulation.

Figure 44. Schémas urbanistiques de new York

4.2.2. L'approche active : le « Light - Tech »

Cette approche propose une démarche intéressante par rapport à l'utilisation respective de techniques traditionnelles et de techniques numériques. La conception commence par la mise en place de procédés simples, ne demandant pas un énorme effort de mise en place et surtout d'entretien et est ensuite optimisée par des techniques plus développées, permettant d'obtenir de meilleurs résultats.

L'approche « active », plus consommatrice d'énergie, permet d'appréhender toutes les variations de l'environnement extérieur aussi bien que des activités et fonctions intérieures à la conception et durant leur cycle de vie, quelques soient le niveau de sollicitations exercées (chauffage-climatisation, ventilation, production et stockage énergétique, traitement des eaux usées, sécurité et automatisation,...). Les solutions sont rassemblées dans un modules autonome de type « plug and play » concentrant les principales fonctions d'un bâtiment, avec un haut niveau d'automatisation, assurant le contrôle des paramètres clés.

Nous soulignerons donc l'importance des systèmes de chauffage, de ventilation, des équipements de gestion de l'énergie et les principales innovations des dernières années dans le bâtiment.

4.2.2.1. Les systèmes de chauffage

Le chauffage est devenu source de confort au point que les systèmes de production, distribution et régulation sont de plus en plus performants : les bâtiments sont ainsi héritiers d'une approche de conception active.

Ainsi, alors que le remplacement d'une chaudière d'ancienne génération par une chaudière moderne (basse température ou à condensation) permet un gain de consommation énergétique de 20 à 30%, seulement 3% des chaudières sont remplacées en France chaque année alors qu'on compte 4,5 millions de chaudières de plus de 15 ans encore en service, soit un tiers du parc. La maintenance des systèmes de chauffage permet jusqu'à 10% d'économie d'énergie tandis qu'un contrat d'exploitation - avec garantie de résultats - dans le collectif résidentiel ou tertiaire engendre un gain d'énergie de l'ordre de 20 ou 25%, selon les situations.

La mise en place d'un régulateur de température sur un système de chauffage réduit sa consommation d'énergie globale de 7 à 15%. Le système de régulation se compose de robinets thermostatiques, d'un régulateur, d'un programmeur d'intermittence.

4.2.2.2. Les systèmes de ventilation

En termes purement énergétiques, et compte tenu notamment de l'augmentation progressive de l'isolation des bâtiments, les déperditions liées à la ventilation représentent une part relative de plus en plus importante des besoins de chauffage des bâtiments (jusqu'à 30 %) ¹⁰³. Il est d'autant plus important d'adapter au mieux la ventilation aux besoins. C'est aussi le moyen, dans les bâtiments climatisés, de limiter les consommations d'énergie en été ou en mi-saison. Ce poste peut être réduit par une ventilation hybride avec un système de ventilation naturelle pendant certaines périodes, (normalement plus de 50% de l'année). Idéalement, l'escalier central est incluse dans la stratégie de ventilation hybride. C'est surtout lorsque la structure est plus élevée que des effets thermiques peuvent être utilisés en jouant le rôle de moteur. Afin d'utiliser également l'énergie éolienne, la construction technique de la toiture de la circulation peut assister la ventilation naturelle.

La ventilation est un aspect essentiel car construire un bâtiment sans fuites thermiques nécessite de réduire les échanges d'air entre intérieur et extérieur. Si ces conditions favorisent l'impact calorifique des apports internes, l'environnement doit rester vivable et la qualité de l'air satisfaisante. Les systèmes évoluent vers plus d'efficacité (diminution des consommations des ventilateurs, meilleure diffusion d'air, échangeurs double flux haute efficacité, isolement acoustique, modulation de débit...). Les gammes et types de produits permettent de répondre à des besoins de ventilation exigeants.

4.2.2.3. Les systèmes de gestion et production d'énergie.

La gestion de l'énergie permet de mieux intégrer les besoins des occupants en anticipant, si possible, leur consommation. A grande échelle, le management énergétique permet d'effectuer du délestage de charges électriques afin d'éviter des pics de consommation sur le réseau. L'avènement des compteurs intelligents centralisant les données d'offre et de demande contribuera à favoriser les flux. Un bâtiment peut être relié à des réseaux de chaleur ou d'électricité. Parmi les évolutions attendues, le concept de *smart grids* ¹⁰⁴ (réseaux

¹⁰³ Source : ADEME

¹⁰⁴ Les Smart grids, sont des réseaux qui utilisent des technologies informatiques de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation et qui a pour objectif de mieux mettre en relation l'offre et la demande entre les producteurs et les consommateurs d'électricité. Source : wikipedia

électriques intelligents) sera peu à peu mis en place à l'échelon régional et national. Le réseau énergétique sera global et les flux énergétiques seront bi directionnels (consommateur / producteur). Les bâtiments pourront, couplés à la production d'électricité par voie renouvelable, jouer le rôle de « tampon énergétique » ou même stocker de l'énergie (sous forme thermique dans de l'eau chaude sanitaire par exemple).

Le photovoltaïque permet la production d'électricité fondée sur la conversion de la lumière du soleil, source d'énergie renouvelable, par des photopiles, actuellement à base de silicium. Un système photovoltaïque complet comprend, outre les photopiles associées en modules et panneaux, un convertisseur courant continu-courant alternatif, un régulateur et, éventuellement, un équipement de stockage de l'électricité.

La réduction des coûts de fabrication des systèmes photovoltaïques reste une priorité à court et moyen termes. Elle concerne en particulier la production de silicium de qualité « solaire », moins onéreux que celui de qualité « électronique ». À plus long terme, de nouveaux matériaux pourraient succéder au silicium cristallin : silicium amorphe, CIS (cuivre-indium-sélénium), CdTe (tellure de cadmium), matériaux organiques, en particulier sous forme de couches minces. Par ailleurs, l'amélioration de la partie conversion-gestion peut permettre de réduire les pertes et d'améliorer la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Toutefois, le solaire photovoltaïque reste, par nature, une source intermittente. Sa mise en œuvre implique donc, en parallèle, un complément d'approvisionnement en électricité (réseau d'alimentation ou production locale, avec un groupe électrogène, par exemple) et/ou le stockage de l'électricité photovoltaïque produite durant les périodes ensoleillées – périodes qui ne coïncident pas nécessairement avec les périodes de consommation.

L'architecture évolue également dans une dynamique d'optimisation énergétique globale, impliquant une évolution des infrastructures et une meilleure gestion de l'énergie à travers des *smart grids*. Des réflexions sont menées sur les interconnexions envisageables, à l'instar de projets d'urbanisme conciliant moyens de transport individuels et bâtiments. Par exemple, des véhicules électriques pourraient charger leur batterie à partir du surplus d'énergie généré par les bâtiments à énergie positive. Ils seraient ainsi utilisés comme moyen de stockage.

4.2.3.4. Les innovations techniques

L'avenir du bâtiment à énergie positive s'inscrit dans le cadre des innovations techniques dans les matériaux, les techniques, les systèmes et la gestion de l'énergie. Au-delà des aspects énergétiques, l'enveloppe peut également intégrer des fonctions nouvelles : les composants de façade ou de toiture deviennent ainsi de plus en plus multifonctionnels. On peut envisager de passer des façades traditionnelles purement « statiques » aux façades « dynamiques », dont les propriétés (transparence, perméabilité à l'air ...) sont modulées automatiquement ou à la demande, en fonction des phases climatiques ou de la luminosité. Les façades peuvent également devenir démontables, évolutives, réutilisables et recyclables.

4.2.3.4.1. Les isolants sous vide

La performance thermique des isolants sous vide se base sur la combinaison de deux phénomènes pour réduire la convection de la phase gazeuse : la basse pression pour éliminer le gaz au maximum et des matériaux nanoporeux tels que les poudres de silice et les aérogels, qui sont utilisés pour emprisonner le gaz restant dans des cavités de dimension inférieure au libre parcours moyen du gaz. Les effets de convection du gaz sont ainsi minimaux.

Avec une densité de 180 kg/m³, ces isolants améliorent considérablement l'inertie du bâtiment. A performance thermique équivalente, 1 cm d'isolant sous vide correspond à 6 cm de PSE et 9 cm de laine de verre. Le gain en surface et en volume dans le cadre d'isolation par l'intérieur est considérable. L'épaisseur de ces matériaux varie entre 15 et 30 mm, pour un coût entre 40 à 60 €/m². L'application de ces matériaux a été expérimentée en Allemagne. Elle est conseillée pour les portes, les coffres de volets roulants, les planchers de rénovation et les façades. Cependant la fragilité de ce produit limite son utilisation.

4.2.3.4.2. Les vitrages

Les *vitrages actifs* verre passant instantanément de l'état transparent à l'état translucide grâce à une commande électrique ; le vitrage dont la coloration change, toujours à l'aide d'une commande électrique, selon la transmission lumineuse et le facteur solaire recherché ; enfin, les produits adaptables à la température ou à la luminosité ambiante. Parmi eux figure le projet Fluxeo, qui vise à inclure et à polariser des cristaux liquides dits «cholestériques» dans des vitrages. Capables de réfléchir ou de laisser passer la lumière, ces vitrages pourront chauffer le bâtiment ou le protéger du soleil, voire même produire de

l'électricité lorsqu'ils intégreront du silicium photovoltaïque. En Allemagne, de nombreuses recherches sont menées par des instituts et entreprises pour développer des projets pilotes sur ces technologies de vitrage actif.

Les *vitrages PCM* intègrent 4 composantes du système dans une unité fonctionnelle: isolation thermique, protection contre la surchauffe, conversion de l'énergie et stockage thermique. Un triple vitrage isolant fournit une excellente isolation thermique d'une valeur $U = 0,48 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Un volet de prismes dans la lame d'air extérieure reflète le rayonnement solaire à haute altitude en été et les transmet à des altitudes inférieures à 35° en hiver. Un des composants essentiels est le fin module de stockage de chaleur dans un matériau à changement de phase, qui équivaut à une capacité de stockage d'environ 20 cm de béton. La chaleur est stockée dans le MCP au moyen d'un procédé de fusion. Au cours de la nuit et les jours suivants, la chaleur stockée est livrée à l'intérieur pendant la recristallisation.

Les *vitrages photovoltaïques* intègrent des éléments capteurs d'énergie et offrent aux architectes et aux planificateurs de nouvelles possibilités pour la conception des façades qui produisent de l'énergie en conservant l'esthétique à travers la (Wafer Polycristallin Engineering). Les baies vitrées dans les immeubles de bureaux, les jardins d'hiver ou sur les toits ouvrants automobiles, constitueront des fournisseurs d'énergie à cellules PV transparentes. Les modules translucides POWER-CELLS peuvent être directement intégrés dans la façade. Tous les types commerciaux de verre sont adaptés, de verre feuilleté de sécurité à isolation thermique, vitrages, même les surfaces courbes peuvent constituer des générateurs solaires avec POWER-cellules. La matière première de base pour les cellules solaires est le silicium polycristallin. Les POWER-CELL mesurent 10 X 10 centimètres pour une épaisseur d'environ 0,3 millimètres. Chaque cellule produit, selon son type, entre 0,6 et 0,9 watts. Les cellules peuvent être intégrées dans des modules de différentes tailles, jusqu'à 2 X 3,5 mètres. Ils ont un pic de production de 80 watts par mètre carré. Le produit standard permet à un dixième de la lumière de passer en travers avec un taux d'efficacité de 10%. Dans l'avenir, les cellules permettront un maximum de 30% de transmission lumineuse et seront fabriquées sur demande. Une large surface de systèmes photovoltaïques sera possible avec la nouvelle technologie. La transparence remplace les modules classiques qui génèrent de l'ombre, contribuant ainsi à la diminution des coûts de construction et à la réduction des consommations d'énergie pour le refroidissement des pièces. La surface de la structure des cellules POWER devrait permettre d'accroître le rendement énergétique des systèmes.

4.2.3. L'approche « intégrée » : le « High - Tech » ou l'impact des nouvelles technologies

L'évolution des matériaux et des systèmes serait en train d'arriver à un point optimal. L'amélioration de l'isolation des bâtiments dans la recherche de la réduction des besoins énergétiques pour le chauffage, aurait inversé la logique du confort : un bâtiment fortement isolé aurait tendance à surchauffer plus qu'un bâtiment traditionnel, même en période hivernale [Sidler, 2007]. De même, les systèmes de ventilation, étanchéité à l'air, et éclairage sont de plus en plus performants. Il semblerait que l'évolution de l'architecture résiderait dans l'optimisation de l'enveloppe pour produire de l'énergie, et ceci se ferait à travers les nouvelles technologies de conception.

La conception « intégrée » est la mise en concordance des stratégies de conception bioclimatique avec l'ensemble des systèmes et des technologies innovantes dans les techniques et les modes de conception architecturale. Nous retrouverons cette réflexion dans « l'ère informatique » [Daniels, 1998].

« Les constructions traditionnelles du passé n'ont pas profité du grand nombre d'options techniques disponibles aujourd'hui, et pourtant elles nous orientent vers la bonne direction tout comme les bâtiments contemporains dans lesquels les ressources naturelles sont utilisées de façon optimale. Les bâtiments de demain devront répondre à des hautes exigences écologiques et techniques dans leur construction et délivrer à la fois le cadre nécessaire pour le traitement de l'information et la communication, ainsi qu'à l'automatisation et l'optimisation des processus. »

Klaus Daniels - dans le domaine de l'ingénierie environnementale - et plus tard Stephen Wolfram – dans le domaine des mathématiques appliquées à l'informatique [Wolfram, 2002] – développeront le concept d'optimisation du processus à travers le traitement des informations en couplage avec les structures de la nature. Autrement dit, l'évolution de la science pour Wolfram, et plus particulièrement de l'architecture pour Daniels, serait liée à un rapprochement de la structure d'un bâtiment aux *structures formelles* existantes dans la nature. Ceci est valable non seulement pour l'interprétation ou la représentation de ces formes, mais pour la compréhension des conditions de l'environnement comme éléments générateurs d'une *morphologie*.

Le parallèle établi entre *forme* et *structure* n'est pas gratuit. Nous avons évoqué précédemment §4.1 la composante *systémique* de l'architecture héritée de Le Corbusier dans sa vision du logement comme une machine à habiter. Celle-ci sera considérée plus tard comme une machine à produire du *confort* (domotique).

Mais il est important de comprendre que les principes de l'architecture moderne évoqués par Le Corbusier, séparaient la *structure* de l'*enveloppe* (pilotis, toit-terrasse, plan libre, fenêtre en longueur, façade libre). Il a anticipé qu'il y aurait une évolution naturelle de l'architecture en se détachant des murs porteurs avec le développement des matériaux et des techniques constructives. Par conséquent et depuis plusieurs décennies, la *morphologie* du bâtiment est déterminée par une enveloppe indépendante de la structure.

Or, les investigations de Wolfram [Wolfram, 2002] sur la relation entre les mathématiques et les structures de la nature montrent que ces dernières correspondent à des expressions optimales en réponse à une problématique du contexte environnant. Par ex., le développement morphologique d'une plante répond à la maximisation des surfaces d'enveloppe en partie haute pour le captage de l'énergie solaire, l'optimisation des canaux de conduite des fluides, et l'utilisation performante des ressources disponibles, comme l'eau. L'observation des structures dans la nature nous montre à quel point elles sont optimales. La relation entre forme et structure serait donc plus étroite.

Kas Osterhuis, architecte et professeur de l'Université TU Delft a repris les travaux de Wolfram [Wolfram, 2002] de façon à intégrer les nouvelles technologies dans la conception architecturale. A partir de la compréhension des structures optimales de la nature il serait possible de modéliser le processus de construction morphologique d'une entité. En d'autres termes, l'optimisation *morphologique* d'une structure répondrait à une logique d'optimisation des ressources disponibles dans son environnement.

Osterhuis montre dans quelle mesure – à différence de Corbusier - la recherche de la performance d'un bâtiment rapproche la structure de son enveloppe. On pourrait même affirmer que les enveloppes sont en train de devenir des structures au point d'être fusionnées. Le mouvement moderne a produit des nombreux exemples de rapprochement de ces deux composantes, comme le *Seagram building* de Mies Van der Rohe à New York. Cependant, la différence résiderait dans l'évolution vers une des enveloppes qui suivent une logique *organique* et non pas une logique *industrielle* de répétition.

4.3. Les outils de conception

La conception architecturale évolue vers l'intégration des nouveaux outils numériques compte tenu de la spécificité des études, du nombre d'informations et de l'évolution des techniques d'analyse et représentation du projet. L'approche « intégrée » trouve son sens dans l'incorporation des nouveaux outils et des technologies dans le processus de conception de l'architecte. Nous nous sommes appuyés sur les travaux de Depecker [Depecker, 1985] qui distingue deux types d'outils : les outils *d'aide à la conception* et les outils de *conception assistée par ordinateur* CAO ou outils d'évaluation. Nous rajouterons les outils qu'on appellera « *intelligents* » compte tenu de leur capacité à intégrer représentation et informations, nécessaires pour répondre aux différents degrés de spécificité de l'architecture.

4.3.1. Les outils d'aide à la conception

Ces outils aborderaient un problème à une échelle globale, analysant et synthétisant l'information pour donner des orientations générales dans les phases initiales du processus de conception. Bien qu'ils s'appuient sur des bases de données et des structures de calcul, ils ne sont pas utilisés comme des instruments de mesure car leur degré de définition ne sera pas détaillé. L'objectif de ces outils est de formuler et de comparer des solutions dans les phases en amont, soit la phase esquisse. Cependant, la problématique réside dans la représentation. Ils ont des difficultés pour intégrer les esquisses formulées par l'architecte aux modes de représentation de l'outil, souvent trop simplifiés ou qui ne sont pas ergonomiques.

Nous pouvons catégoriser l'outil formulé dans le chapitre 6 comme un outil d'aide à la conception, dans le sens où il donne des orientations générales mais il aborde la problématique de la représentation d'un autre point de vue.

4.3.2. Les outils d'évaluation

Les outils d'évaluation correspondent à la plupart des instruments utilisés par les concepteurs, car ils permettent un degré de représentation plus élevé, et fournissent des informations précises. Leur objectif est de déterminer le type et les dimensions des éléments comme par ex. la composition des parois, les systèmes de ventilation, les niveaux d'éclairage ou le comportement thermique. Cependant, leur fonctionnement exige un degré de définition important du projet en termes de surfaces, morphologie, et configuration générale de la

spatialité. De ce point de vue, ces outils ne sont pas adaptés aux phases initiales du projet et sont considérés comme des instruments de *mesure*.

Plusieurs travaux se sont interrogés à l'intégration des outils informatiques dans le processus de conception. A partir des travaux de Fernandez ¹⁰⁵[Fernandez, 2010] nous avons repris la classification concernant les trois types *d'approches techniques* des outils dans le domaine de la conception architecturale : l'approche *constructive*, l'approche *énergétique* et l'approche *environnementale*.

Ces outils interviennent dans différentes phases et ont la particularité de toucher à plusieurs domaines. Nous pourrions dire qu'ils appartiennent à une catégorie qui combine l'évaluation et l'aide à la conception. Nous avons repris la classification établie par Fernandez (Fig.45).

X : caractéristique annoncée
* : caractéristique supplémentaire suite à l'analyse de l'outil

	CATEGORIE	APPROCHE	PHASE UTILISATION	UTILISATEUR
	Aide à la conception Évaluation Conception Aide à l'évaluation	Constructive Énergétique Environnementale Sensible	conception AFS A/D PRO DGE	professionnels RE A/VO Particuliers Chercheurs
ARCHIFORM	X		X X X X	X X X X
ARCHIWISARD	X	X X	X	X
AUDIENCE	X	X X	X	X X
COCON	X	X X	X	X X X
DIAL-Europe	X	X X	X	X X
ECOTECT	X	X X X	X X X	X X
ELODIE	X	X	X	X X X
EQUER	X	X X	X X	X X X X
GREEN BUILDING ST	X	X X	X X X	X X
SKETCHUP	X	X X X	X	X
TRNSYS	X	X	X X	X X X X

Figure 45. Classement non exhaustif des outils en fonction de différents paramètres.

Dans le cadre de cette recherche, nous allons nous concentrer principalement sur l'approche énergétique. Parmi ces outils, nous pouvons identifier ceux qui ont une approche multicritères comme ArchiWizard, COCON, Pleiades COMFIE, Ecotect et Design Builder.

¹⁰⁵ FERNANDEZ, Laure. (2010). *Transposition des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs faire relatifs au choix des matériaux*.

4.3.3. Les outils « intelligents »

La capacité des outils à s'intégrer dans le processus de conception dépend en grande mesure de la question de la représentation. Nous avons montré que les processus cognitifs passent par la représentation de la solution afin de pouvoir l'analyser, la reformuler et la valider. Or, cette question est souvent associée à deux aspects : le degré de spécificité de l'outil et par conséquent un degré d'expertise élevé, et d'autre part l'ergonomie, soit la capacité à représenter d'une façon simple un problème complexe.

La question de la représentation a été intégrée aux outils des calculs depuis plusieurs années. On peut en distinguer principalement les outils conteneurs d'information (BIM), et les outils de design paramétrique.

4.3.3.1. Les modèles conteneurs d'information BIM

La représentation tridimensionnelle a évolué vers les modèles conteneurs d'informations connus comme les « Building Information Model ». Ces modèles qui contiennent des informations sur la géométrie de la construction, les relations spatiales, les informations géographiques, les quantités ainsi que les propriétés des éléments de construction, constituent des éléments conceptuels pour le développement de l'architecture.

4.3.2.2. Le design paramétrique

Le design *paramétrique* est défini comme la « *pratique une méthode de travail basée sur la paramétrisation des éléments*¹⁰⁶ ». D'après cette définition le design à partir d'algorithmes de calcul serait composé de trois aspects dans la conception assistée par ordinateur: le design *paramétrique*, le design *scripté* et le design *génératif* (modélisations à partir d'un ou plusieurs *patterns* de forme).

Le design *scripté* est basé sur un encodage et une rationalisation informatique des processus de production formelle (géométrie, cinématique) afin d'indiquer à un ordinateur la démarche à suivre pour obtenir une forme finale. Les L-systems non-probabilistes et leur

¹⁰⁶ Duong Tam Kien: Information Architect.

implémentation sont ainsi autant un outil pour réduire le temps de calcul qu'un outil de description de l'éventail des possibles d'une grammaire visuelle.

Le design *génératif* est basé sur des techniques de simulation et de modélisations basés sur des patterns de formes. C'est la simulation ou l'exploitation des interactions d'un système pré-défini par ses parties qui produit l'objet final du processus de conception. Le système peut avoir un comportement peut être complexe ou non, comporter des phénomènes émergents ou non. Le design génératif se concentre sur la définition des « graines » et de l'observation des différentes formes engendrées appuyées par des techniques de modulations plutôt que sur le contrôle absolu ou la production directe d'un objet fini.

Conclusion du chapitre

Les avancées techniques ont permis aujourd'hui d'optimiser la performance énergétique des bâtiments du point de vue de la qualité des matériaux et du rendement des systèmes. Il est certain que la prolifération des solutions techniques a donné lieu au développement de projets «écologiques» sous forme de maisons individuelles, voire des «quartiers écologiques». La conception des bâtiments performants repose en grande partie sur des techniques innovantes, mais elle laisse parfois de côté une réflexion plus vaste sur l'architecture. Il n'est pas étonnant que la plupart des projets d'habitation écologique ressemblent les uns des autres, au point de devenir quasiment identiques.

Nous pouvons comprendre l'intégration de la composante énergétique à la conception d'un bâtiment, à partir de la transition entre une « machine architecturale » vers une « entité énergétique ». Ceci suppose le dépassement de l'état purement mécaniciste et fonctionnel d'une cellule de logements, pour aborder la réflexion sur l'influence de l'environnement extérieur sur la configuration générale des bâtiments (implantation, forme et caractérisation des espaces).

D'un point de vue environnemental, les bâtiments prennent du sens comme *entités énergétiques* dans un système en *déséquilibre*. En considérant les architectures comme des enveloppes composées d'énergie, nous comprenons que l'architecture est riche quand elle est adaptée à son milieu d'un point de vue conceptuel, technique et constructif. Cependant, malgré l'essor des architectures bioclimatiques, les bâtiments écologiques du futur ne fonctionneront plus sur des systèmes uniquement passifs.

L'architecture évolue vers l'intégration des nouvelles technologies, non seulement dans les matériaux, les systèmes ou les techniques constructives, mais dans les modes et les outils de conception. Ces outils devront s'intégrer certainement aux nouveaux modes de conception de l'architecte, et ils vont modifier l'approche architecturale à certaines caractéristiques de l'environnement.

Il faut considérer en particulier l'évolution des outils de design paramétrique, qui seraient les seuls capables d'intégrer les données environnementales, de synthétiser des grandes quantités d'information pour le concepteur et de représenter des morphologies optimales.

Conclusion de la deuxième partie

La réduction de la consommation d'énergie est devenue un enjeu majeur à l'échelle mondiale et plus particulièrement au niveau européen. Les différentes politiques mises en place pour optimiser l'efficacité énergétique dans les différents secteurs, se sont traduites par l'imposition de réglementations avec des objectifs chiffrés en termes quantitatifs. C'est le cas des réglementations thermiques qui ont marqué le pas dans l'évolution des matériaux, le développement des techniques constructives et l'amélioration du rendement des systèmes dans le secteur du bâtiment.

L'approche bioclimatique passive a dû intégrer ces évolutions techniques dans le processus de conception donnant naissance aux « approches intégrées ». La difficulté d'appréhender les aspects techniques et notamment les nouvelles questions énergétiques ont conditionné les concepteurs à développer des outils dits « d'aide à la conception ». Cependant ces outils se sont transformés en outils de *mesure*, conduisant ainsi à la spécialisation de l'architecture en plusieurs domaines.

La poursuite d'objectifs *quantitatifs* est allée en détriment de la notion de *qualité*, notamment en ce qui concerne les paramètres de mesure du *confort*. De la même façon, les enjeux énergétiques se sont traduits par des objectifs quantifiables en termes de *consommation* d'énergie, et ont relayé la compréhension de la globalité du projet en articulation avec son environnement. C'est le cas d'une des questions essentielles pour les concepteurs: la *forme* en architecture. La réflexion s'est traduite en un *indice de forme* qui s'appellera plus tard la *compacité*, sans approfondir sur la complexité des relations spatiales dans la trilogie espace – entité – individu. On peut ainsi affirmer que la question de l'intégration *globale* des aspects énergétiques au processus de conception a été négligée.

La première hypothèse de notre thèse se voit donc confirmée :

Hypothèse 1

La composante énergétique n'est pas intégrée en amont dans le processus de conception: les outils sont orientés à la résolution du problème énergétique et non pas à la résolution du problème architectural.

La question serait-elle mal posée ? Comment aborder la conception d'un projet d'un point de vue énergétique sans négliger la globalité du projet architectural ?

L'intégration *globale* des aspects énergétiques passe par la transition entre la « machine architecturale » et « l'entité énergétique ». Ceci correspond au passage d'un objet avec un comportement thermique déterminé, à une entité « vivante » dont son comportement énergétique serait conditionné par l'interaction avec son environnement.

Certes, l'environnement constitue un espace qui possède des caractéristiques climatiques particulières et qui contient d'autres entités. D'autre part, ces entités constituent en elles-mêmes des ensembles qui se nourrissent d'autres matières et interagissent physique et chimiquement entre elles. Finalement, une construction constitue une interface entre l'utilisateur et l'environnement extérieur ainsi qu'une entité consommatrice d'énergie. La conception d'un projet repose donc sur une multiplicité de relations avec la composante énergétique. On peut donc affirmer que le processus de conception serait étroitement lié à la composante énergétique avant même de la genèse du bâtiment.

A partir de ce constat on peut établir la deuxième hypothèse de notre travail :

Hypothèse 2

Il est possible de déceler une structure d'organisation du processus de conception à partir de la composante énergétique.

Notre investigation s'est donc orientée vers la définition d'une structure d'intégration de la composante énergétique à partir d'une *approche méthodologique* à la conception.

Cette approche est formulée en deux parties : La première - qui fait l'objet du chapitre 5 - correspond à une *reconstitution méthodologique* de la démarche de l'architecte en analysant l'impact *énergétique* des choix du concepteur. La deuxième partie - dans le chapitre 6 - propose un modèle d'intégration de la composante énergétique à travers la construction d'un *outil méthodologique* d'aide à la conception.

Troisième partie. Approche méthodologique à la conception

RESUME: Dans la troisième partie nous présenterons *l'approche méthodologique à la conception*, sujet qui constitue le produit de notre investigation. Dans un premier temps le travail porte sur la reconstitution du processus de conception à partir des recherches existantes et de l'expérience professionnelle acquise dans le cadre de la convention CIFRE. Cette reconstitution permet une analyse transversale de la composante énergétique dans le processus de conception. Dans la deuxième partie nous présenterons la démarche de construction d'un outil d'aide à la conception qui s'appuie sur les conclusions préalables. La compréhension globale de cette *approche méthodologique* fait l'objet de notre réflexion et ouvre la voie à d'autres domaines à une échelle plus large.

Introduction de la troisième partie

La question énergétique dans le bâtiment a évolué à travers le temps. Les premières recherches dans les années 1960 ont porté sur les économies d'énergie à travers une approche bioclimatique. Mais l'évolution de la technique a permis d'adapter les différentes composantes du bâtiment aux performances exigées par les réglementations : les efforts portés sur une conception adaptée à son environnement furent contrebalancés dans les années 1980 par des systèmes performants afin de « rattraper » les défauts de conception architecturale.

Depuis les années 2000, les recherches portent sur la conception intégrée du projet en concordance avec les ressources disponibles dans son contexte, à travers des entités peu consommatrices d'énergie, composées d'enveloppes « actives » qui jouent le rôle d'interface avec l'environnement extérieur, et qui permettent de produire de l'énergie en utilisant ces ressources : on peut définir ainsi les « bâtiments à énergie positive ». Par conséquent, les aspects énergétiques ont pris de plus en plus de place dans le processus de conception.

Nous nous sommes donc intéressés à analyser l'impact de la composante énergétique dans la démarche du concepteur – architecte à travers une *approche méthodologique* à la conception des bâtiments d'habitation collective. Cette analyse fait l'objet de notre investigation.

Ce travail de recherche est né dans le cadre d'un *appel à idées* lancé par le PUCA¹⁰⁷ en 2008 dans le cadre du Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Énergie dans le Bâtiment (Prébat). L'appel à idées CQHE – (Concept Qualité Habitat Énergie) avait pour objectif « *d'encourager des démarches de conception concourante pour la modélisation et la réalisation de bâtiments d'habitat collectif à très haute performance énergétique, voire à énergie positive* »¹⁰⁸. Cette démarche présentée sous forme de concours, était divisée en deux phases avec un énoncé clair : développer un « modèle » d'habitat innovant.

La première correspondait à une phase *de recherche* sur les performances, les qualités, les morphologies et les techniques qui permettaient de définir ce type d'habitat à très haute performance énergétique. L'objectif était de proposer des concepts innovants, des méthodes de conception renouvelées, et des démarches d'application de ces concepts à travers des opérations « pilotes » ou des « building concepts ».

La deuxième phase consistait à intégrer ce « building concept » dans une opération de construction en partenariat avec un maître d'ouvrage ou une collectivité, en étudiant sa faisabilité en termes techniques et financiers. Cette initiative qui associait des concepteurs architectes et ingénieurs, ainsi que des centres techniques était orientée à la mise en place de nouveaux concepts d'habitat dans une logique de *produit* qui pouvait être développé et commercialisé comme un concept d'habitat innovant et énergétiquement performant.

Vingt projets ont répondu à la consultation et seulement 8 équipes ont été retenues, dont l'équipe *NFA Architectes*¹⁰⁹ que nous avons intégré dans le cadre du CIFRE. La réponse de l'équipe s'est différenciée entre les 8 propositions par son *approche méthodologique* avant que par le développement d'un « modèle » d'habitat. Pour l'équipe de concepteurs NFA, l'idée de développer un « modèle idyllique d'habitat » autour d'un concept ou d'une technologie innovante, semblait donc une contradiction.

¹⁰⁷ PUCA : Plan Urbanisme Construction Architecture est un service interministériel rattaché à la Direction générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature (DGALN) au Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du Ministère de l'Égalité des territoires et du Logement. C'est une agence nationale de la recherche et de l'expérimentation dans les domaines de l'urbanisme de l'architecture et de la construction. Source : <http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr>.

¹⁰⁸ PUCA – Comité Bâtiments neufs du Prébat. *La méthode CQHE – Bilan de l'appel à idées*.

¹⁰⁹ NFA – Nicolas Favet Architectes.

En effet, les recherches sur la conception bioclimatique considèrent l'environnement comme élément déterminant du comportement thermique – énergétique d'un bâtiment. Le développement d'un prototype issu d'un concept ou une technologie innovante répondrait donc à un contexte également « idyllique », mais il serait contraint à des difficultés de mise en œuvre dans des environnements réels avec des conditions climatiques déterminées.

Au contraire, le postulat de NFA s'appuyait sur l'idée de développer une *démarche* qui permettrait de développer différents « modèles » ayant la capacité de s'adapter à son environnement. La question de l'innovation dans des aspects comme la *typologie* ou la *forme* d'un bâtiment, serait issue du contexte et non pas par l'imposition d'une idée, un concept ou une forme architecturale :

« CQHE est une opportunité de définir des « modèles » favorisant les aspects environnementaux et thermiques et laissant émerger des typo-morphologies de bâtiment et des formes architecturales répondant plus « littéralement » à ces aspects. Selon une approche systémique, la définition de ce « modèle » ne sera pas un bâtiment à dessiner ou à mettre en œuvre en l'état dans un contexte, mais simplement de faire émerger de nouvelles formes architecturales à partir d'une approche bioclimatique et de l'utilisation de nouveaux logiciels de modélisation « environnementale »... »¹¹⁰

L'objectif étant de développer un projet à très haute performance énergétique issu d'une approche « contextuelle », il était question d'entamer une réflexion sur la construction d'un processus méthodologique qui permettait d'aborder un projet à partir de différents paramètres liés à l'environnement, avant de commencer la phase esquisse.

Il semblait donc cohérent d'étudier en détail la démarche de conception de l'architecte et d'analyser l'impact des choix du concepteur sur la performance énergétique. Ceci fait l'objet du chapitre 5. A partir de cette analyse et dans le cadre de la consultation du PUCA, nous avons proposé la construction d'un outil méthodologique d'aide à la conception, que nous présenterons dans le dernier chapitre.

¹¹⁰ Collectif CQHE Modèle. *Effilogi : Méthodes, concepts et systèmes de conception*. Appel à idées CQHE. NFA Architectes, 2007.

Chapitre 5. Etude des aspects énergétiques dans le processus de conception.

« Tout problème de conception débute par un effort pour parvenir à l'adaptation réciproque entre deux entités : la forme considérée et son contexte. (...) Cette forme est la solution au problème, alors que le contexte définit, délimite le problème, et le véritable objet de la conception est en réalité l'ensemble comprenant la forme et son contexte »

Alexander (1971)

L'objectif de la réflexion méthodologique était de comprendre l'influence des aspects énergétiques dans un processus de conception complexe. La démarche de travail a été basée sur la compréhension des mécanismes de formulation du problème et de formulation de la solution dans un processus divisé en plusieurs phases. Nous avons ainsi *décomposé* le processus de conception pour étudier les relations entre les différents choix du projet, et plus particulièrement pour étudier l'influence des choix de projet sur la performance énergétique.

Ainsi, certains aspects du processus de conception peuvent être considérés selon un modèle séquentiel, et d'autres comme une démarche simultanée, mais il apparaît que la dynamique réelle tend vers un processus de nature *itérative*. Les différentes phases s'enchaînent de manière parallèle et non pas successive. Il est ainsi possible de décrire des interactions entre les différentes phases du processus.

L'identification des phases stratégiques de conception nous a permis d'établir des pistes pour la construction d'un outil méthodologique capable d'anticiper les problématiques liées à l'énergie sans imposer une idée ou une technologie au concepteur. Nous étudierons ainsi chaque phase du processus de façon à comprendre d'abord l'ensemble des choix du concepteur, pour ainsi nous pencher sur les relations avec la composante énergétique dans le projet.

5.1. Structure méthodologique

A partir des recherches sur la démarche de conception, ses aspects méthodologiques et ses mécanismes cognitifs, nous nous sommes penchés sur la structure méthodologique qui caractérise la démarche de conception en architecture.

Nous avons tenté de reconstituer cette structure à partir des études préalables et de l'expérience relevée sur le terrain auprès des architectes, en décomposant la démarche sous forme de phases contenant à la fois des sous-thèmes. On retrouvera ainsi un parallèle avec la « structure arborée » de résolution d'un problème proposée par Alexander. Nous étudierons cette arborescence comme une structure décisionnelle à laquelle est confronté l'architecte tout au long de la conception d'un projet.

5.1.1. Phases d'articulation du projet

Nous avons repris les travaux de Fernandez [Fernandez, 2002] sur le processus du projet architectural dans la mesure où il établit un parallèle avec le schéma proposé par Conan [Conan, 1990] (Fig.46), comme point de départ de notre réflexion.

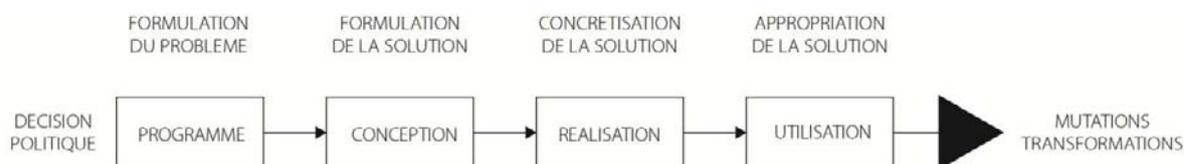


Figure 46. Processus de projet architectural et urbain. Fernandez (2002)

Les deux perspectives coïncident sur une décomposition par phases dans le processus de conception. La formulation de Conan se superpose ainsi à la structure évoquée par Fernandez en ce qui concerne le cycle du projet architectural.

Fernandez s'intéressera particulièrement aux phases de *conception* ou de *formulation de la solution*, en s'appuyant sur les études de Luc Adolphe sur la conception architecturale [Adolphe, 1996]. Adolphe propose de décomposer la démarche de l'architecte en 5 paramètres de conception qui vont conditionner la qualité des ambiances du projet : *L'implantation* dans le site, le choix des *matériaux* et des *systèmes* constructifs, les choix *morphologiques*, la distribution des *espaces* et le traitement de *l'enveloppe*.

5.1.2. Grille d'analyse thématique

Les travaux d'Adolphe seront repris par Alain Castells et Pierre Fernandez [Fernandez, 2001] dans la structure de Conseil ADDENDA, qui propose d'analyser la démarche de conception à travers une « grille d'analyse thématique » (Fig.47). Cette grille croise les éléments d'analyse d'un projet architectural et urbain avec les problématiques des « 14 cibles » sur la qualité environnementale dans le bâtiment (Fig.16). Cette démarche d'analyse met en relation de nombreux concepts architecturaux avec des paramètres dits « sensibles » aux composantes de la conception. Elle propose une vision de 4 grandes phases du projet : L'implantation, la morphologie, la matérialité et la spatialité. Cependant, la démarche d'analyse d'un projet proposée par Fernandez n'évoque pas le cinquième paramètre proposé par Adolphe : le traitement de *l'enveloppe*. Il est certain que Castells et Fernandez ne négligent pas cette question mais qu'ils considèrent qu'elle doit être intégrée à la *matérialité*, et à la *morphologie*.

Nos travaux menés dans l'agence Franck Boutté Consultants¹¹¹ à propos d'une démarche de conception *architecturale et environnementale* intégrées, se sont appuyés sur les modèles proposés par Adolphe, Castells et Fernandez. Nous avons repris les « concepts architecturaux » dans chaque phase de la grille ADDENDA (Fig.47) et nous avons intégré les thèmes à prendre en compte pour les phases *Programme, réglementation et systèmes*). Boutté utilisera recueillera plus tard les « thèmes de la conception architecturale », en inclura trois nouvelles phases : l'urbanité, les systèmes et la performance. Le concept *d'urbanité* sera introduit dans l'idée de penser cette *grille de conception* à partir de l'échelle urbaine. Tandis que l'inclusion des *systèmes* et de la *performance* témoigneront de l'évolution du métier d'architecte entre l'analyse d'Adolphe en 1996 et celle de Boutté en 2008 : l'architecture devra intégrer des technologies de réduction de la consommation d'énergie et des objectifs chiffrés en termes de performance environnementale.

Si bien la grille d'ADDENDA permet de *visualiser* les relations entre les différentes thématiques et d'identifier les problématiques hiérarchiquement, mais n'est pas capable de représenter leur impact dans la conception du projet. Cependant, cette structure d'analyse constituera la base d'un instrument méthodologique que nous développerons par la suite.

¹¹¹ FBC. Afence Franck Boutté Consultants. Architecture & ingénierie environnementale. Paris.

ARCHITECTURE				ENVIRONNEMENT															
PROBLEMATIQUES	CONCEPTS ARCHITECTURAUX		PARAMETRES SENSIBLES	CIBLES ENVIRONNEMENTALES															
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1 I M P L A N T A T I O N	1.1	IDENTIFICATION DES DESSERTES	1.1.1	TRANSPORTS															
			1.1.2	VOIRIES															
			1.1.3	ACCES															
			1.1.4	STATIONNEMENT															
	1.2	TRAITEMENT DES LIMITES	1.2.1	ENCEINTE															
			1.2.2	ORIENTATION															
			1.2.3	TOPOGRAPHIE															
	1.3	CONTRÔLE CLIMATIQUE	1.3.1	ENSOLEILLEMENT															
			1.3.2	VENTS															
			1.3.3	PRECIPITATIONS															
			1.3.4	HUMIDITE															
	1.4	INSERTION PAYSAGERE	1.4.1	BATI															
			1.4.2	MINERAL															
			1.4.3	VEGETAL															
	1.5	GESTION DES RESSOURCES	1.5.1	ENR															
			1.5.1	RESEAUX															
			1.5.3	DISPONIBILITES LOCALES															
1.6	MAITRISE DES NUISANCES	1.6.1	POLLUTIONS																
		1.6.2	RISQUES																
1.7	FRAGMENTATION DES ESPACES	1.7.1	VUES																
		1.7.2	LIAISONS																
		1.7.3	CONNEXIONS																
PROBLEMATIQUES	CONCEPTS ARCHITECTURAUX		PARAMETRES SENSIBLES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
2 M O R P H O L O	2.1	OPTIONS DE COMPACITE	2.1.1	FORME															
			2.2	DEFINITION DE L'EMPRISE															
	2.3	COMPOSITION DES ECHELLES	2.3.1	ELEVATION															
			2.3.2	REPARTITION															
	2.4	CALAGE DE L'ASSISE	2.4.1	ANCRAGE															
PROBLEMATIQUES	CONCEPTS ARCHITECTURAUX		PARAMETRES SENSIBLES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
3 M A T E R I A L I T E	3.1	DECISIONS STRUCTURELLES	3.1.1	FILIERES															
			3.1.2	STABILITE															
	3.2	SELECTION DES MATERIAUX	3.2.1	INERTIE															
			3.2.2	ISOLATION															
			3.2.3	POROSITE															
			3.2.4	FINITION															
	3.3	ORGANISATION DES TRANSPARENCES	3.3.1	TPOLOGIE															
			3.3.2	REPARTITION															
			3.3.3	PROPORTION															
	3.4	DETERMINATION DES PROTECTIONS	3.4.1	NATURE															
3.4.2			POSITION																
3.4.3			MOBILITE																
PROBLEMATIQUES	CONCEPTS ARCHITECTURAUX		PARAMETRES SENSIBLES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
4 S P A T I A L I T E	4.1	DISTRIBUTION DES FONCTIONS	4.1.1	SITUATION															
			4.1.2	ECLAIREMENT															
	4.2	PARTITION DES ZONES	4.2.1	FONCTIONNALITE															
			4.2.2	HOMOGENEITE															
			4.2.3	MAINTENABILITE															
	4.3	QUALIFICATION DES SEUILS	4.3.1	EPAISSEUR															
			4.3.2	TRAITEMENT															
	4.4	REGULATION DES AMBIANCES	4.4.1	THERMIQUE															
			4.4.2	AERAULIQUE															
			4.4.3	HYDRAULIQUE															
			4.4.4	LUMINEUSE															
			4.4.5	SONORE															
			4.4.6	OLFACTIVE															
4.5	INTEGRATION DES USAGES	4.5.1	OCCUPATION																
		4.5.2	INFORMATISATION																
		4.5.3	EQUIPEMENT																

Figure 47. Grille d'analyse thématique par ADDENDA.

5.2. Reconstitution du processus

Nous avons procédé à une *reconstitution* méthodologique du processus de conception en étudiant avec soin chacune des phases et en analysant chaque thème de l'arborescence thématique. Cette analyse sous forme d'arborescence qui rappelle l'étude de la « structure arborée de résolution d'un problème » d'Alexander faite par Conan [Conan, 1990] (Fig.9), constitue le début de notre travail de recherche.

5.2.1. Les phases de conception

La démarche d'analyse du processus de conception proposée par Adolphe, Castells et Fernandez et puis reprise postérieurement par Boutté, permet d'anticiper les différentes problématiques liées à la conception d'un projet. Suite aux travaux de Prost [Prost, 1992] qui proposent d'inclure *l'énoncé du problème* dans le processus de conception, nous avons intégré la phase d'analyse du *programme* et d'analyse de la *réglementation* à l'ensemble de la démarche de façon à introduire la question de *l'urbanité* d'un point de vue réglementaire, ainsi que la phase *systèmes* esquissée par Luc Adolphe et proposée formellement par Boutté.

A partir de ces modèles et de l'expérience de travail avec les architectes qui ont encadré cette recherche, nous avons étudié le processus de conception d'un projet en identifiant 7 phases de conception: Analyse du programme, Etude de la réglementation, Implantation, Morphologie, Matérialité, Spatialité et Systèmes (Fig.48).

Chacune de ces phases correspond ainsi à l'évolution d'un projet sous la vision des concepteurs - architectes, dès le stade initial d'étude du programme jusqu'à la définition des systèmes et le dessin des détails constructifs.

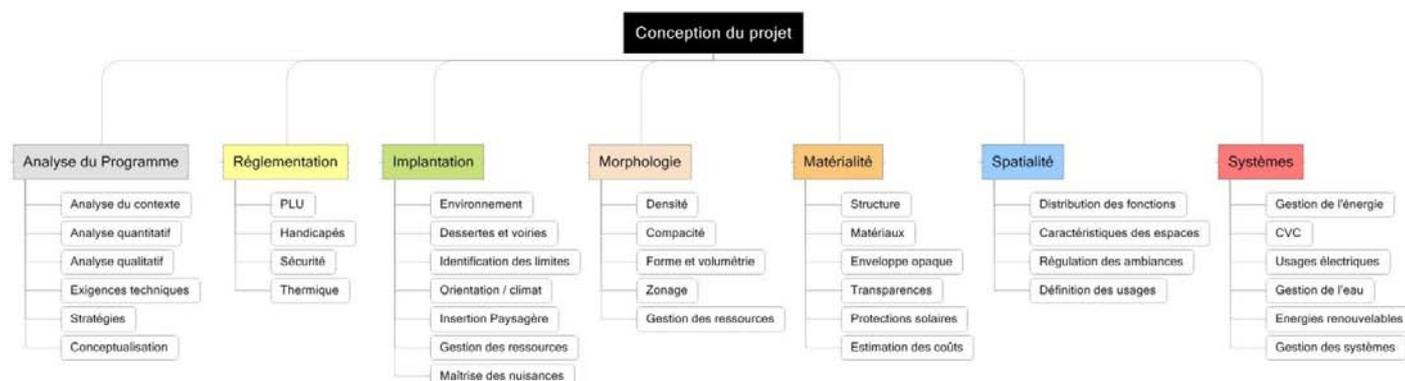


Figure 48. Phases de conception du projet.

L'objectif était d'identifier l'ensemble des problématiques auxquelles le concepteur serait confronté pour chacune des phases tout au long du processus : on définit ainsi les *critères de conception*. Ces critères sont détaillés par thèmes (en gris foncé et gris clair) et sont souvent liés entre eux de manière transversale. Dans l'exemple présenté (Fig.48a), qui correspond à la phase *Implantation*, plusieurs thématiques sont communes. Le *vent* est un sujet de réflexion commun aux conditions *climatiques* et *d'orientation*, à l'insertion paysagère de masses végétales (qui peuvent modifier son cours) et aux énergies renouvelables comme l'énergie éolienne.

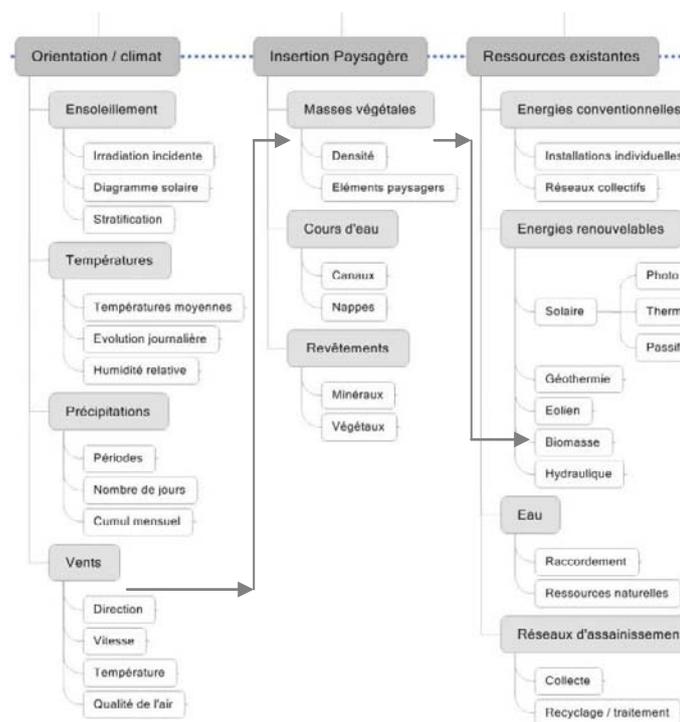


Figure 49a. Phases de conception du projet.

Une fois identifiées les thématiques générales, nous avons procédé à l'identification des différents *choix de projet* au bout de la chaîne. Chacun de ces choix correspond à une donnée ou un thème, qui aboutira à une prise de décision le concepteur tout au long de sa démarche, par ex : la vitesse des vents, le nombre de jours de pluie, la nécessité de l'existence de voies de circulation, la perméabilité du sol, etc.

Nous verrons par la suite que cette question de l'enveloppe est essentielle pour nos travaux de recherche, et elle fera l'objet d'une réflexion plus approfondie dans le chapitre 6, qui concerne un modèle d'intégration des aspects énergétiques et environnementaux à la conception d'un projet dans une échelle urbaine plus large.

5.1.2.1. Analyse du programme

Il est nécessaire de faire une distinction entre la *formulation* du programme comme énoncé, et son *interprétation*. Nous avons étudié dans quelle mesure la formulation du problème et la formulation de la solution à lieu à partir de mécanismes communs. Il faut rappeler que l'énoncé du problème définirait les *critères* de la solution [Conan, 1990] et des éléments de réponse pour la recherche de la solution [Prost, 1992]. L'analyse du programme et son interprétation sont à la fois complémentaires et constituent la base dans la définition du projet final. Ceci semble une évidence, mais expliquerait le fait que le concepteur ait parfois très peu de marge de manœuvre dans la formulation d'un projet innovant.

Mais nous devons également comprendre qu'il existe une phase antérieure à la phase *d'analyse du programme* et que nous n'étudions pas dans le cadre de cette recherche : il s'agit de la phase de *définition* du programme. Cette phase qu'on appelle phase de *programmation* est chargée de complexité. Bien que nous ne l'ayons pas inclus dans le processus de conception, elle déterminera le projet final. Nous allons simplement évoquer la réflexion de Simon à propos de la *définition* du problème [Simon, 1973] et selon lequel un problème pourrait être « mal défini » ou « bien défini » et ceci aurait comme conséquence soit une solution unique et adaptée, soit de l'ambiguïté qui entraînerait une diversité de solutions mal adaptées au problème.

L'analyse du programme correspond à la première phase de conception (Fig.49). Elle se divise principalement en trois parties, la première concerne des considérations générales sur le contexte du projet, la deuxième des exigences en termes quantitatifs et qualitatifs sur des aspects techniques et de confort et la troisième, la conceptualisation des stratégies à adopter pour répondre à la demande du programme. Ces stratégies constituent les premières esquisses théoriques dans la conception du projet.

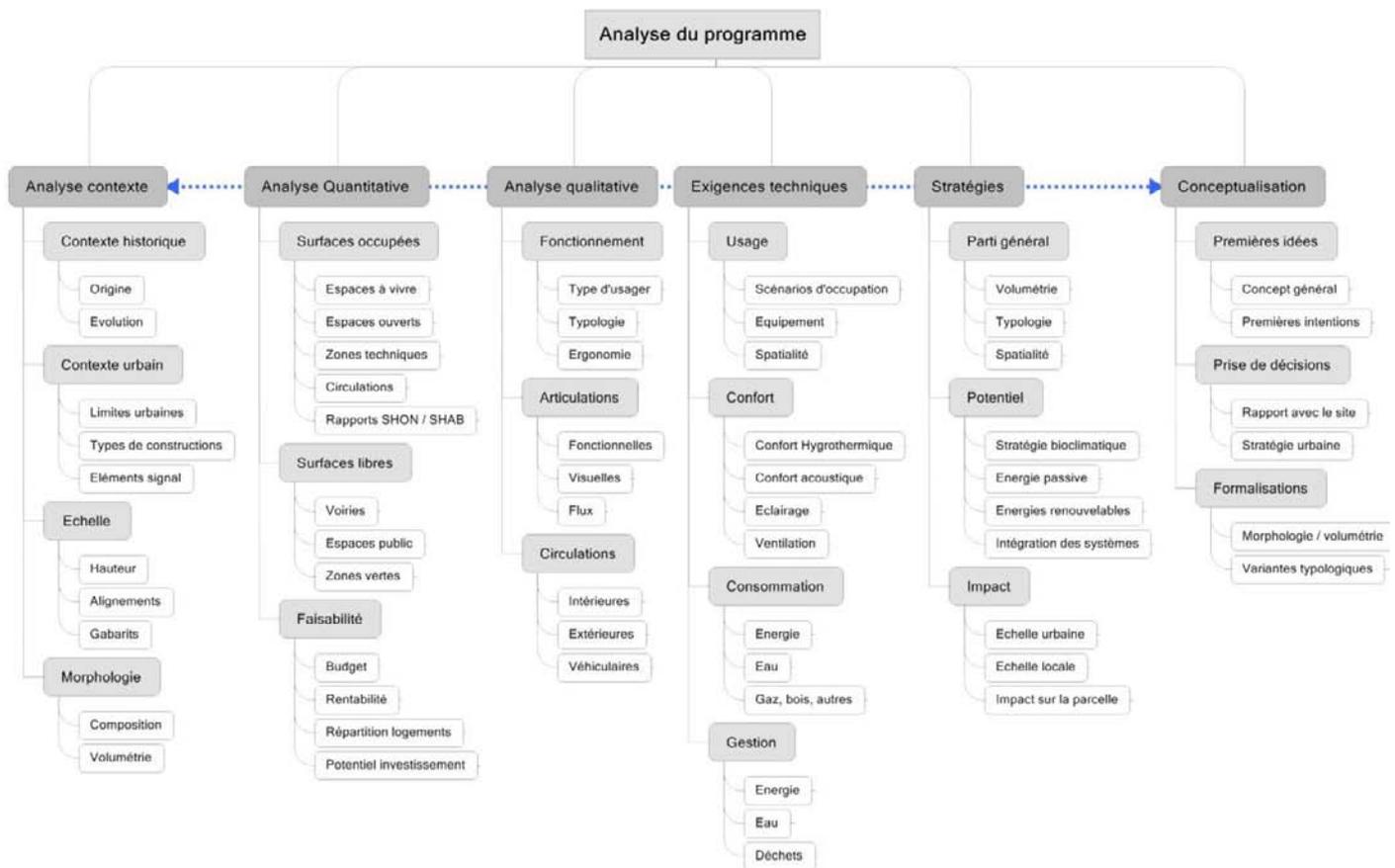


Figure 50. Phase *Analyse du programme*.

Dans ce sens, l'analyse du *contexte* général correspondrait à la *définition* du problème. Les analyses quantitatives correspondraient à la *formulation du problème* et la formulation des *stratégies* ainsi que la *conceptualisation* feraient partie de la *formulation de la solution*.

5.1.2.2. Analyse de la réglementation

L'étude de la réglementation (Fig.50) correspond également aux phases de *définition* et de *formulation* du problème. Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ainsi que les réglementations handicapés, sécurité et thermique, constituent les « règles de base » du projet qui font partie intégrante de l'énoncé ou de la *définition* du problème. L'analyse de la réglementation détermine dans quelle mesure ces règles ouvrent la voie à la formulation d'une solution en concordance avec les objectifs du programme. Parfois le concepteur sera contraint à des règles d'urbanisme qui ne permettent pas de répondre aux objectifs de performance énergétique demandés, comme par ex. des questions relatives à l'occupation, à l'emprise au sol, à la hauteur des bâtiments ou à l'alignement des façades.

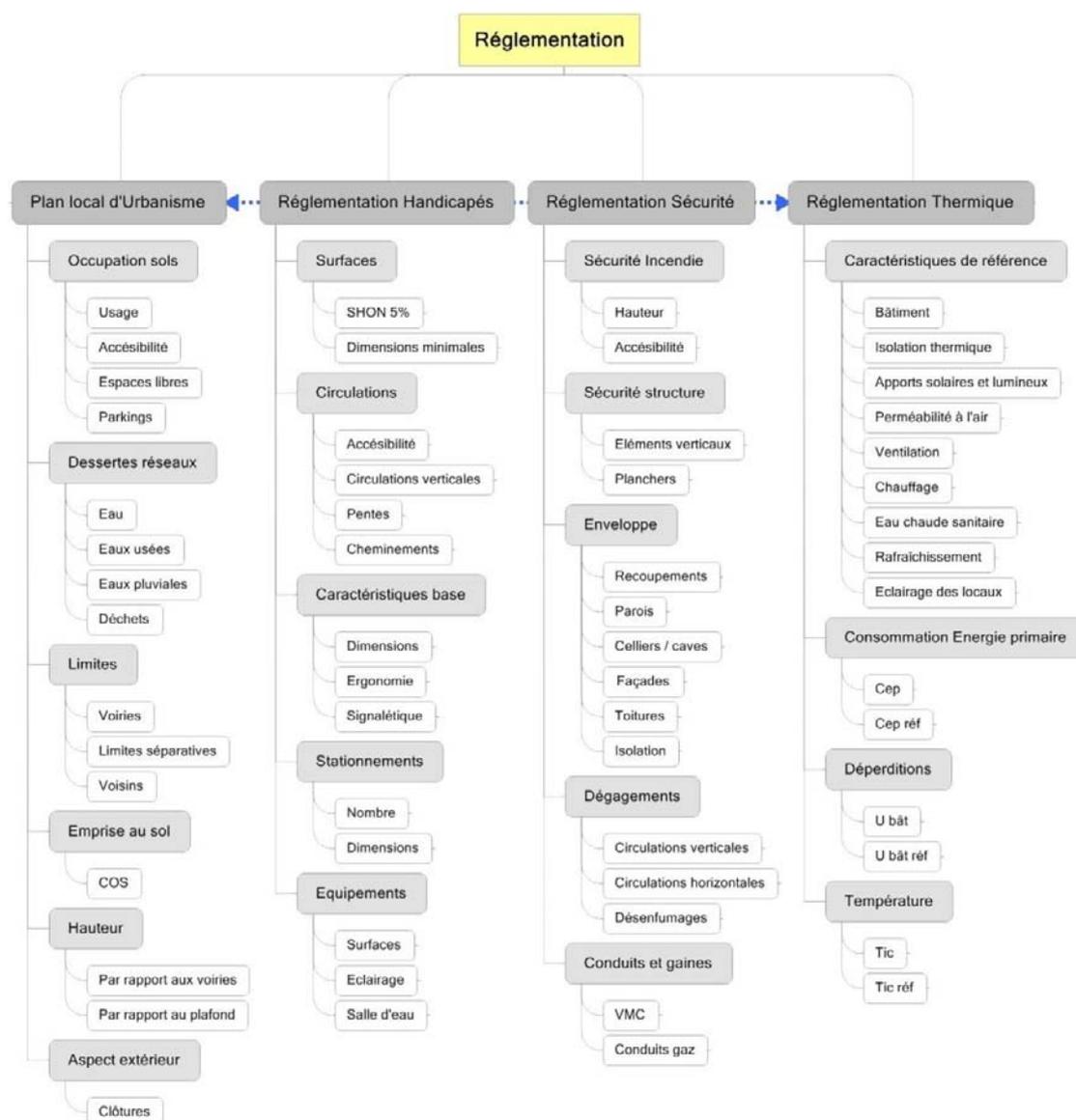


Figure 51. Phase Etude de la réglementation.

5.1.2.3. Implantation

La phase *d'implantation* (Fig.51) est une phase de grande complexité. Tout d'abord elle correspond au début de la *formulation* de la solution : cette phase a lieu une fois que l'ensemble de l'énoncé est assimilé par le concepteur, soit à travers la connaissance des objectifs généraux, des conditions du contexte et des exigences programmatiques.

En outre, elle constitue la synthèse entre les premières représentations mentales du projet et ses premières représentations réelles. Nous pouvons ainsi mieux comprendre la référence évoquée dans le premier chapitre, entre *l'idée* et sa représentation en tant qu'*objet*. [Arnauld, 1622].

De plus, *l'implantation* en tant que mécanisme de *représentation* d'une idée, permet de construire le mécanisme de *validation* du problème. A partir d'une première esquisse l'architecte sera capable de vérifier la pertinence de la solution en la soumettant à son contexte. A partir de ce moment, il commencera une démarche d'essai-erreur pour la validation de chaque solution. C'est l'origine du processus itératif de conception.

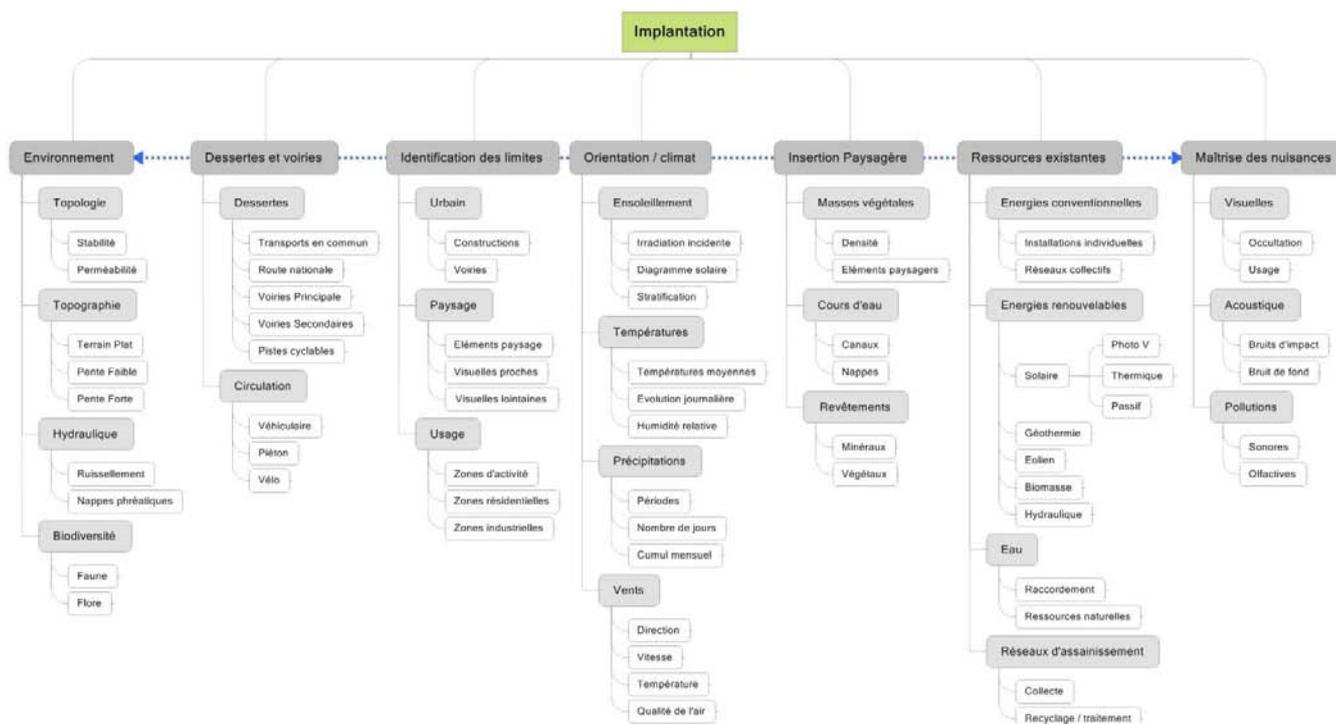


Figure 52. Phase *Implantation*.

5.1.2.4. Morphologie

La définition de la *Morphologie* (Fig.52), notion centrale de la problématique d'optimisation de la performance énergétique, correspond à un stade avancé dans la *formulation* d'une *solution*, ayant pour particularité de constituer les premières formes de représentation spatiales du projet. En effet la *forme*, au-delà de *l'implantation*, va suggérer la définition de la limite entre l'intérieur et l'extérieur. C'est à travers la forme et la volumétrie, que les bâtiments s'adaptent au contexte et impactent l'environnement.

Dans un premier temps, le traitement de la morphologie suppose une réflexion sur la surface habitable requise, la spatialité du volume et ses conditions de confort. C'est la raison pour laquelle les premières réflexions concernent *l'emprise du bâtiment* en termes d'occupation et de surface construite, ainsi que le positionnement autour du concept de *compacité*. Nous avons étudié précédemment dans quelle mesure ce *coefficient de forme* avait été introduit par la RT 74. Cependant, l'introduction du mode de calcul des déperditions de référence dans la RT 88, qui repose sur l'association des surfaces unitaires de paroi avec les coefficients K globaux, a libéré l'architecture de la contrainte de la forme. Donc plus les niveaux d'isolation sont poussés, plus l'architecte peut jouer librement avec l'enveloppe.

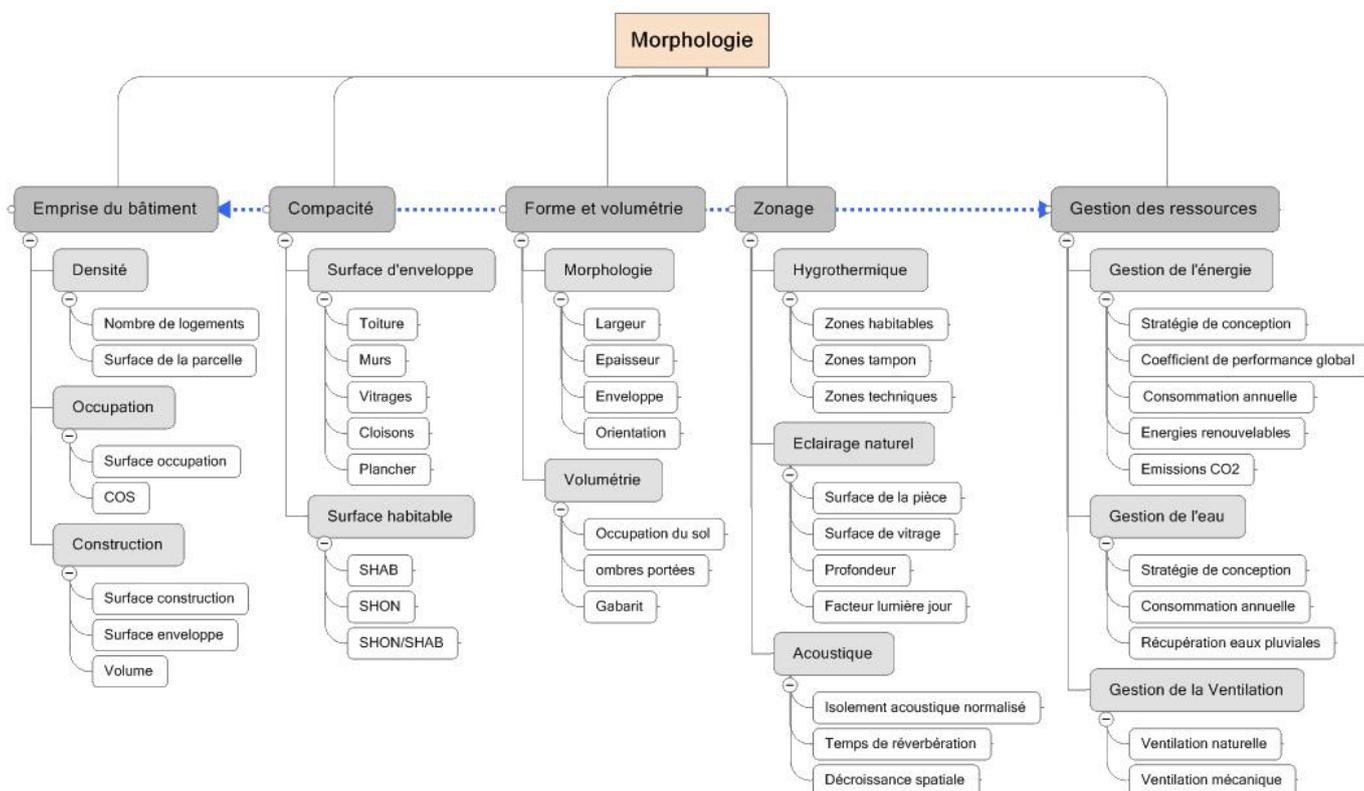


Figure 53. Phase Morphologie.

5.1.2.5. Matérialité

La définition de la *matérialité* (Fig.53) du projet correspond à un stade avancé dans la formulation de la solution. Cette phase détermine les conditions constructives générales du bâtiment se répercutant directement sur la structure, les caractéristiques des matériaux, le type de parois et les protections solaires.

L'ensemble de ces informations constitue une base d'entrée dans la construction de l'outil méthodologique qui permettrait de paramétrer les caractéristiques de l'enveloppe, dans l'objectif d'adopter des stratégies de conception adaptées à un environnement précis.

La réflexion sur la *matérialité* permet d'adapter la volumétrie à des conditions d'isolation requis, mais elle est contrainte à la problématique des coûts. Des produits plus performants sont plus onéreux, et se traduisent souvent en une difficulté pour atteindre les objectifs en termes de performance énergétique. Cette question est essentielle dans la formulation d'une méthodologie de conception. L'architecte conçoit également avec des conditions budgétaires qui constituent une contrainte supplémentaire et négliger ce paramètre serait utopique. Or, nous savons qu'une démarche de développement durable doit aller au-delà des coûts de construction et doit adopter une stratégie d'économie de coût global en réduisant les coûts d'exploitation du bâtiment.

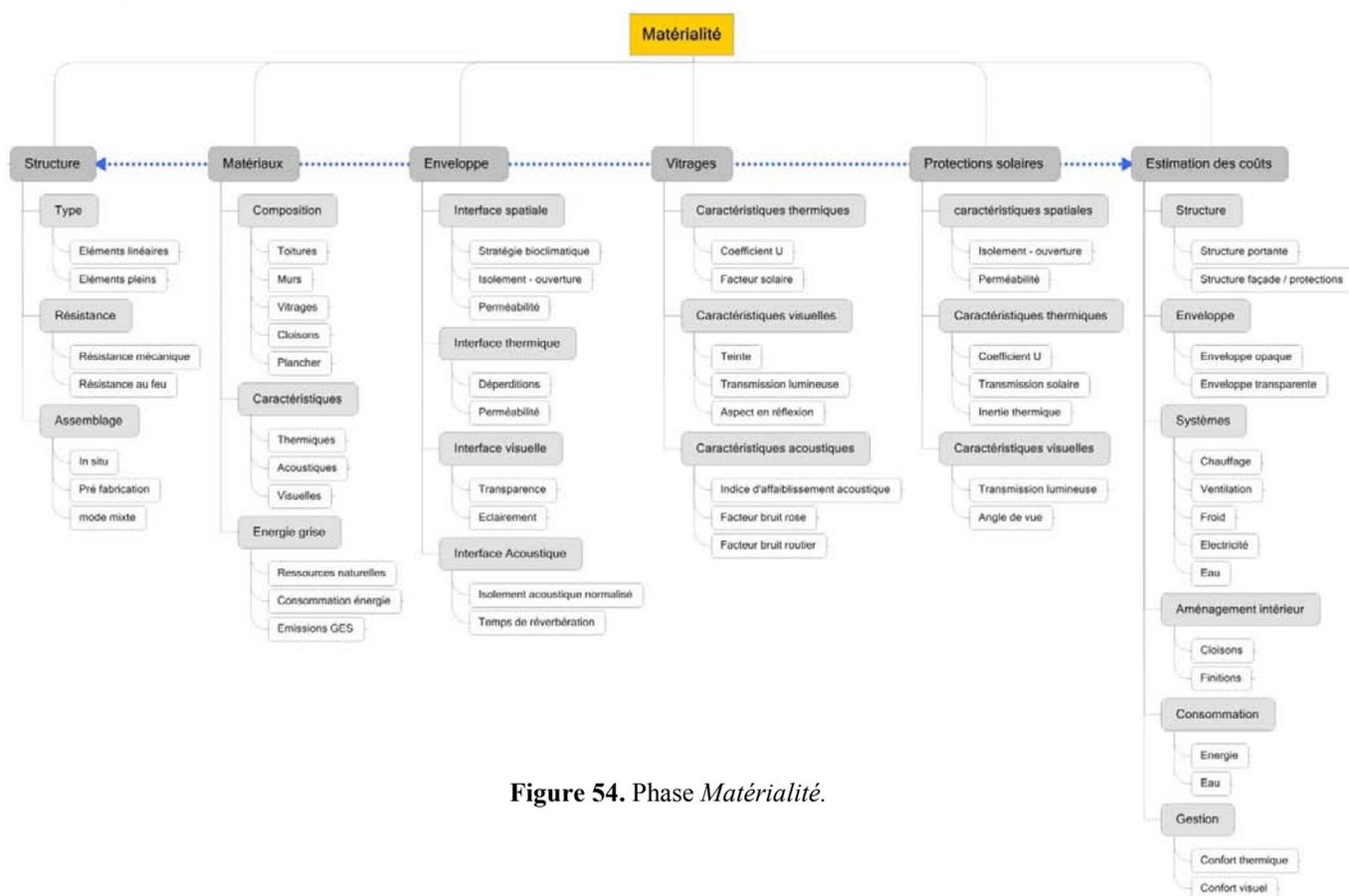


Figure 54. Phase *Matérialité*.

5.1.2.6. Spatialité

La notion de *spatialité* (Fig.54) correspond à la définition des ambiances du projet. Elle prend en compte les caractéristiques du projet liées à la distribution des espaces, à leur dimensionnement, à la régulation des ambiances et aux aspects techniques liés à l'usage du bâtiment.

De la même façon sont pris en compte l'ensemble des aspects liés au confort. Mais la régulation des ambiances *thermique* ou *acoustique* étant déjà traités dans la phase *Matérialité*, c'est la notion d'ambiance *visuelle* qui va influencer le plus fortement la performance énergétique du bâtiment. Dans l'objectif de réduire au minimum la consommation d'électricité liée à l'éclairage, c'est la notion *d'autonomie* en éclairage naturel qui est intégrée.

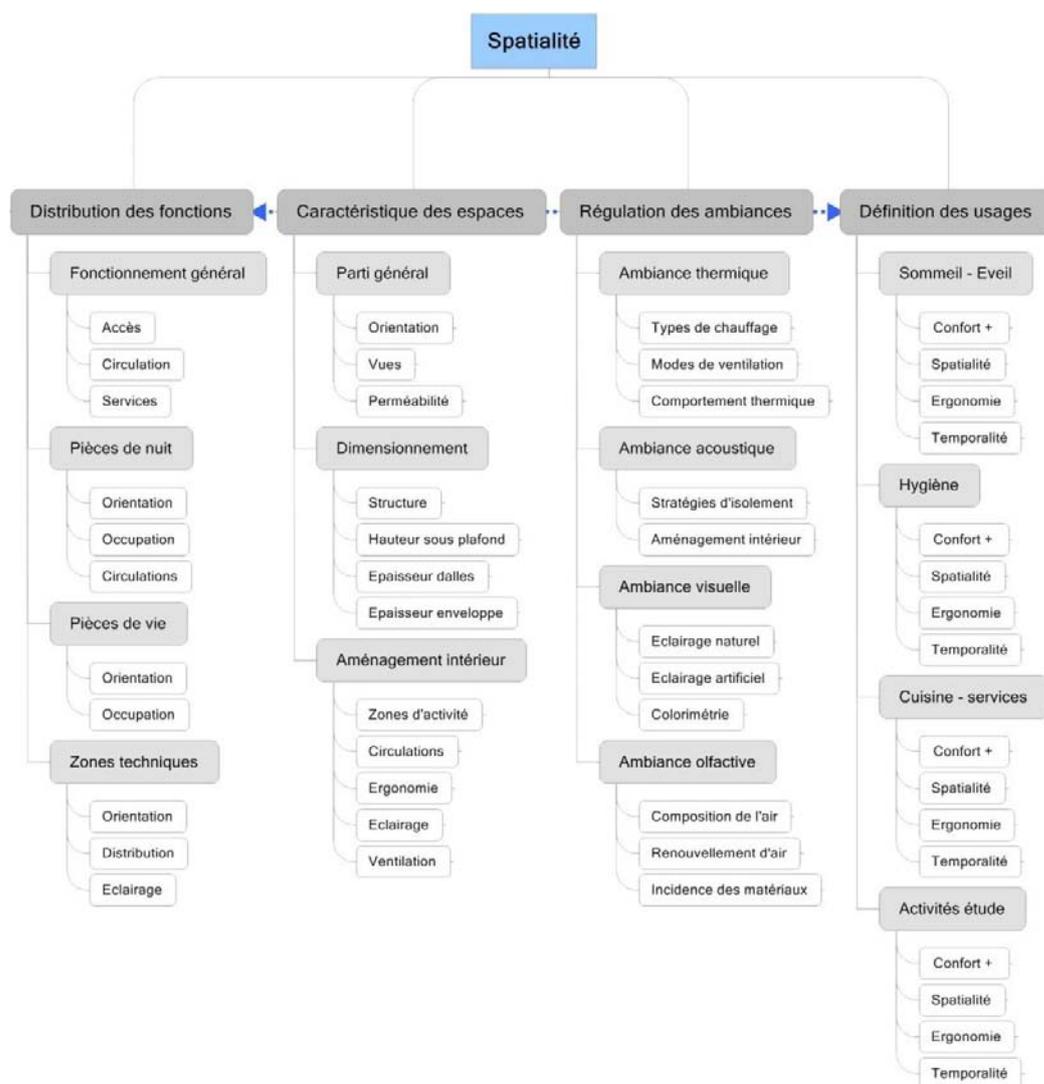


Figure 54. Phase *Spatialité*.

5.1.2.7. Systèmes

La définition des systèmes (Fig.55) est traditionnellement une des dernières phases dans le processus de conception. Cependant, c'est dans cette phase que sont définis les systèmes de CVC, de refroidissement et d'éclairage. Ces installations ont pour objectif de garantir les conditions de confort de l'utilisateur, et de répondre aux exigences techniques formulées par le maître d'ouvrage.

Les avancées technologiques dans le domaine du bâtiment ont permis l'optimisation du rendement des systèmes, ainsi que la diminution de leur consommation énergétique.

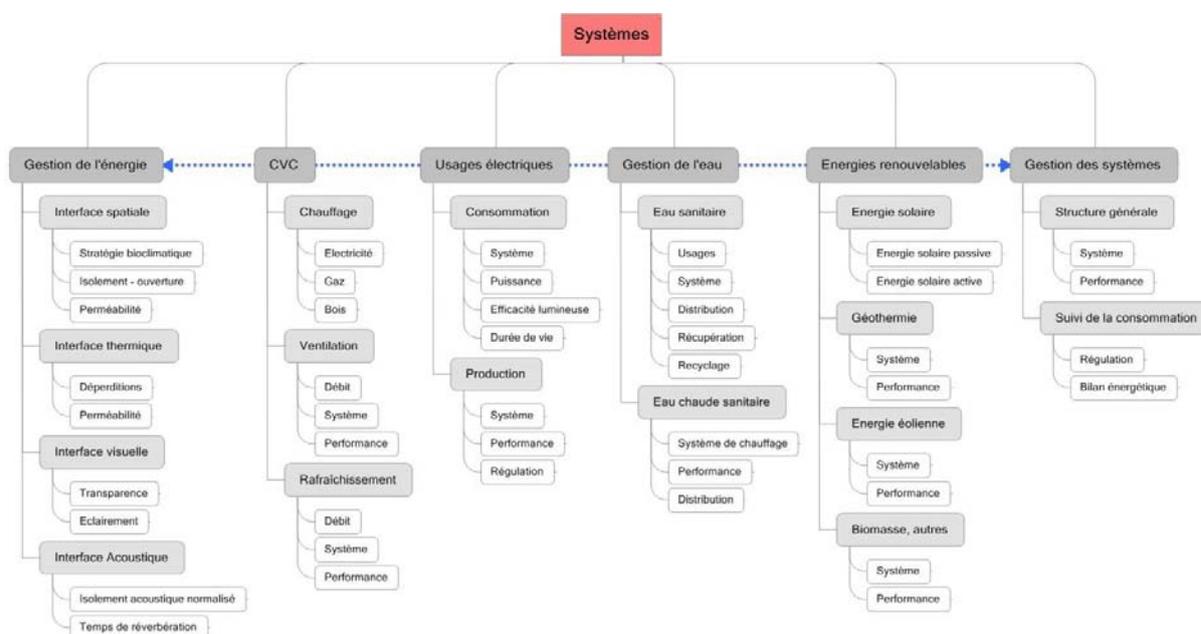


Figure 55. Phase Systèmes.

5.3. Etude de la composante énergétique

Lors de l'identification des choix de conception, l'objectif était d'établir des liens entre ces derniers et les aspects énergétiques (Fig.56). En d'autres termes, l'idée était d'analyser dans quelle mesure le choix décisionnel sur chaque thème pouvait impacter la performance énergétique globale du projet.

Cet impact a été évalué dans un premier temps de manière *intuitive*, étant donné que nous avons recensé 378 choix de projet et que le travail de *mesure* de la performance énergétique en fonction de chacun de ces choix aurait été un travail trop étendu et ambitieux. Cependant, certains de ces choix ont été étudiés individuellement, - bien qu'ils forment partie d'une structure plus large dans le processus de conception - à partir de plusieurs simulations et de mesures de la performance énergétique.

D'après les premiers résultats, l'impact des décisions du projet sur la consommation énergétique peut varier sensiblement. L'impact négligeable correspond à une variation de moins de 5%, impact moyen de 5 à 10%, Impact important de 10 à 20%, et l'impact très important est supérieur à 20%. Cette analyse nous a permis de définir une « échelle graphique » qui montre l'impact sur la performance énergétique:

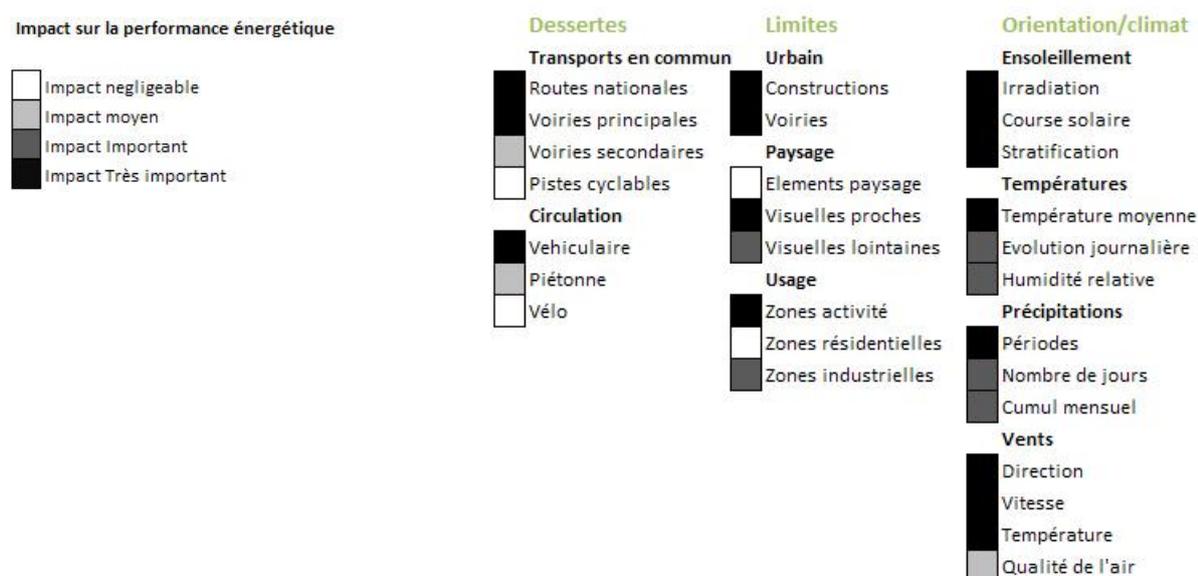


Figure 56. Etude du lien entre choix de conception et aspects énergétiques.

5.3.1. Phases de conception et performance énergétique

5.3.1.1. Le programme et la composante énergétique

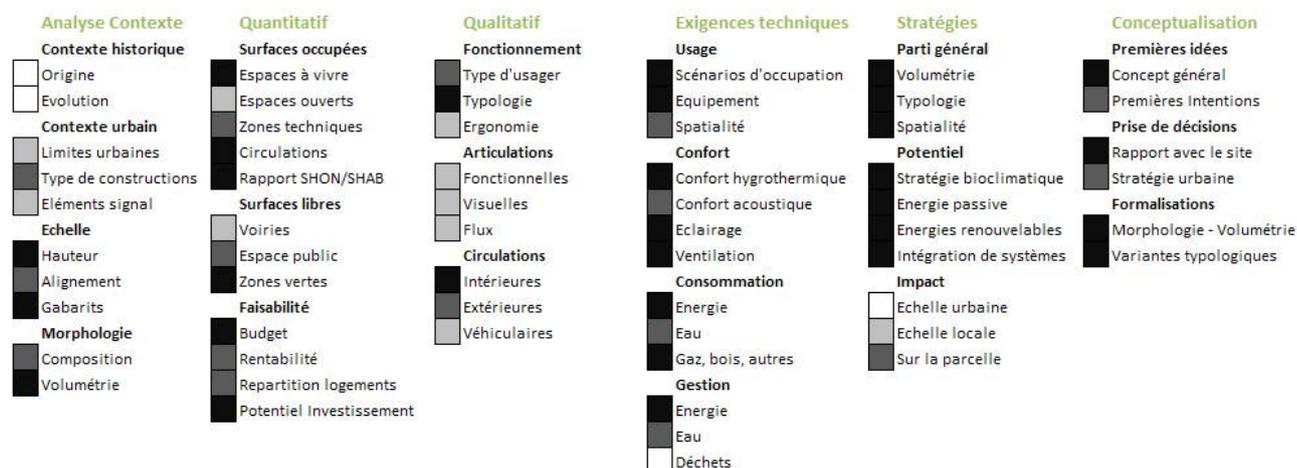


Figure 57. Etude de la composante énergétique dans la phase *Analyse du programme*.

Une fois définies les composantes de la phase d'analyse du programme, nous pouvons identifier les relations avec la composante énergétique (Fig.57). Les aspects qui impactent le plus la *performance* sont ceux liés aux questions contextuelles d'*échelle* ou de *morphologie* dans un contexte urbain, aux *exigences techniques* de gestion de l'énergie et du confort et aux stratégies. De même, c'est à partir des stratégies initiales qui concernent le parti général d'implantation et les partis volumétriques que se définit la notion de compacité. Cette notion va impacter fondamentalement le comportement énergétique du bâtiment.

En termes généraux, la phase *d'analyse du programme* permet de mettre en concordance les exigences techniques du programme avec une stratégie globale. Dans le cadre de la composante énergétique, cette question est fondamentale essentiellement par deux aspects : d'abord, car c'est à partir de la compréhension du contexte que la formulation du projet trouve sa pertinence et, ensuite, car la formulation de la solution passe par l'évaluation du *potentiel* du contexte. En d'autres termes, c'est à partir de la compréhension de la capacité du projet à exploiter le potentiel de son environnement, qu'il est possible de formuler des stratégies adaptées au site, au programme et aux exigences techniques. Nous verrons dans le chapitre 6 dans quelle mesure ce constat trouvera son sens dans la formulation d'un projet énergétiquement performant.

5.3.1.2. Aspects énergétiques de la réglementation

Les aspects les plus importants à prendre en compte dans la conception énergétique du bâtiment dans la phase d'analyse de la réglementation (Fig.58), sont ceux qui concernent l'occupation du sol et les exigences de la réglementation thermique. Bien évidemment, ces thématiques sont au cœur de la réflexion sur l'optimisation de la performance, mais il est intéressant d'évaluer le poids de certaines réglementations en matière d'enjeux environnementaux.

Il est à noter l'importance de l'enveloppe en ce qui concerne la réglementation sécurité. Ces considérations vont impacter directement les phases ultérieures de conception.

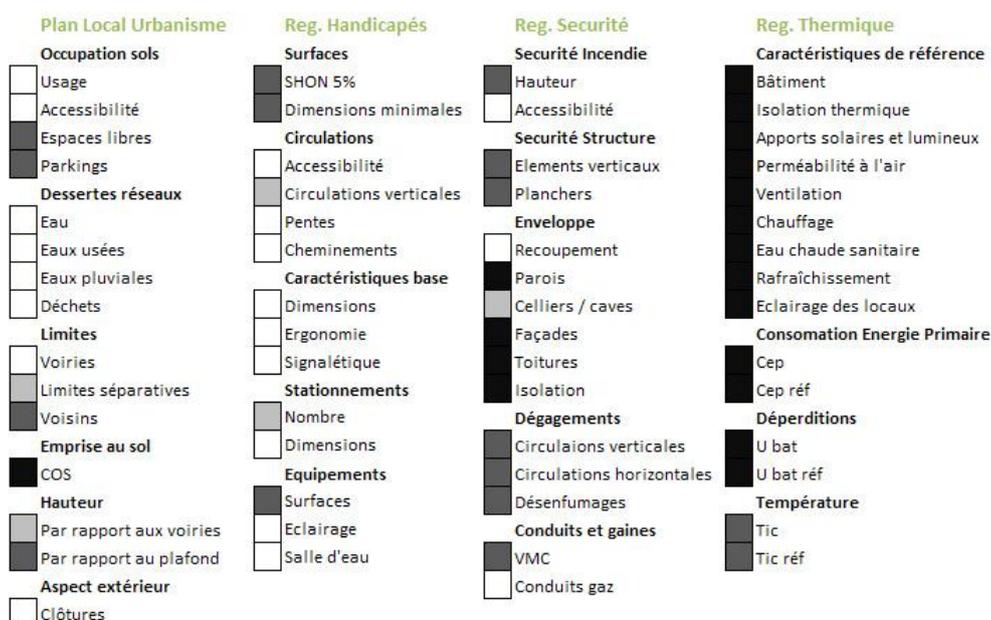


Figure 58. Impact de la composante énergétique dans la phase *Etude de la réglementation*.

5.3.1.3. Implantation

Cette phase (Fig.59) est primordiale dans la conception d'un bâtiment performant. La plupart des décisions prises à ce stade, vont impacter directement la performance globale et le comportement énergétique du produit final. Les aspects les plus importants concernent l'étude des limites, l'orientation et le climat, ainsi que l'utilisation des ressources naturelles existantes.

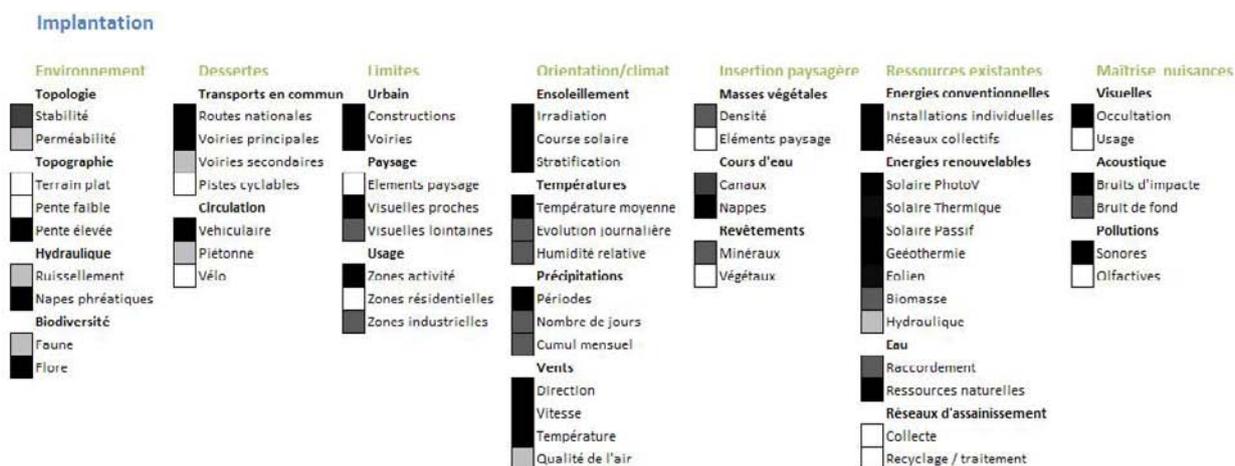


Figure 59. Impact de la composante énergétique dans la phase *Implantation*.

Mais il est fondamental de développer la notion d'implantation, pour faire une approche transversale dans la conception de bâtiments à haute performance énergétique.

D'une part, les conditions climatiques vont déterminer les caractéristiques de l'environnement extérieur et les conditions limites en termes d'ensoleillement, pluviosité, hygrométrie et température. Des considérations générales comme l'orientation, permettront à l'architecte d'établir une stratégie climatique en fonction de la course d'ensoleillement, les ombrages, le temps d'exposition à l'irradiation ainsi qu'à la vitesse et la direction des vents. Ces caractéristiques seront déterminantes de la performance énergétique finale.

D'autre part, les ressources disponibles vont conditionner l'efficacité énergétique du modèle qui s'insère dans cet environnement. Du point de vue du potentiel passif du bâtiment, les conditions d'exploitation de l'énergie solaire et éolienne seront stratégiques dans la conception d'un projet performant. C'est ainsi que la réflexion sur l'implantation constituera la première des pistes dans la formulation d'un outil méthodologique de conception développé dans le chapitre 6.

5.3.1.4. La composante morphologique - énergétique

La composante morphologique -énergétique (Fig.60) est fortement influencée par trois aspects : la densité, la compacité et la forme. Les questions de la densité et de la morphologie sont strictement associées quand on parle de bâtiments de logements performants d'un point de vue énergétique, car la conception des logements collectifs est orientée vers une logique de densification des villes et d'optimisation des moyens de déplacement.



Figure 60. Impact de la composante énergétique dans la phase *morphologie*.

La *densité* entraîne la multiplication des formes et des typologies dans la ville dans une logique de croissance et de développement urbain. Mais souvent les réglementations constituent un contre-sens par rapport aux objectifs de performance énergétique fixés par les chartes de développement durable. Dans ce sens, le potentiel énergétique des bâtiments doit être étudié au cas par cas en fonction de l'environnement extérieur et des contraintes réglementaires.

La densité des villes est, d'un point de vue énergétique, une double interrogation. D'une part, la densification permet la diminution des déplacements et la mixité des usages : le partage des usages et des échanges thermiques dans un bâtiment peut être un avantage dans une conception «intelligente» des systèmes. Cependant, la densification rend difficile l'accessibilité à l'ensoleillement et par conséquent ça nuit au confort thermique.

Cette dernière particularité représente une *contrainte* dans le dimensionnement de bâtiments performants, mais une *potentialité* dans une logique architecturale. La diversité du paysage urbain donnerait lieu à différentes architectures, à des formes nouvelles qui iraient chercher la lumière et l'énergie solaire comme les organismes vivants le font dans des conditions peu favorables.

La *compacité* est souvent associée à la densité et à la performance énergétique. Certes le comportement thermique d'un bâtiment est amélioré en concevant un volume compacte et peu déperditif. Mais il faut observer avec attention cette consigne, car la recherche de la compacité ne garantit pas la performance. Le potentiel d'éclairage naturel dans un volume compact est souvent plus réduit que pour un volume fractionné. La compacité n'est pas une qualité absolue, mais ses répercussions doivent être appréhendées dans le processus de conception. La question de la *compacité* doit être abordée d'un point de vue énergétique stratégique. Dans un premier temps, la compacité constitue une stratégie de diminution des déperditions. Mais il faut aborder une stratégie de «peau active» génératrice d'énergie, car c'est finalement une question d'adaptation au milieu extérieur.

Il est important de distinguer la *forme* comme *contrainte* de la forme comme *potentialité*. Le concept de *compacité* est utilisé de façon erronée pour limiter les déperditions par l'enveloppe *per se*, soit réduire au maximum les surfaces d'échange avec l'extérieur. Mais cette réflexion n'est pas associée à l'enveloppe comme surface de *captage* d'énergie. D'un point de vue climatique et énergétique, l'enveloppe jouera le rôle d'interface avec l'environnement immédiat. Cette enveloppe sera capable de s'adapter à son environnement à travers une gestion intelligente des ressources disponibles. Elle peut être déperditive mais elle constitue également une source de production d'énergie.

Les principaux aspects liés à la composante énergétique correspondent à toutes les relations en termes de volume comme les espaces habitables, les surfaces d'enveloppe, le gabarit du bâtiment et du contexte urbain environnant. Par ailleurs, la gestion des ressources va se traduire par l'augmentation de la performance énergétique en termes d'exploitation des potentialités du site. En effet, chaque site possède un potentiel d'exploitation des ressources. De l'analyse de ce potentiel découlera une forme optimale issue directement du contexte. Chaque site possède ainsi un potentiel d'exploitation des ressources qui peut déterminer une *forme* optimale *potentielle*. La *forme* du bâtiment serait donc la résultante des conditions environnementales définies par le milieu urbain.

Ce constat constituera la deuxième piste dans la formulation de notre outil de conception, car l'optimisation morphologique du volume permettrait d'optimiser la performance énergétique du bâtiment.

5.3.1.5. Matérialité

L'approche thermique traditionnelle vise l'optimisation de la performance énergétique à travers de l'amélioration de l'enveloppe ou à travers l'augmentation de l'efficacité des systèmes (chauffage, ventilation, refroidissement, éclairage). De ce point de vue, les principaux aspects liés à la composante énergétique sont ceux relatifs à la composition des parois et aux modes constructifs.

Mais dans une optique de valorisation du potentiel énergétique de chaque site, les caractéristiques des vitrages joueraient un rôle majeur dans la conception d'un projet. En effet, la technique dans la réalisation des baies vitrées a évolué considérablement, améliorant non seulement leur capacité isolante mais leur protection contre le rayonnement solaire direct. De même, les vitrages sont devenus des éléments qui peuvent être couplés à des technologies de production d'énergie.

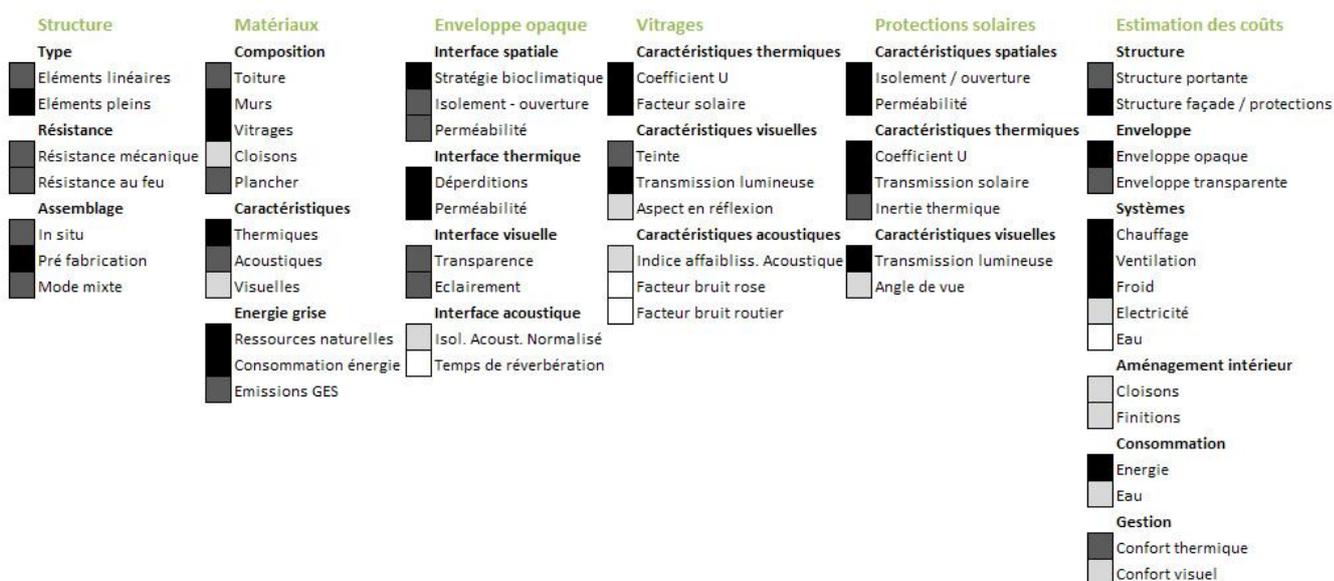


Figure 61. Impact de la composante énergétique dans la phase *Matérialité*.

5.3.1.6. Spatialité

Or, cette question est également essentielle dans la formulation d'un projet performant. L'évolution de l'architecture connaît l'utilisation croissante des parois vitrées compte tenu des avancées technologiques dans cette matière et de la recherche d'ambiances lumineuses autonomes n'ayant pas recours à l'éclairage artificiel. Cependant cette question cause débat car les modes de conception actuels n'ont pas encore résolu la question de la régulation thermique des enveloppes vitrées, avec une faible consommation d'énergie.

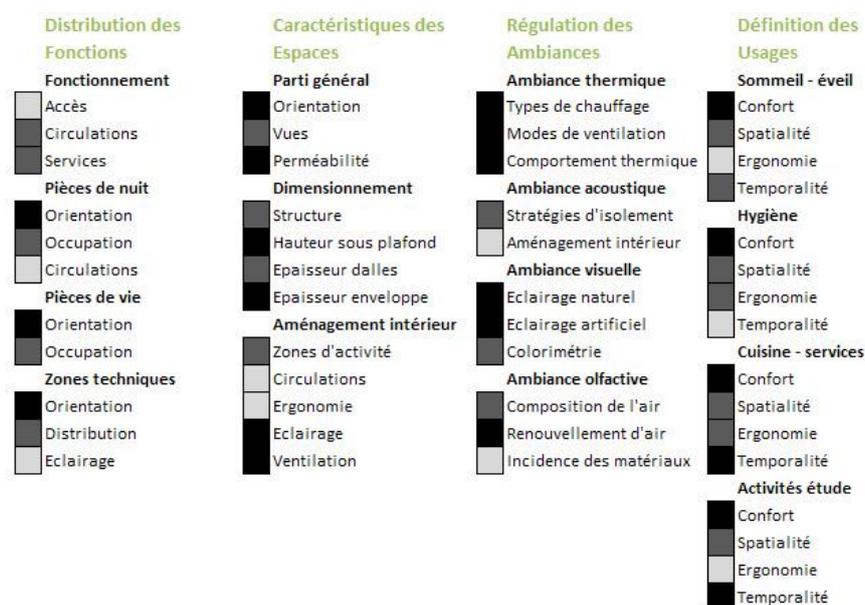


Figure 62. Impact de la composante énergétique dans la phase *Spatialité*.

L'équilibre entre les déperditions d'énergie, la valorisation des apports solaires et la régulation des ambiances lumineuses constitue encore une équation difficile à résoudre. Si les logiciels de simulation thermique ont déjà commencé à intégrer ces calculs, ils n'ont pas résolu la question de leur représentation dans une logique de conception. Les simulations actuelles passeraient plutôt par une logique d'évaluation du projet à travers des mesures.

Les principales questions liées à l'énergie seraient donc en relation avec la caractérisation des espaces en fonction de l'orientation du bâtiment, avec leur dimensionnement, avec leur régulation et finalement à travers la définition des usages.

5.3.1.7. Systèmes énergétiques

L'augmentation des exigences en termes de qualité sanitaire des espaces et de régulation des ambiances (confort olfactif, visuel, etc.), ont rajouté des équipements supplémentaires à la conception traditionnelle des bâtiments de logements.

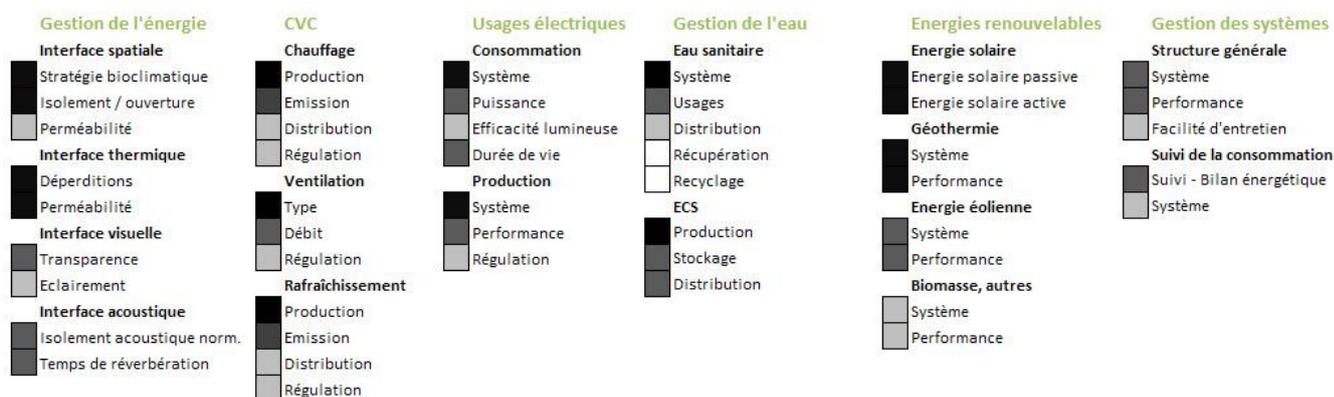


Figure 63. Impact de la composante énergétique dans la phase Systèmes.

Ceci s'est traduit par l'installation d'équipements énergivores, car très souvent le dimensionnement des systèmes est une solution aux défauts préalablement acquis dans les phases initiales du projet comme la définition de l'implantation ou de la morphologie.

L'étude des systèmes doit donc être intégrée parallèlement à la définition de la morphologie et de la spatialité du projet, afin de dimensionner les installations en cohérence avec le parti architectural et la morphologie du bâtiment. Ainsi il semblerait possible d'anticiper les différents problèmes et de définir la stratégie énergétique la plus adaptée au projet.

5.3.2. Phases de conception et performance

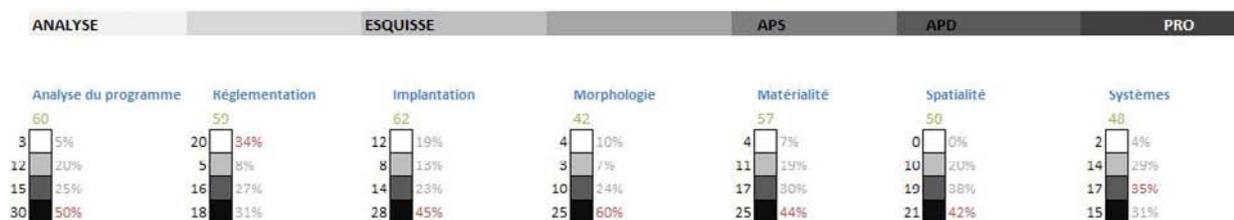


Figure 64. Impact de la composante énergétique dans les différentes phases de conception



Nous avons approfondi dans chacune de ces 7 phases afin d'identifier l'ensemble des critères qui vont impacter le plus le comportement énergétique du bâtiment. 378 critères de conception ont été identifiés et classés dans l'objectif de construire un outil méthodologique d'analyse.

Si on analyse de plus près le comportement thermique d'un bâtiment, on constate que, pour un même surface d'empreinte au sol, la consommation énergétique d'un bâtiment diminue sensiblement en fonction de la hauteur. La diminution de la surface d'enveloppe par rapport à la surface habitable entraîne une augmentation de la performance énergétique pouvant varier de 5 à 30% en fonction de l'orientation et de la nature des vitrages.

La question de la diminution de l'éclairage naturel, est équilibrée également avec l'adaptation de la taille des vitrages aux besoins en éclairage naturel, en fonction de la hauteur de la pièce dans le bâtiment et par rapport aux masques environnants.

Nous sommes convaincus que l'équilibre de la balance peut être avantageux, en valorisant les apports solaires passifs.

Conclusion du chapitre

L'étude minutieuse de la démarche de l'architecte permet de mettre en évidence l'impact de la composante énergétique dans le processus de conception. Les premières conclusions de l'approche méthodologique confirment le rôle primordial de l'énergie dans les phases initiales du processus.

Dans un premier temps ces conclusions montrent l'importance de l'intégration de *l'analyse programmatique* à la phase esquisse : elle permettrait de valider la pertinence des exigences du programme – principalement d'ordre technique - à travers les premières formes de représentation du projet.

Dans un deuxième temps, elles mettent en évidence dans quelle mesure *l'implantation* et la *morphologie* déterminent la capacité des constructions à s'intégrer dans son environnement en utilisant les ressources disponibles pour optimiser leur performance. Ceci justifie la formulation d'outils de conception capables d'évaluer en temps réel la performance énergétique du bâtiment en fonction du territoire, de l'orientation du bâtiment, du climat, des ressources renouvelables existantes et de la stratégie proposée par le projet.

Finalement, elles suggèrent une double relation entre la *forme* et *l'énergie* : d'une part *l'optimisation morphologique* du bâtiment permettrait d'utiliser au mieux les ressources disponibles dans un environnement. En sens inverse, les ressources existantes détermineraient le *potentiel* énergétique d'un bâtiment, dessinant sa forme « idyllique » en fonction du contexte.

A partir de ces trois aspects issus de l'analyse méthodologique, nous avons développé dans le dernier chapitre un outil qui permettrait aux architectes d'intégrer la composante énergétique dès les phases initiales du processus de conception. Cet outil incorporerait les données de base du programme, apporterait des informations sur le comportement thermique du bâtiment, et formulerait une approche à la configuration morphologique du bâtiment dans une logique d'optimisation de la performance énergétique.

Chapitre 6. Modèle d'optimisation de la performance énergétique

« L'architecture peut être comprise comme une organisation matérielle qui régule et organise les flux énergétiques ; ainsi qu'à la fois et de façon indissociable, comme une organisation énergétique qui stabilise et maintient les formes matérielles. »

Luis Fernandez Galiano (1991)

La définition de Galiano montre dans quelle mesure l'architecture constitue une organisation complexe, à la fois matérielle et énergétique. [Galiano, 1991]. Matière et énergie forment un tout dans un système en *déséquilibre* : ainsi les bâtiments en tant qu'entités énergétiques, structurent des interfaces capables de réguler les ambiances, de moduler les espaces, et de gérer les flux d'énergie avec l'environnement extérieur.

Dans le cadre de la consultation du PUCA, l'objectif de l'appel à idées CQHE était de concevoir des *prototypes* énergétiquement performants à partir d'un concept ou d'une technologie innovante : des « concept buildings » qui pouvaient s'adapter à plusieurs contextes pour être reproduits comme des « modèles ». Or, nous avons montré dans quelle mesure la formulation d'un projet performant doit passer par l'exploitation des ressources disponibles dans son environnement. D'où l'intérêt de la formulation d'une construction *méthodologique* et non pas de la d'un « produit » unique.

A partir de ces conclusions, nous nous sommes intéressés à développer un outil destiné aux architectes, qui permette de concevoir un projet énergétiquement *optimal* en fonction de son environnement. Cet outil a été développé à l'agence NFA Architectes pour répondre à la consultation CQHE, mais l'ensemble de la démarche a fait l'objet de notre travail de recherche dans le cadre du CIFRE, dans l'objectif de contribuer à la réflexion sur la problématique de l'efficacité énergétique en architecture.

Ce chapitre portera dans un premier temps sur le cheminement de construction de l'outil. Dans un deuxième temps nous présenterons son fonctionnement et dans une troisième partie nous monterons les résultats de son application et son évolution.

6.1. Démarche de construction de l'outil

Comment développer un projet exemplaire d'un point de vue énergétique, sans imposer aucune forme architecturale, ni aucune technologie au concepteur ? Nous avons étudié dans quelle mesure un projet énergétiquement *optimal* doit s'appuyer sur l'utilisation des ressources disponibles dans son environnement. Nous nous sommes donc interrogés dans un premier temps à propos de l'exploitation de la première source d'énergie inépuisable et disponible dans tous les hémisphères : l'énergie solaire.

6.1.1. Le potentiel énergétique

Nous pouvons définir le comportement thermique - énergétique d'un bâtiment à partir d'un bilan de gains et de pertes d'énergie. Il est avéré que le soleil constitue une source suffisante pour répondre aux besoins énergétiques d'un bâtiment que ce soit sous forme de chaleur ou d'électricité. L'enjeu des nouvelles architectures se situe dans le contrôle, l'exploitation, et la gestion des énergies renouvelables, la principale étant l'énergie solaire. En d'autres termes d'un point de vue technique nous pouvons considérer que l'évolution énergétique des bâtiments se situerait dans *l'enveloppe*. Celle-ci constitue une *interface* entre l'intérieur et l'extérieur, capable de se protéger des intempéries, de réguler les ambiances et d'intégrer des technologies pour produire de l'énergie. D'un point de vue architectural elle définit la *morphologie* et la *spatialité* du projet. C'est donc à travers cette interface que le projet interagit avec son environnement : c'est la peau de cet organisme vivant en tant qu'entité énergétique.

La démarche de construction de l'outil méthodologique s'est donc basée sur la construction de l'enveloppe en tenant compte de *l'implantation* et la *morphologie du bâtiment*. Les premières réflexions ont porté sur les modes d'optimisation de *l'irradiation* solaire captée à travers l'enveloppe. De ce point de vue, nous avons étudié les taux d'irradiation solaire en fonction de l'orientation d'une surface, l'incidence du rayonnement solaire sur différentes morphologies et leur performance énergétique dans un environnement urbain.

L'objectif premier de l'outil était d'évaluer le potentiel passif des bâtiments à travers une approche morphologique, afin d'optimiser la performance énergétique. Existe-t-il une forme idéale pour un bâtiment performant ? Existents-ils des stratégies d'implantation qui puissent conditionner l'efficacité énergétique d'un projet ?

6.1.2.1. Etude de l'irradiation solaire

Les premières analyses ont porté l'évaluation du potentiel de l'énergie solaire, dont nous savons que son rayonnement est composé d'ondes électromagnétiques : l'exposition d'un corps à ce rayonnement est définie comme *l'irradiation solaire*. La quantité d'énergie solaire reçue par la terre serait de l'ordre de 92000 Gtep et selon des estimations de l'IAE¹¹² la consommation énergétique mondiale serait d'environ 8 Gtep¹¹³ soit 11500 fois moins. La puissance reçue par une unité de surface perpendiculaire au rayonnement est estimée en moyenne à 1,3 kW/m², en fonction de sa localisation. Nous appellerons cette quantité d'énergie le *potentiel climatique*.

Pour évaluer ce *potentiel climatique* nous avons utilisé des bases de données météo existantes, afin de déterminer la quantité d'énergie reçue par un corps en fonction des périodes de l'année. A partir de données d'irradiation horaire, mensuelle et annuelle¹¹⁴, nous avons constitué une base avec des taux moyens d'irradiation solaire en Wh/m² pour notre premier site d'étude : la ville de Paris (Fig.65).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:01- 2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:01- 3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:01- 4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:01- 5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:01- 6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:01- 7:00	0	0	0	0	37	64	57	19	0	0	0	0
7:01- 8:00	0	0	0	22	121	139	160	149	44	4	0	0
8:01- 9:00	0	0	19	85	184	220	244	259	122	93	21	0
9:01-10:00	18	59	67	138	221	268	283	338	151	172	90	7
10:01-11:00	82	116	119	190	223	288	321	371	220	228	141	44
11:01-12:00	119	160	155	229	229	282	315	385	242	247	170	77
12:01-13:00	141	209	173	262	223	267	299	368	240	260	180	103
13:01-14:00	143	220	175	240	212	275	327	383	266	254	166	95
14:01-15:00	127	201	162	211	203	282	348	380	230	230	143	86
15:01-16:00	95	144	132	175	200	284	342	376	219	170	105	29
16:01-17:00	25	76	81	121	155	255	296	328	177	111	35	0
17:01-18:00	0	1	21	55	98	197	221	239	115	11	0	0
18:01-19:00	0	0	0	7	36	115	131	109	8	0	0	0
19:01-20:00	0	0	0	0	2	26	32	5	0	0	0	0
20:01-21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:01-22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:01-23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:01-24:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 65. Irradiation solaire journalière en Wh /m². Base de données météo Paris.

¹¹² International Energy Agency, 2009 *Energy Balance for World*, 2010.

¹¹³ Gtep : Giga tonnes équivalente pétrole

¹¹⁴ Source: SATEL - LIGHT

Dans un deuxième temps nous avons étudié l'évolution des températures et des taux d'humidité pour le même site. Cette forme de représentation montre l'évolution des conditions hygrothermiques au cours d'une journée pour les différents mois de l'année. Nous avons comparé ces tableaux avec les bases de données d'irradiation solaire. Nous avons établi ainsi une relation directe entre température, humidité et irradiation solaire. Ces mesures constitueront la base de données pour la simulation dynamique du comportement thermique d'un bâtiment.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	3,3	3,3	5,9	8,1	12,1	14,7	16,8	16,8	13,9	9,5	6	4,1
1:01- 2:00	3,3	3,1	5,5	7,5	11,4	14,1	16,1	16,1	13,7	9,2	5,7	4
2:01- 3:00	3,2	2,9	5,3	7	10,9	13,6	15,8	15,5	13,4	8,8	5,5	3,7
3:01- 4:00	3	2,9	5	6,6	10,7	13,2	15,2	15	13,1	8,5	5,3	3,7
4:01- 5:00	2,9	2,8	4,6	6,3	10,3	13	14,7	14,6	12,9	8,4	5,2	3,6
5:01- 6:00	2,7	2,8	4,5	6,1	10,2	13,1	14,7	14,4	12,6	8,1	5,1	3,5
6:01- 7:00	2,6	2,7	4,5	6,3	11	13,7	15,7	14,9	12,5	8	5	3,4
7:01- 8:00	2,6	2,7	4,5	7,3	12,1	14,7	17,1	16,8	13,5	9	5,1	3,4
8:01- 9:00	2,8	2,7	5,1	8,6	13,2	15,9	18,6	18,1	14,7	10,2	5,3	3,5
9:01-10:00	3,1	3,1	6	10	14,3	17	19,9	19,9	15,8	11,4	5,9	4
10:01-11:00	3,8	3,8	7,3	11,2	15,3	18	20,9	21,5	16,6	12,7	6,6	4,6
11:01-12:00	4,5	4,8	8,4	12	16,2	18,7	21,7	22,5	17,5	13,8	7,4	5,1
12:01-13:00	5,1	5,4	9,1	12,7	16,8	19,5	22,4	23,4	18,5	14,8	7,9	5,6
13:01-14:00	5,5	5,8	9,3	13	17,5	20	22,9	23,9	18,8	15	8,4	6
14:01-15:00	5,7	6,3	9,8	13,3	18,2	20,3	23,3	24,3	19,3	15,4	8,3	6,1
15:01-16:00	5,7	6,3	10	13,5	18,3	20,4	23,5	24,6	19,4	15,4	8,3	6
16:01-17:00	5,3	6,1	9,9	13,5	18,2	20,2	23,5	24,2	18,8	14,4	7,6	5,6
17:01-18:00	4,8	5,6	9,6	13,1	17,6	19,9	23,3	23,7	18,3	13,4	7,2	5,3
18:01-19:00	4,3	5,2	8,7	12,5	17,1	19,4	22,7	23,1	17,6	12,4	6,9	4,9
19:01-20:00	4,1	4,8	7,9	11,5	16,2	18,6	21,8	21,8	16,6	11,8	6,6	4,7
20:01-21:00	3,8	4,6	7,5	10,7	15,3	17,5	20,2	20,6	15,9	11,2	6,6	4,6
21:01-22:00	3,6	4,2	7	10,2	14,4	16,8	19,4	19,6	15,1	10,7	6,4	4,4
22:01-23:00	3,6	4,1	6,5	9,4	13,6	16,1	18,2	18,7	14,7	10,3	6,1	4,1
23:01-24:00	3,4	3,7	6,2	8,9	13	15,5	17,3	17,7	14,1	9,9	6	4,1
Max Hour	16	16	16	16	16	16	17	16	16	16	14	15

Figure 66. Température moyenne horaire. Météo Paris.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0:01- 1:00	94	69	80	82	74	85	72	75	85	89	93	92
1:01- 2:00	94	71	82	83	77	87	74	79	85	89	93	92
2:01- 3:00	94	72	83	85	79	90	76	81	86	90	94	92
3:01- 4:00	94	72	83	87	79	91	79	84	87	91	94	92
4:01- 5:00	95	73	85	88	81	93	83	87	88	92	93	92
5:01- 6:00	96	74	84	90	81	93	83	88	89	92	94	93
6:01- 7:00	95	74	85	89	80	91	82	87	89	92	94	92
7:01- 8:00	95	75	86	87	75	87	77	81	86	89	94	92
8:01- 9:00	94	75	85	82	70	82	72	76	81	85	94	93
9:01-10:00	93	73	81	75	67	78	66	69	78	81	93	92
10:01-11:00	90	72	75	69	62	74	63	62	74	76	91	89
11:01-12:00	88	68	70	63	60	71	59	59	71	72	87	88
12:01-13:00	86	65	67	60	58	68	56	55	68	69	84	86
13:01-14:00	86	63	66	58	55	66	54	53	67	68	81	86
14:01-15:00	85	60	64	58	52	64	52	51	64	67	80	85
15:01-16:00	84	59	63	56	52	63	52	50	64	67	80	84
16:01-17:00	86	60	63	56	52	65	52	53	67	70	83	86
17:01-18:00	88	61	64	58	55	65	51	53	68	74	85	86
18:01-19:00	91	63	66	60	57	67	52	55	70	78	86	87
19:01-20:00	91	65	70	65	59	70	54	59	74	81	88	88
20:01-21:00	92	66	73	69	63	75	59	63	77	82	89	89
21:01-22:00	93	67	76	73	65	77	62	67	80	84	90	90
22:01-23:00	93	67	79	76	69	80	67	71	81	86	91	91
23:01-24:00	93	68	80	78	71	83	70	73	84	87	92	91
Max Hour	6	9	8	6	6	6	6	6	7	7	6	6
Min Hour	16	16	17	17	17	16	18	16	15	15	15	16

Figure 67. Humidité relative moyenne en pourcentage. Météo Paris

Nous avons établi postérieurement le taux d'irradiation solaire horaire en fonction de l'orientation d'une surface à différentes périodes de l'année (Fig 68 à 71).

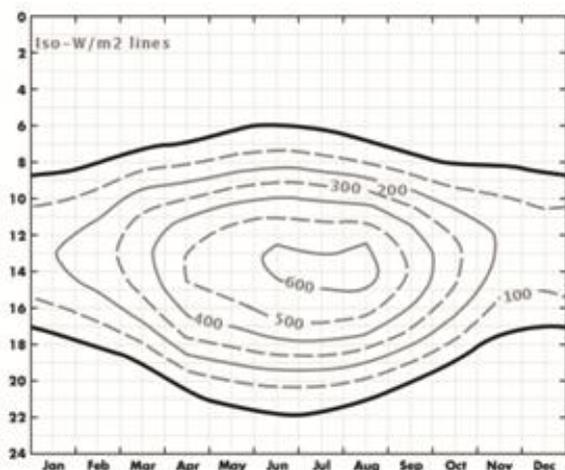


Figure 68. Irradiation solaire - plan horizontal

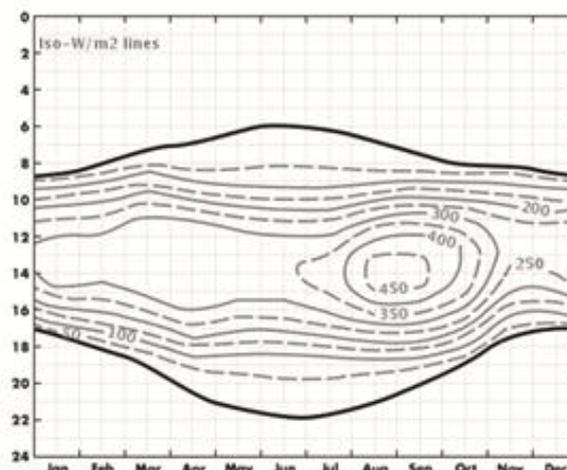


Figure 69. Irradiation solaire - plan vertical sud

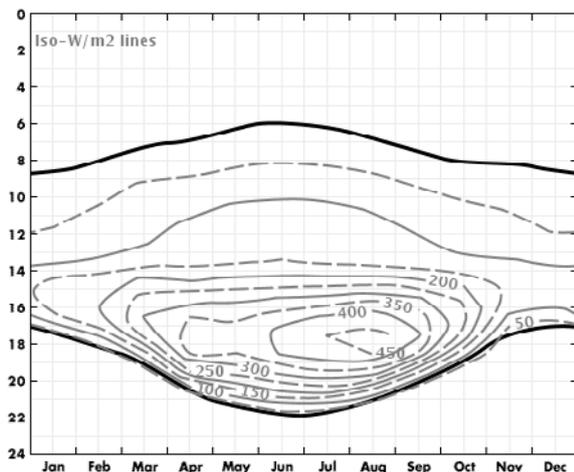


Figure 70. Irradiation solaire - plan ouest

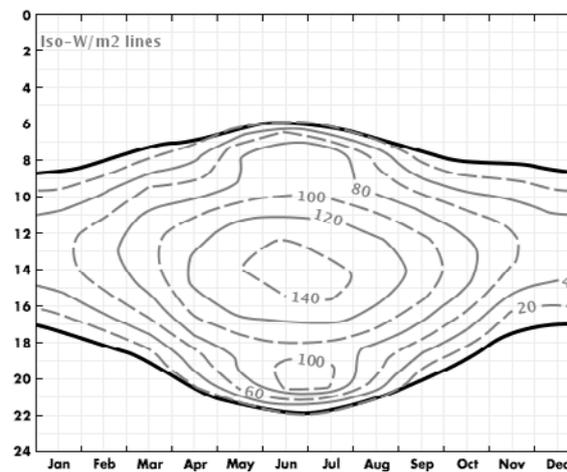


Figure 71. Irradiation solaire - plan vertical nord

La quantité d'énergie solaire varie sensiblement au cours de l'année. Les études d'irradiation solaire montrent des variations importantes et des répartitions inégales de l'énergie en fonction de l'orientation des surfaces. Un plan horizontal peut recevoir de 100W/m^2 à 600W/m^2 en période estivale. Une Surface au sud peut recevoir de 200W/m^2 à 450W/m^2 en période hivernale. L'implantation des façades actives doit donc tenir compte du potentiel énergétique en fonction de la saison. Pour les cas des villes situées dans des latitudes Nord comme Paris (45°N), les apports solaires en façade sud sont plus élevés et plus facilement contrôlables que dans les latitudes plus équatoriales. C'est à partir de la définition des façades qu'on pourra modifier l'impact du rayonnement solaire sur le comportement du bâtiment.

Lors de la phase de réalisation des projets CQHE, le comité technique a décidé d'étudier la faisabilité des prototypes dans deux latitudes différentes : les villes de Paris et Marseille.

Nous avons donc comparé dans un premier temps les taux d'irradiation solaire mensuels et annuels pour les deux villes (Fig.72).

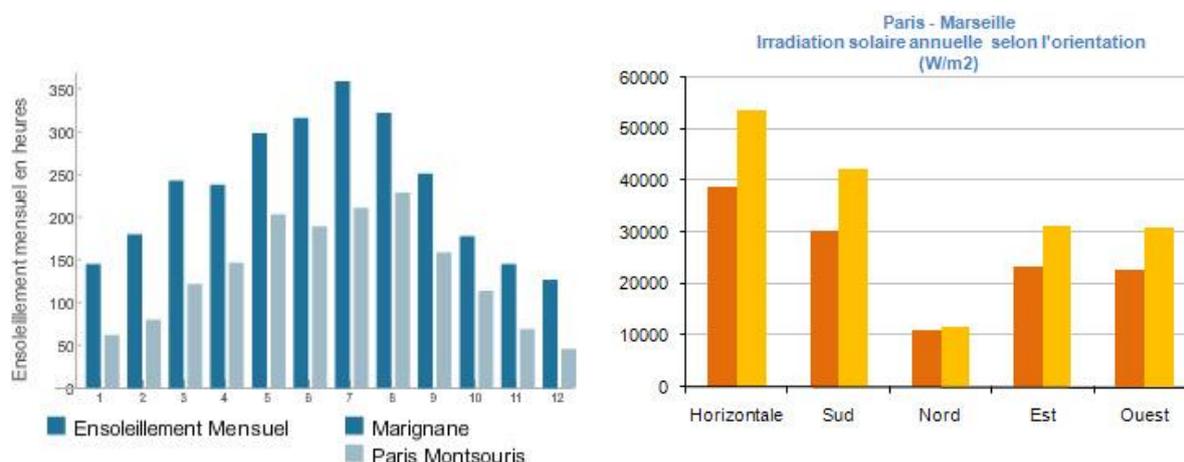


Figure 72. Comparaison du taux d'enseillement et de l'irradiation solaire à Paris et à Marseille.

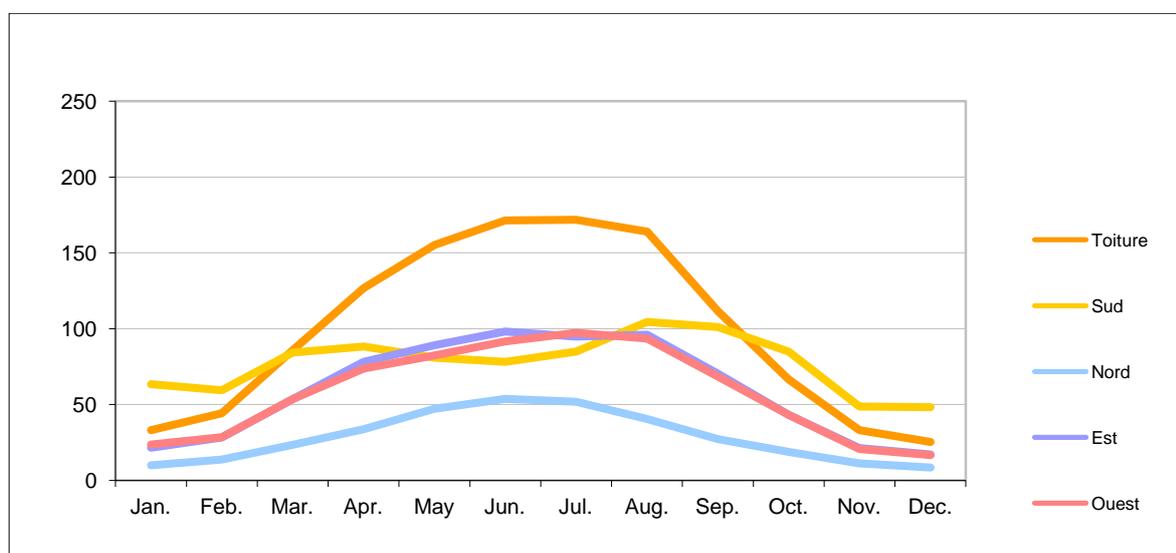


Figure 73. Irradiation solaire mensuelle selon l'orientation du plan en kWh/m² : météo Paris.

Il est à remarquer le comportement de la courbe d'irradiation pour une surface orientée au sud : les niveaux d'irradiation solaire captés sur ces surfaces sont moins importants en été qu'en mi-saison. Ceci peut s'expliquer par l'angle d'incidence des rayons solaires. Le soleil ayant un azimut élevé, les rayons vont être réfléchis.

6.1.2. Modélisation du potentiel énergétique à l'échelle du bâtiment

Les niveaux d'irradiation solaire peuvent être synthétisés en pourcentage d'énergie reçue par chaque surface pour comprendre l'influence de l'orientation (Fig.74) dans la conception d'un projet à haute performance énergétique. En effet, l'étude du potentiel solaire passif nous permet de valoriser au mieux les aspects liés à l'orientation à l'implantation générale.

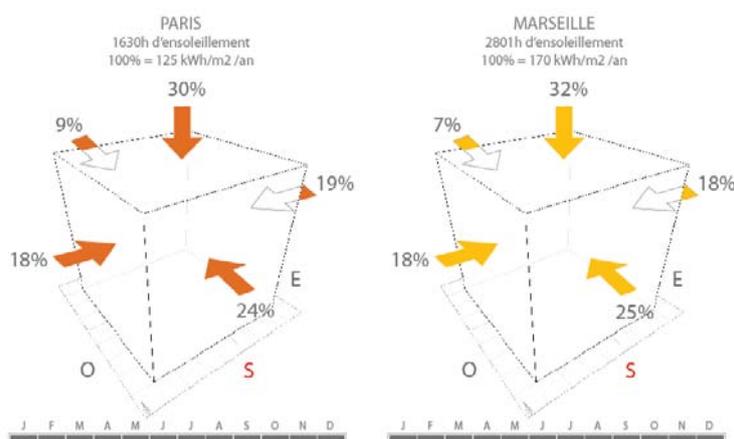


Figure 74. Comparaison Paris – Marseille de l'irradiation solaire en fonction de l'orientation

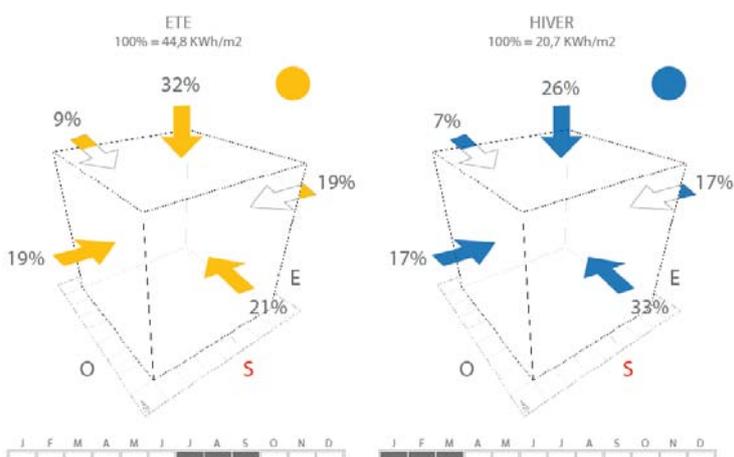


Figure 75. Irradiation solaire d'un bâtiment à Paris en fonction de son orientation.

Ces quantités d'énergie correspondent potentiellement à des sources d'approvisionnement en énergie pour le bâtiment. Cependant, la quantité d'énergie reçue par une surface peut être atténuée par des facteurs d'ordre climatique comme la nébulosité ou la pollution ; ainsi que par des effets d'ombrage causés par d'autres bâtiments dans des environnements urbains.

A partir de ces informations, les études sur le potentiel énergétique solaire ont été divisées en deux phases. La première, concerne l'étude des effets de masque en fonction de la distance à un bâtiment, tandis que la deuxième, évalue l'affaiblissement des niveaux d'irradiation par rapport à cette distance et à la hauteur du masque.

6.1.2.1. Etude des effets de masque sur un volume

L'objectif de cette étude était de quantifier les effets de masque sur une parcelle et d'évaluer postérieurement les niveaux d'irradiation solaire en fonction de la distance à un bâtiment.

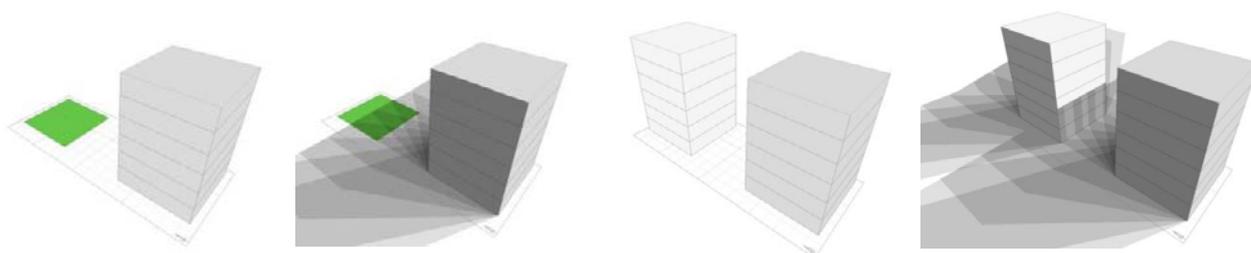


Figure 76. Etude des effets de masque sur une parcelle vide et occupée.

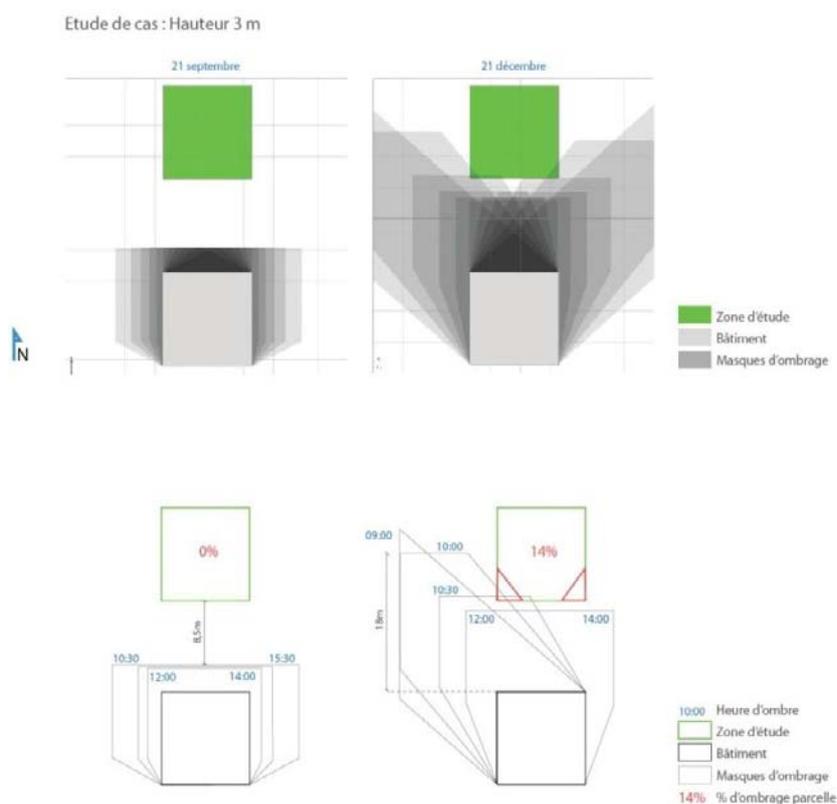


Figure 77. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 3m d'hauteur.

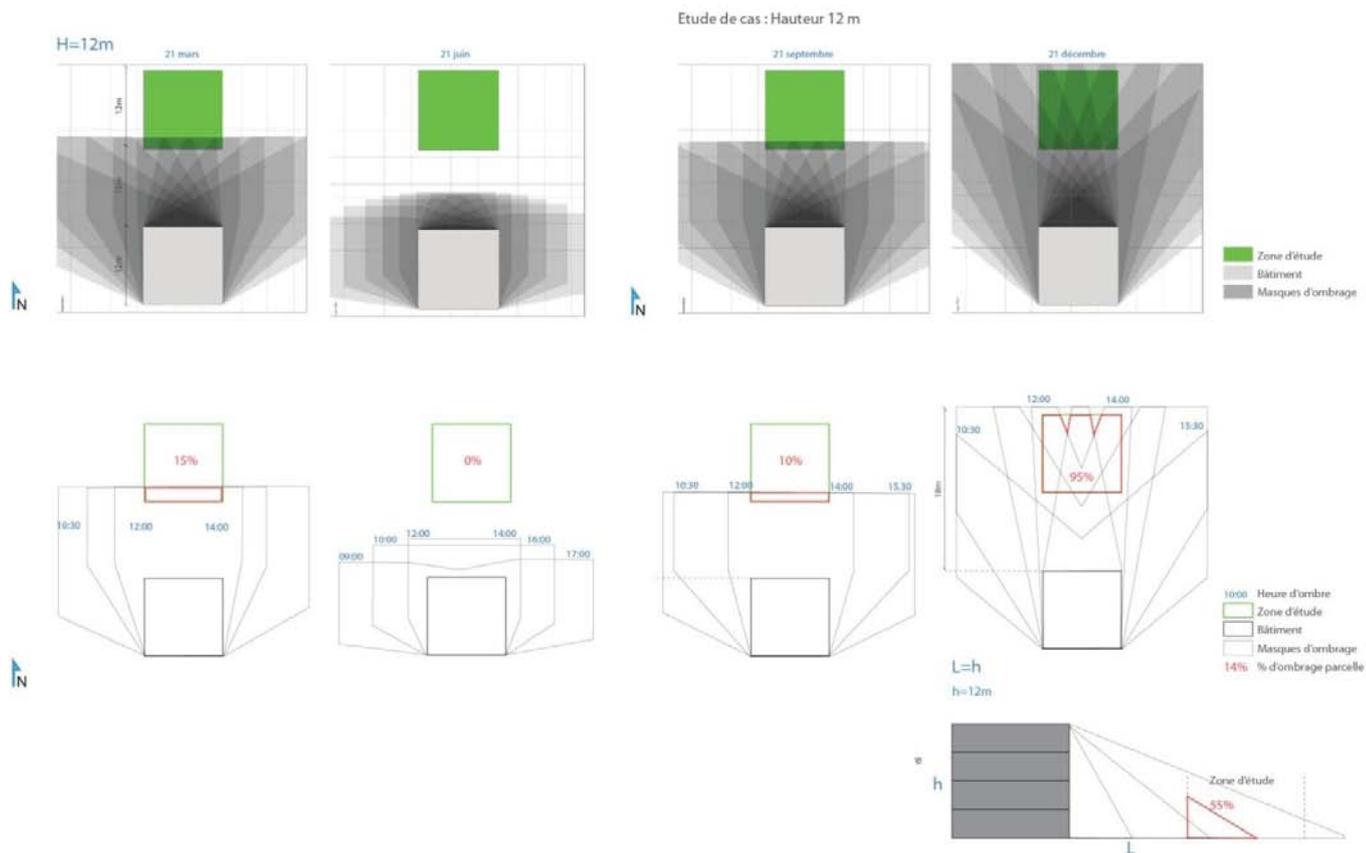


Figure 78. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 12m d'hauteur.

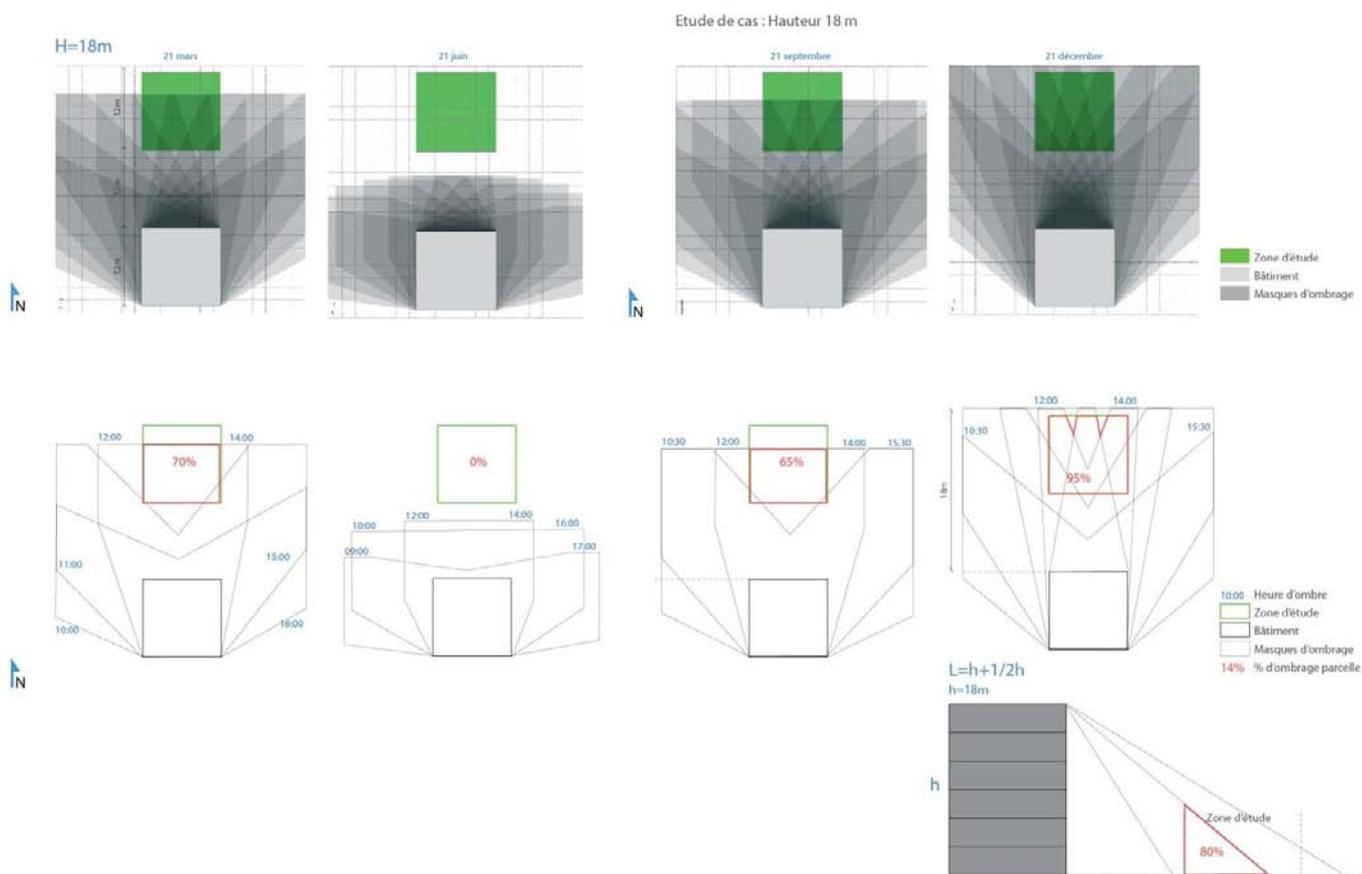


Figure 79. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 18m d'hauteur.

Nous avons ainsi simulé le pourcentage d'ombrage sur une parcelle donnée pour une journée typique du 21 mars, 21 juin, 21 septembre et 21 décembre. L'objectif est d'observer l'influence de l'ombrage sur un bâtiment avoisinant dans différentes périodes de l'année. A partir de deux paramètres - la hauteur et la distance entre les bâtiments - nous avons simulé plusieurs cas d'étude.

Le premier cas correspond à une parcelle où la distance au bâtiment est équivalente à la hauteur du même. Le pourcentage du masque en été et en mi saison est négligeable. Seule la partie sud en alignement avec la rue est ombragée au niveau du RDC. En hiver, les effets de masque sont importants. Il a une incidence sur 95% de la parcelle au niveau RDC, 55% au niveau R+1, et l'impact est négligeable pour une hauteur supérieure à 7m.

Les effets de masque en mi- saison sont considérables pour une hauteur équivalente à 18m. Les niveaux RDC à R+2 sont affectés à hauteur de 50%. Les effets d'ombrage en période froide sont très importants. La parcelle étudiée est ombragée jusqu'à une hauteur équivalente de 12m.

Ces études de nature géométrique, nous ont permis d'entamer la réflexion sur la stratification de l'énergie dans des environnements urbains. Il est important de considérer quelle est l'influence des effets de masque sur le potentiel climatique des bâtiments. Si nous considérons les bâtiments en tant qu'entités énergétiques, elles existent dans la mesure où elles permettent les échanges d'énergie avec son environnement. D'où l'intérêt de *mesurer* la quantité d'énergie présente dans l'environnement comme *potentiel* avant la réalisation du projet. Nous avons ainsi procédé à la modélisation des bâtiments et de l'environnement à travers l'outil de simulation environnementale *Ecotect*¹¹⁵, qui permet d'établir les niveaux d'irradiation solaire sur différents plans.

¹¹⁵ Autodesk Ecotect © analysis est un outil numérique qui permet de simuler et d'analyser les aspects énergétiques dans la conception d'un projet.

6.1.2.2. Etude de l'affaiblissement de l'irradiation par rapport à la distance d'ombrage

Il était question d'étudier les niveaux d'irradiation solaire et les taux d'affaiblissement en fonction de la distance à l'objet qui fait obstacle avec le rayonnement. Les premières simulations réalisées avec *Ecotect* permettaient d'observer les masques cumulés pendant une journée et de mesurer les niveaux d'irradiation sous cet effet. Nous avons ainsi établi des courbes à partir de points de mesure que nous avons représentés par couleurs, en fonction des taux d'irradiation. L'échelle s'exprime du rouge au vert : les points rouges correspondent à des niveaux d'irradiation élevés et les points verts à des niveaux faibles d'irradiation. Ainsi ils sont représentées les quantités d'énergie dans un plan de l'espace. Toutefois, il est possible également de représenter les mesures dans une échelle tridimensionnelle (Fig.80-81).

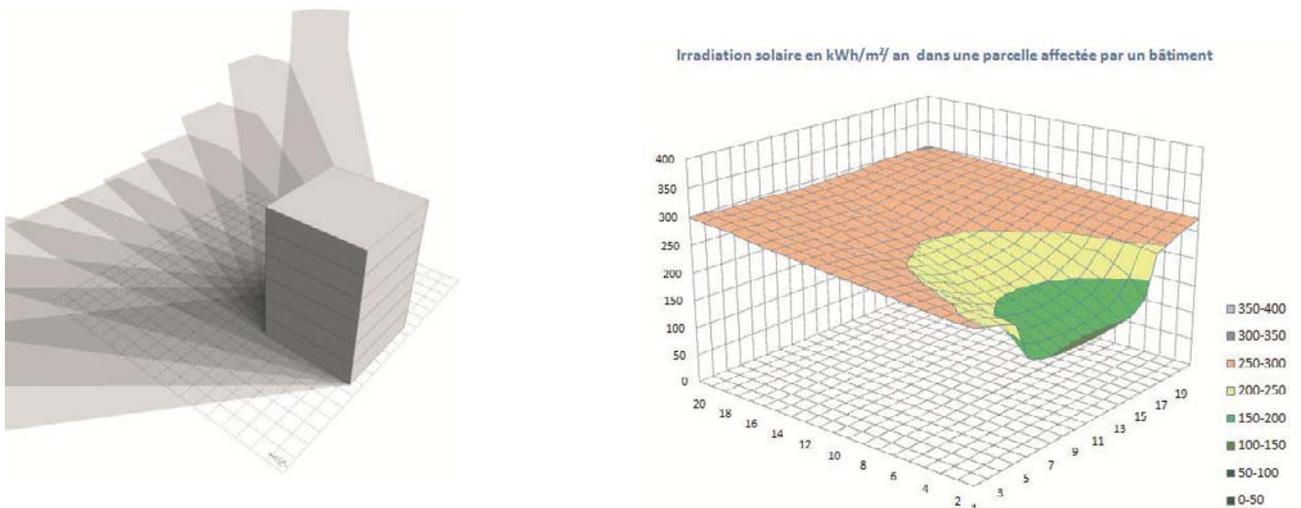


Figure 80. Masque d'enseillement journalier et taux d'irradiation solaire

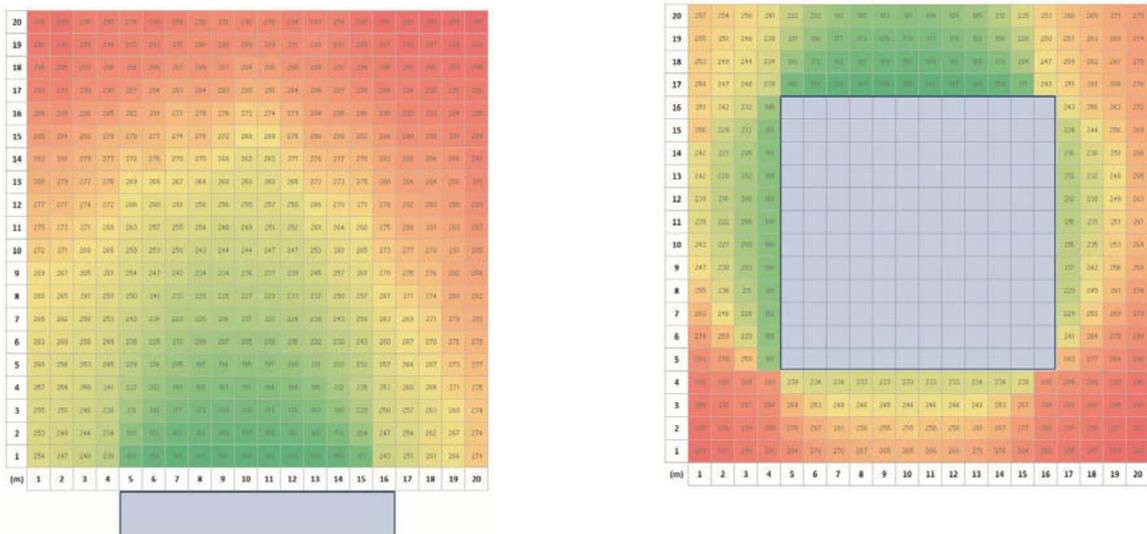


Figure 81. Influence des effets de masque sur les taux d'irradiation solaire d'une parcelle.

6.1.2.3. Affaiblissement des niveaux d'irradiation par rapport à la hauteur

Nous avons étudié postérieurement les niveaux d'irradiation solaire en hauteur pour obtenir une représentation de la quantité d'énergie dans l'espace. L'objectif était de mesurer les pourcentages d'atténuation des niveaux d'énergie en fonction de la hauteur et de la distance au bâtiment. Des sections en plan et coupe permettent de quantifier les niveaux d'irradiation solaire en Wh/m² par étage (à droite). Nous pouvons établir ainsi une base pour évaluer le potentiel passif d'une parcelle et « dessiner » une coupe d'un « volume théorique » (Fig.82).

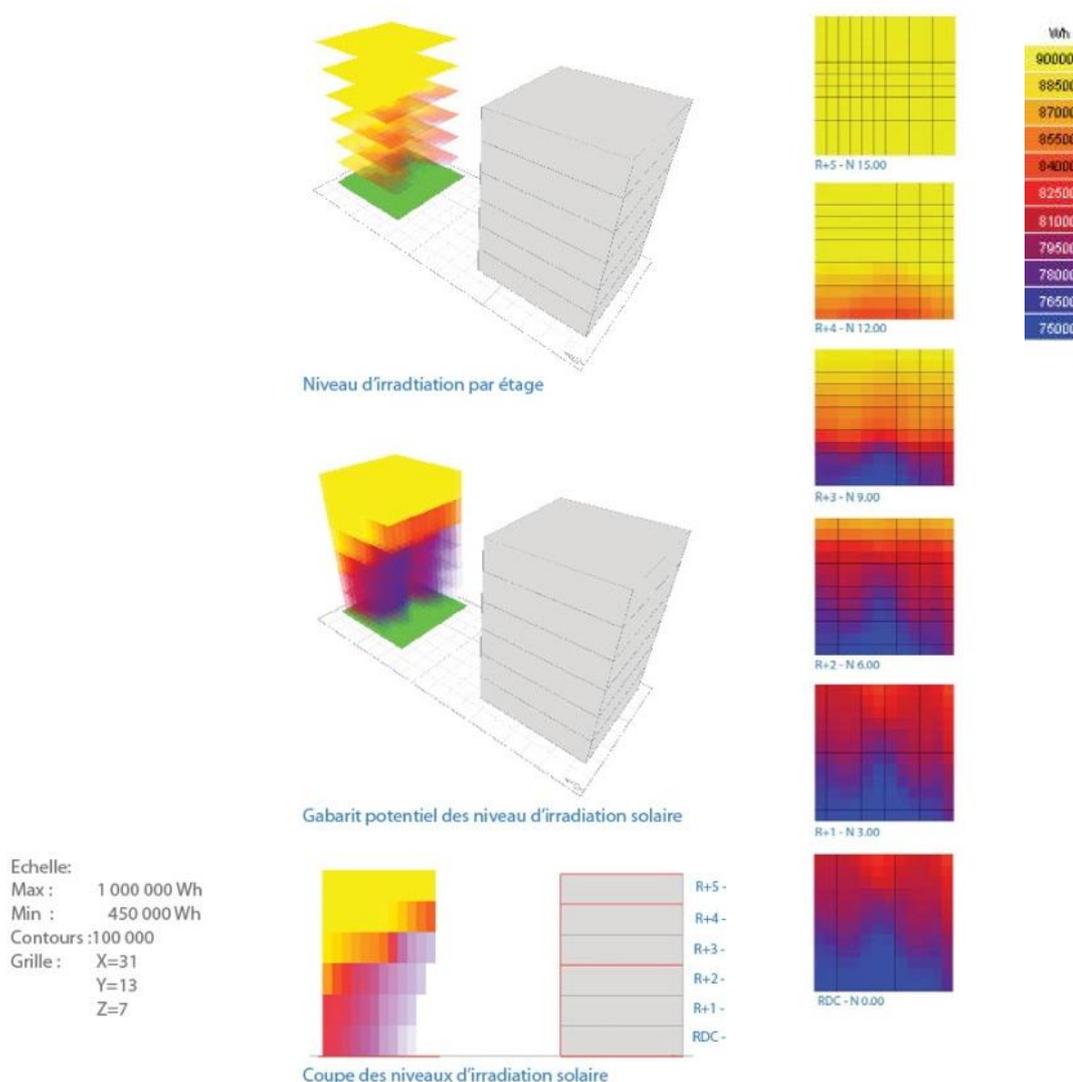


Figure 82. Niveaux d'irradiation solaire sur une parcelle à différentes hauteurs.

Mais l'objet architectural est dépourvu de sa complexité s'il n'intègre pas une réflexion sur son environnement urbain à une échelle plus large. A partir des travaux sur la conception passive en architecture, il est possible d'étudier l'influence de l'environnement urbain sur le comportement énergétique du projet et par conséquent sur la morphologie du bâtiment.

6.1.3. Modélisation du potentiel énergétique à l'échelle urbaine

6.1.3.1. Modélisation du tissu urbain

Nous avons simulé un tissu urbain qui intègre les conditions climatiques aux caractéristiques de l'environnement. On définit ainsi un univers avec des *conditions limites*, caractérisées par le climat, le territoire, le paysage urbain, la densité et la morphologie des bâtiments.

Chaque environnement urbain est caractérisé par l'ensoleillement et les effets de masque sur les façades : ces conditions vont déterminer les besoins de chauffage et la performance énergétique globale du bâtiment. Il est donc nécessaire de considérer l'environnement urbain comme facteur essentiel dans la conception environnementale car il va définir le potentiel passif d'un bâtiment.

Les modélisations postérieures portent sur un environnement urbain modulaire composé de 36 parcelles numérotées. Chacune de ces parcelles à une dimension de 36 X 36 m et contient différentes typologies de bâtiments. Nous avons proposé 9 typologies avec pour simuler des conditions de densité variant entre 15000 et 30000 habitants par kilomètre carré. Nous avons ainsi constitué des modèles capables de simuler la question énergétique à l'échelle urbaine.

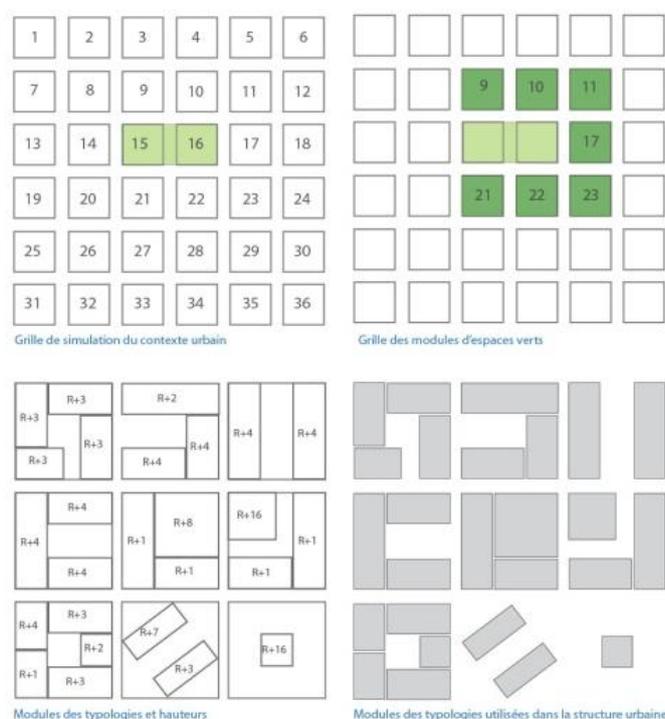


Figure 83. Structure urbaine modélisée

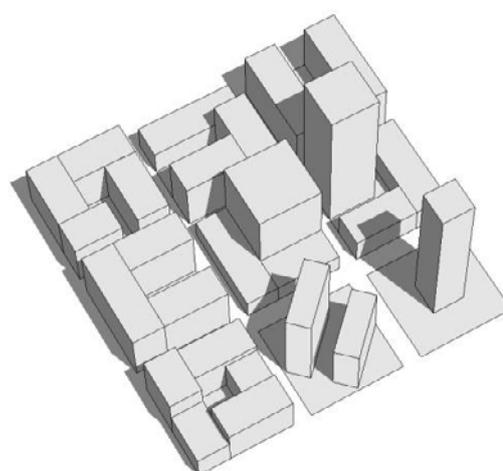


Figure 84. Modélisation 3D - typologies

6.1.3.2. Etudes d'ensoleillement

Nous avons simulé les conditions d'ensoleillement dans cet environnement à différentes périodes de l'année. La hauteur des bâtiments est variable pour simuler différents effets sur la parcelle d'étude (en vert clair) afin d'évaluer l'impact des ombrages sur un site disponible pour la construction d'un projet. L'objectif est de comparer postérieurement ces observations avec des mesures des niveaux d'irradiation dans la parcelle.

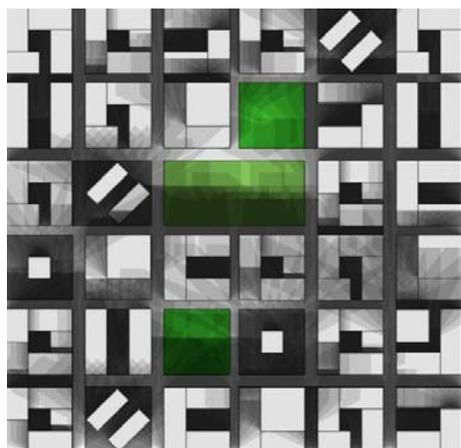


Figure 85. Masque d'ensoleillement journalier en été.



Figure 86. Modélisation 3D.

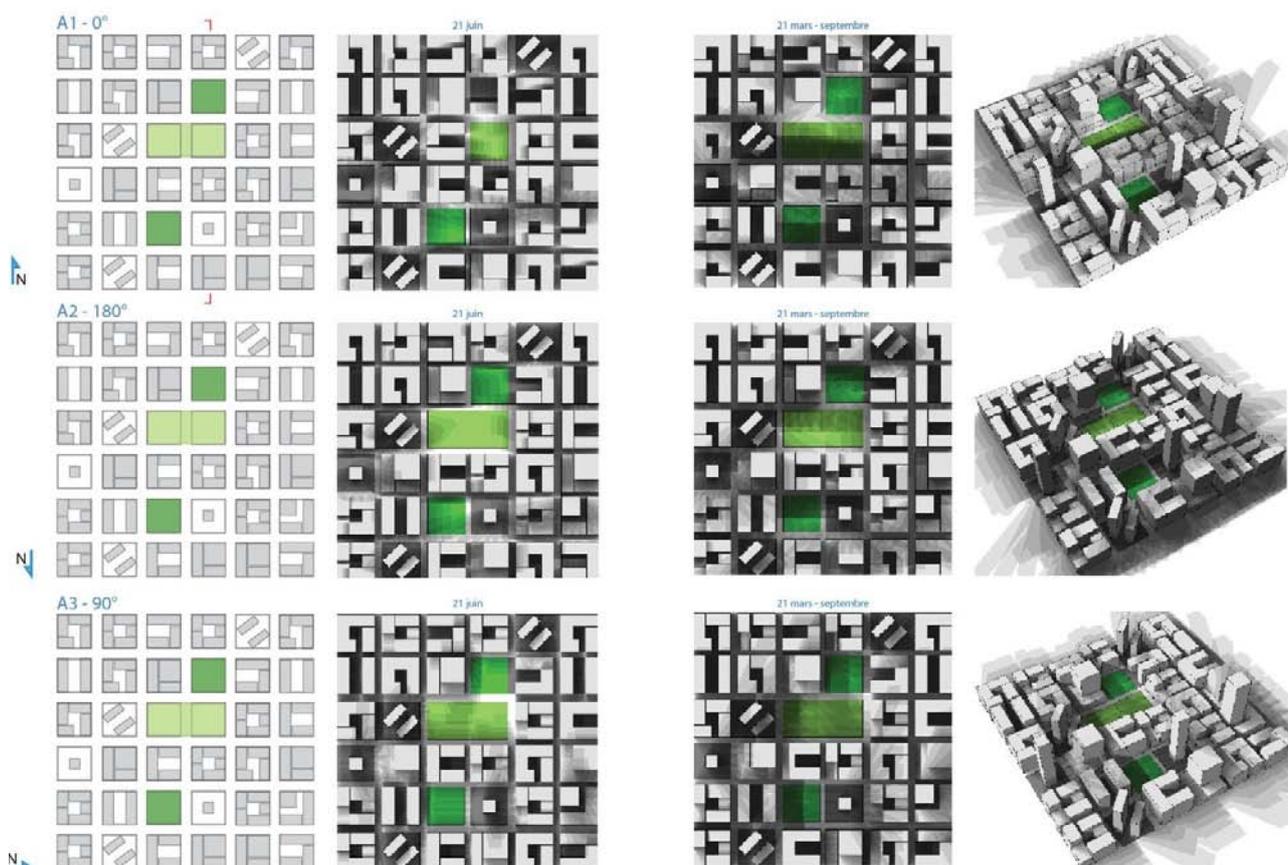


Figure 87. Etude des effets de masque sur un environnement avec des orientations variables.

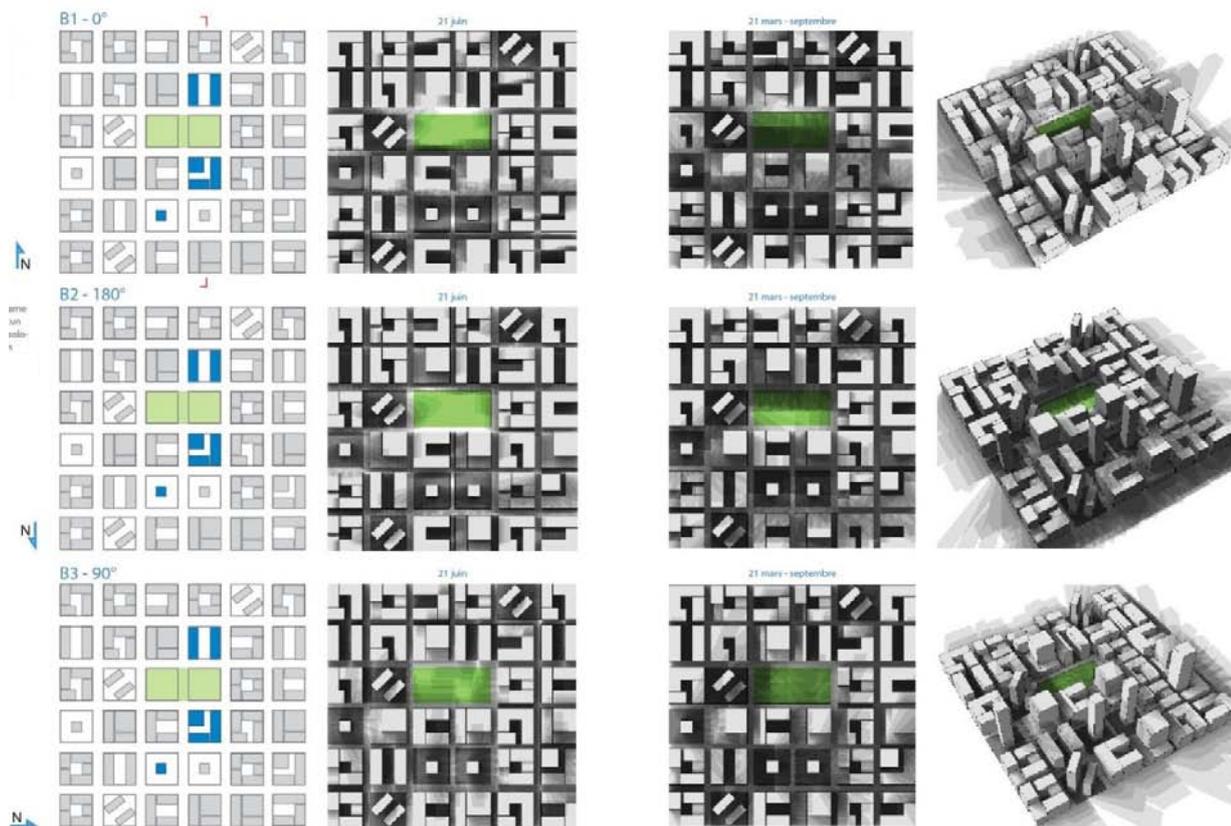


Figure 88. Etude des effets de masque en modifiant les typologies des bâtiments avoisinants.

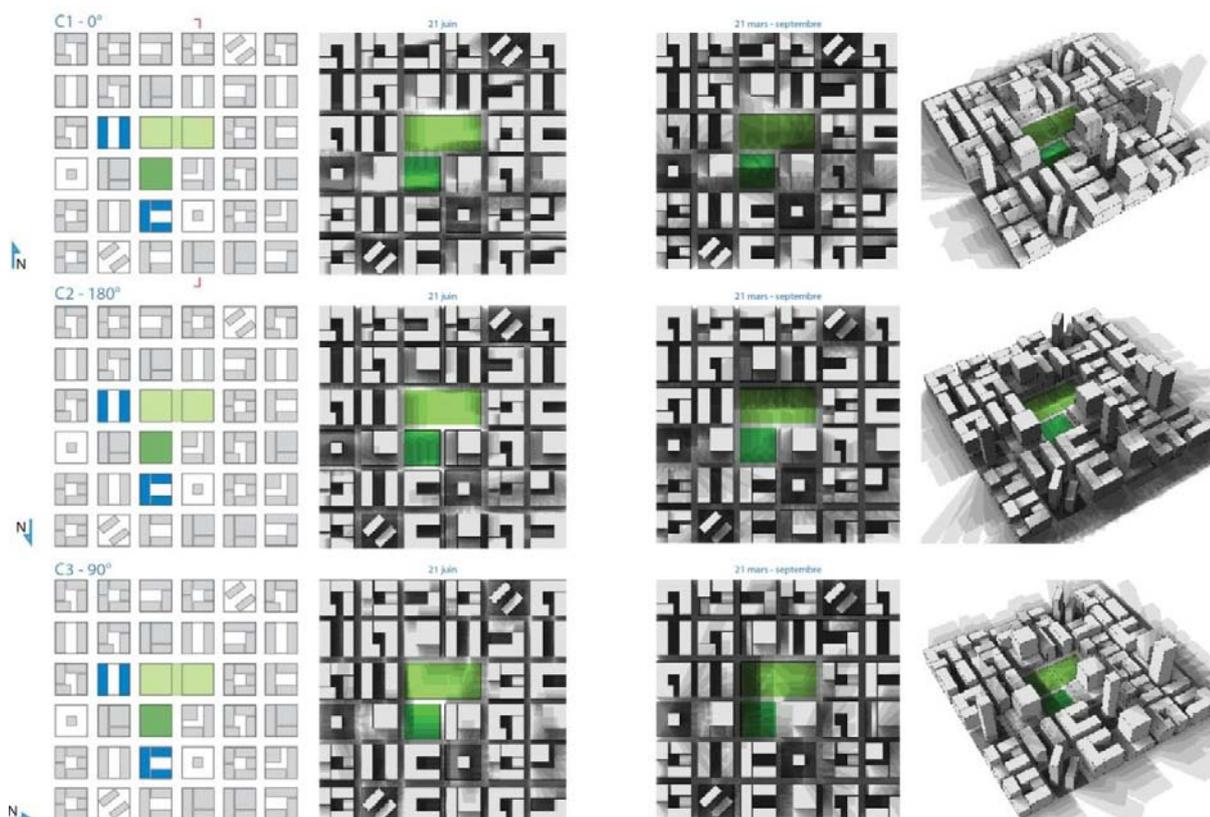


Figure 89. Etude des effets de masque en modifiant les typologies des bâtiments éloignés.

6.1.3.3. Mesures de l'irradiation solaire

Nous avons procédé ensuite à la *mesure* des niveaux d'irradiation sur la parcelle d'étude. A partir de la même méthodologie utilisée dans l'étude d'un volume (6.1.2.1), nous avons relevé les niveaux d'irradiation à différentes hauteurs, dessinant le début d'une configuration morphologique en trois dimensions.

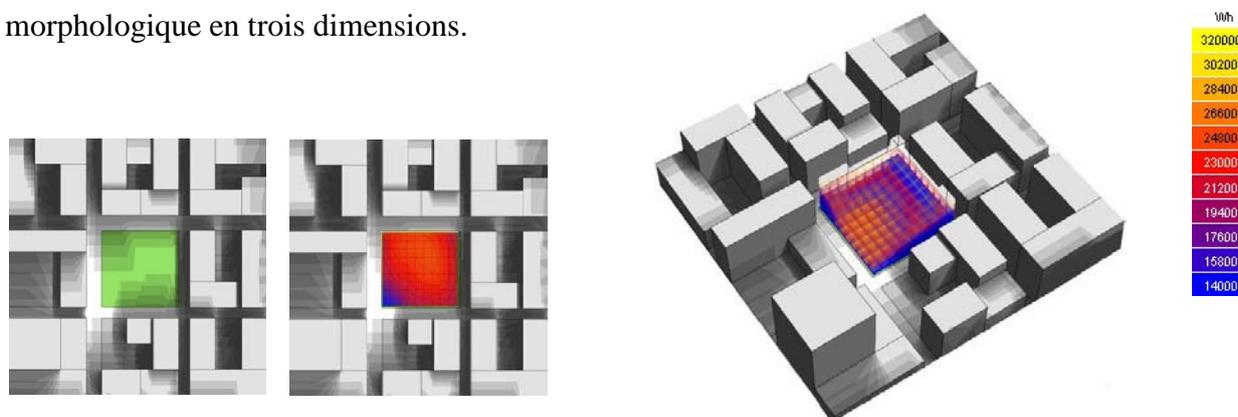


Figure 90. Etude niveaux d'irradiation solaire sur une parcelle et représentation 3D.

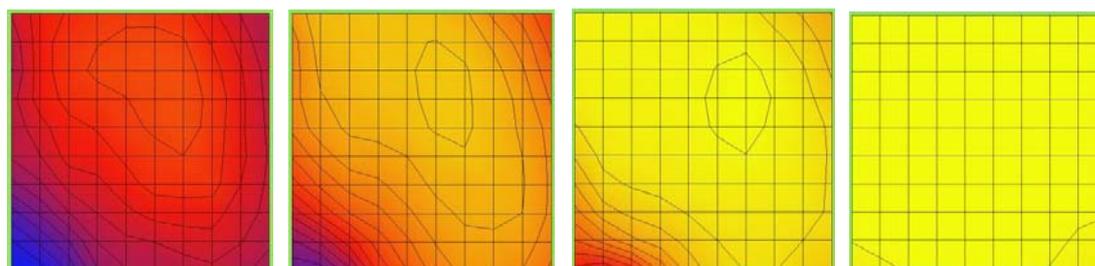


Figure 91. Mesures du niveau d'irradiation (en Wh/m²) à hauteur 0m (RDC), 9m, 15m, 21m.

Ces mesures ont été relevées comme réponse à la question de l'influence de l'environnement externe sur une parcelle. Elles constituent le début formel de la réflexion sur la liaison entre la performance énergétique et la morphologie du bâtiment. Au-delà de considérations purement techniques sur la nature de *l'enveloppe* ou de sa *compacité*, cette analyse suggère le potentiel énergétique d'un site qu'on considèrerait uniquement d'un point de vue urbain. Bien que traditionnellement les aspects climatiques soient pris en compte dans l'analyse environnemental du site, ces réflexions ne se traduisent pas dans l'évaluation de la performance énergétique.

Nous avons ainsi étudié d'autres modèles à une échelle plus large de façon à évaluer le potentiel énergétique dans tout le tissu urbain et pas uniquement dans la parcelle d'étude. Le résultat obtenu correspond à des visualisations de la quantité d'énergie présente dans l'environnement, sous la forme de « radiographies » énergétiques (Fig. 92).

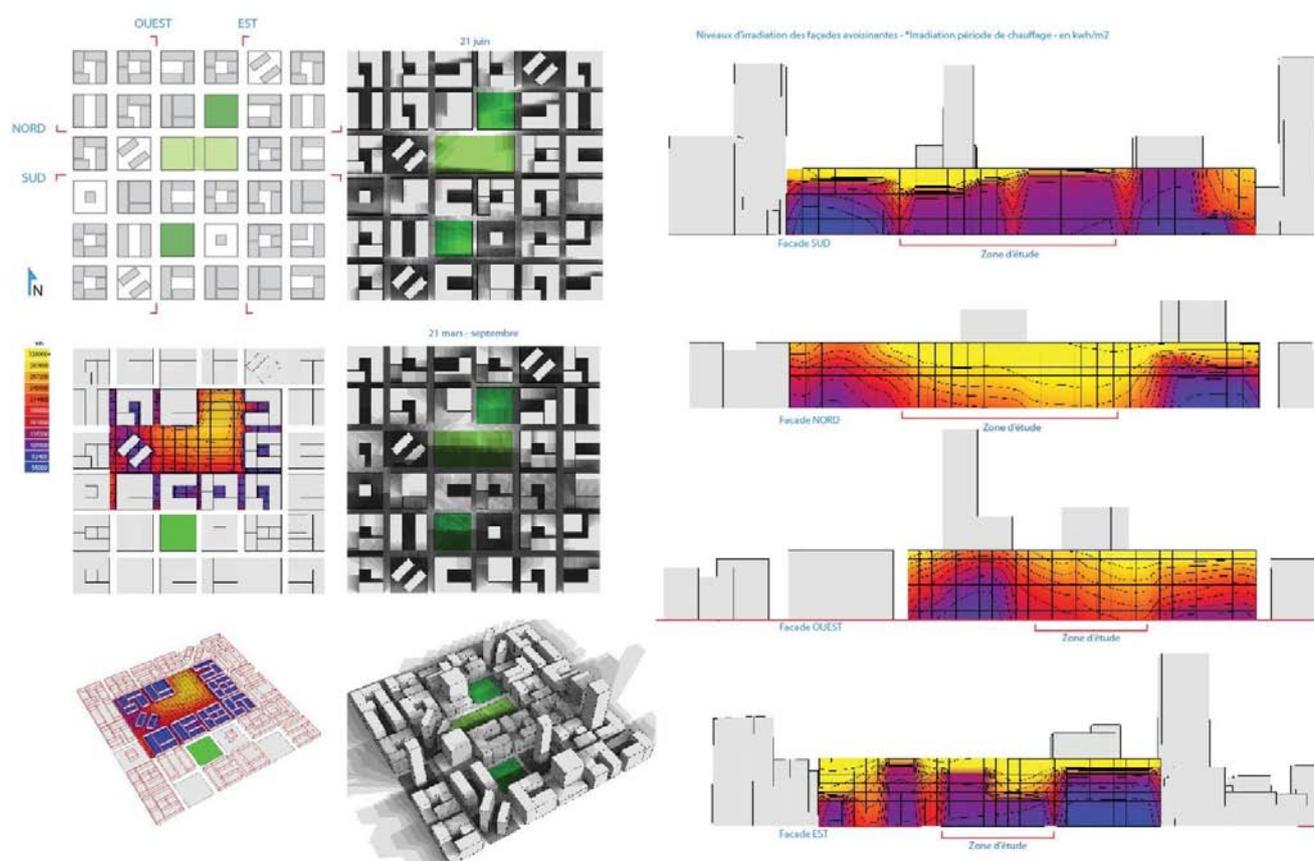


Figure 92. Visualisation de l'irradiation solaire en coupe sous forme de « radiographies ».

Ces « radiographies » en coupe montrent à quel point l'environnement urbain est déterminant du potentiel et de la performance énergétique des bâtiments. Les caractéristiques du *site* sont modifiées par les questions d'irradiation directe, d'irradiation diffuse, de réflexion et d'atténuation du rayonnement solaire.

Cependant, ces images sont instantanées : elles montrent les niveaux d'irradiation à un instant T donné. Or, ces quantités d'énergie varient sensiblement au cours de l'année, raison pour laquelle nous nous sommes intéressés à la comparaison des niveaux d'irradiation pour différentes périodes ainsi que des différentes configurations « morphologiques » qui en découlent.

L'étude a porté sur des mesures en période hivernale (du 21 décembre au 21 mars), en période estivale (du 21 juin au 21 septembre) et sur le cumul des niveaux énergétiques tout au long de l'année (Fig. 93)

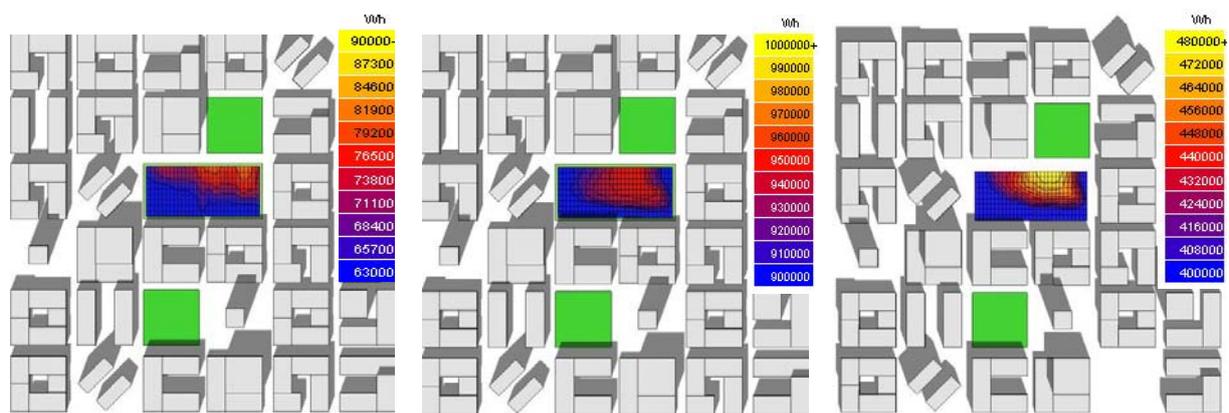


Figure 93. Images du niveau d'irradiation solaire (de gauche à droite) en hiver, été et annuelle.

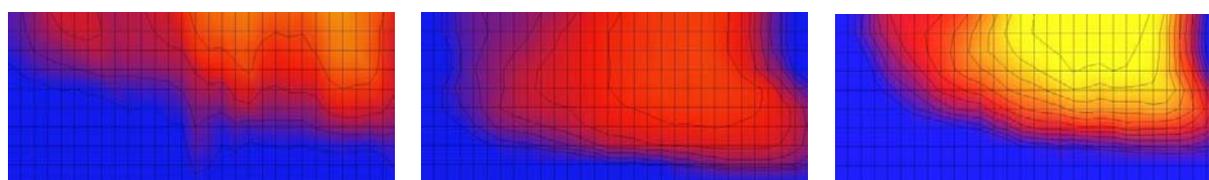


Figure 94. Images d'irradiation solaire en hiver, été et dans l'année à une hauteur de 6m du sol.

A partir de ces mesures, nous pouvons déterminer le potentiel du bâtiment en fonction de la hauteur étudiée dans une optique de valorisation des apports énergétiques en hiver, et de maîtrise de l'irradiation solaire en période chaude à travers la géométrie du bâtiment.

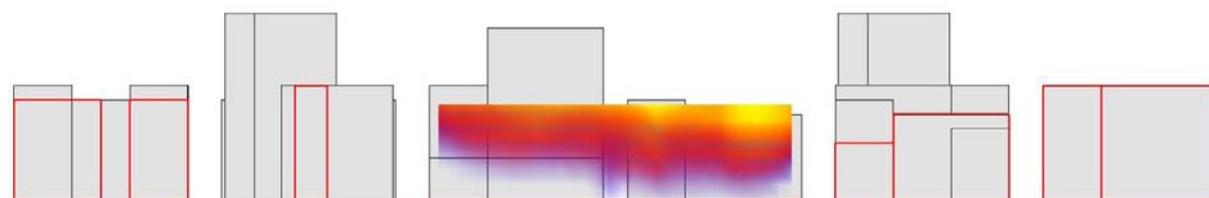


Figure 95. Niveaux d'irradiation solaire dans la parcelle d'étude en période hivernale

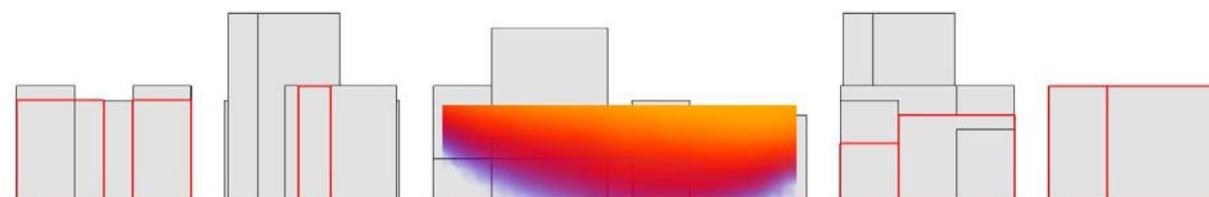


Figure 96. Niveaux d'irradiation solaire dans la parcelle d'étude en période estivale.

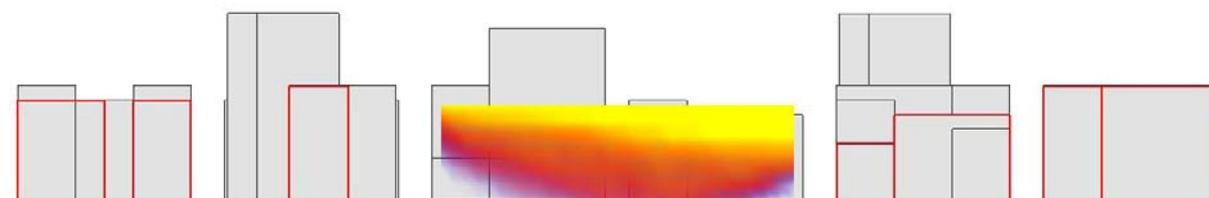


Figure 97. Niveaux d'irradiation solaire annuels dans la parcelle d'étude.

6.1.3.4. Définition morphologique du potentiel énergétique

L'étude en coupe des niveaux d'irradiation (Fig. 95 à 97) nous a permis de constituer une image tridimensionnelle de ce potentiel, que nous appellerons le gabarit capable (Fig. 98).

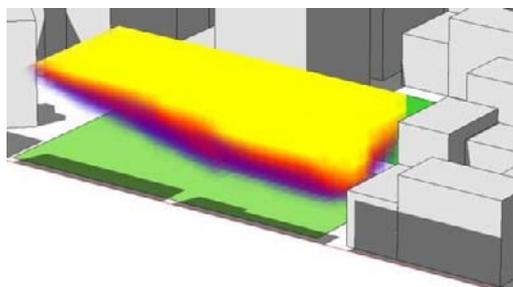


Figure 98. Niveaux d'irradiation solaire annuelle pour le site d'étude : gabarit « capable ».

Nous pouvons ainsi synthétiser l'approche morphologique du potentiel énergétique en trois stades (Fig.99) : Le premier correspond à la modélisation du contexte et de ses conditions limite : urbanité, densité, morphologies, surfaces extérieures, etc. Le deuxième stade est dédié à la simulation des caractéristiques environnementales du site : température, humidité, ensoleillement, vents. Le dernier permet de définir une première configuration morphologique qui traduit la capacité du bâtiment à exploiter l'énergie solaire à travers son enveloppe. A partir de ce potentiel pourront prendre forme différentes esquisses.

Stade 1 : Modélisation

Stade 2 : Simulation

Stade 3 : Définition morphologie

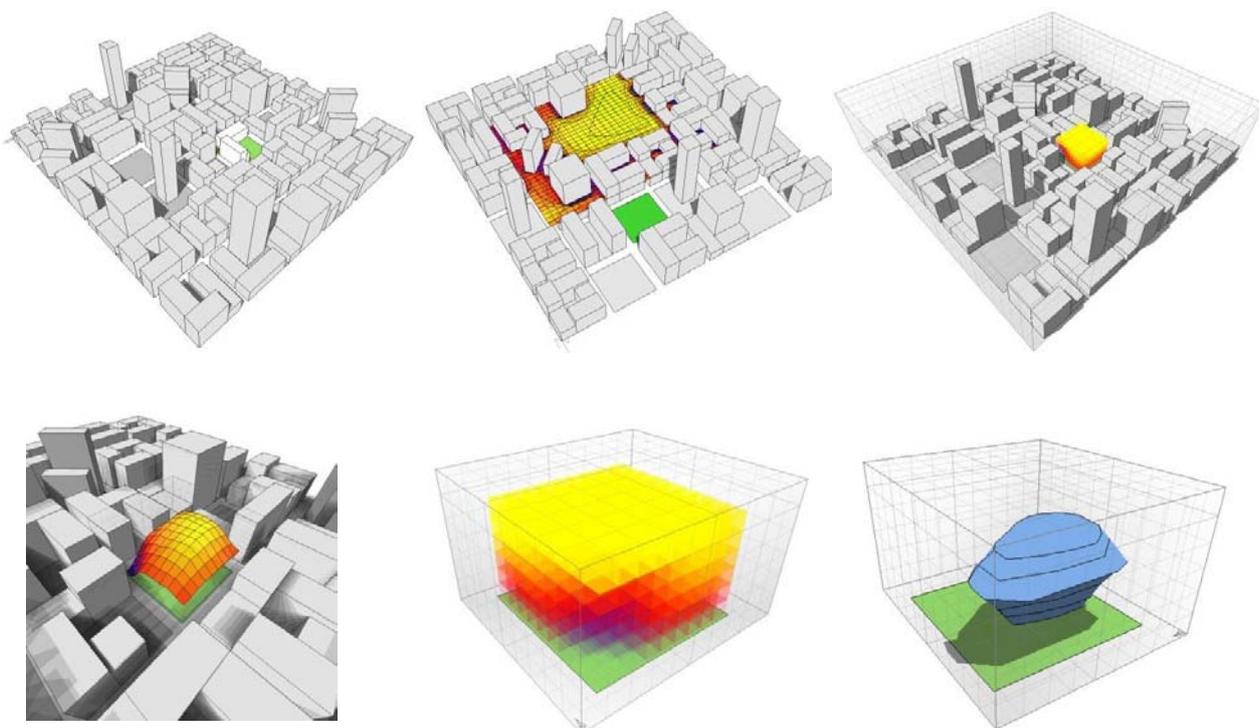


Figure 99. Phases de l'approche morphologique du potentiel énergétique.

6.2. Formulation de l'outil de conception

Les outils d'aide à la conception correspondent traditionnellement à des instruments de vérification d'une solution une fois que la première esquisse a été élaborée : c'est le cas des outils de calcul du comportement thermique, énergétique, acoustique ou visuel. Ces instruments sont orientés vers la recherche d'un *résultat* et non pas vers d'un *potentiel*, raison pour laquelle leur donnée d'entrée est toujours un dessin, une première esquisse du projet. Par ailleurs, ces outils sont de plus en plus complexes compte tenu de leur capacité à représenter en détail le bâtiment et à intégrer de nombreux paramètres de *mesure*.

En contrepartie, cette *approche morphologique au potentiel énergétique* du site constitue une donnée d'entrée préalable à la phase esquisse : elle apporte des informations sur la capacité du bâtiment à valoriser les apports énergétiques. Cependant, elle constitue une forme de *représentation* de ce *potentiel* mais elle ne permet pas de coupler les données programmatiques du projet. Or, nous avons montré que l'enjeu de l'intégration de la composante énergétique à la conception architecturale se trouve dans la question de la *temporalité* des données : le concepteur a besoin d'instruments qui permettent de formuler, représenter, mesurer et vérifier une solution au même instant.

A partir de cette problématique nous avons dirigé la recherche vers la formulation d'un outil capable de coupler les informations relatives au *potentiel énergétique du site* et les caractéristiques matérielles d'un bâtiment. L'objectif est d'accompagner le processus *d'esquisse* du concepteur à travers un outil de nature *méthodologique*. L'objectif de cet outil est de donner des informations préalables au concepteur pour qu'il puisse construire, représenter et mesurer la performance du projet au fur et à mesure qu'il conçoit le projet.

L'outil est structuré à partir de trois composantes : la première, qui correspond à la *définition théorique de l'enveloppe*, permet de modifier les caractéristiques de l'enveloppe et des systèmes du bâtiment. La deuxième - déjà esquissée - permet de montrer la *structure du potentiel énergétique* à travers une représentation tridimensionnelle. La troisième correspond à la *modélisation volumétrique du projet* à travers un processus de représentation de la solution.

6.2.1. Définition théorique de l'enveloppe

6.2.1.1. Caractéristiques générales

Nous avons montré que la conception d'un projet performant passe par l'amélioration la qualité de l'enveloppe comme élément d'isolation ou comme élément capteur d'énergie. Ceci constitue la base de notre travail de recherche, dans la mesure où l'optimisation de cette enveloppe permet d'améliorer la performance globale du bâtiment. En effet, l'enveloppe constitue l'interface d'équilibre entre les gains et les déperditions de chaleur, mais aussi entre l'environnement intérieur et extérieur, déterminant ainsi l'ensemble des conditions de confort.

	Longueur
NORD	30.0 m
SUD	30.0 m
EST	12.0 m
OUEST	12.0 m
TOITURE	
Nb de niveaux	5
Total SHON	1800 m²

Epaisseur Mur	16 cm
Epaisseur Isolant	16 cm
Epaisseur des dalles	25 cm
Hauteur sous plafond	2.5 m
% Vitrages / Façade	25%
% Vitrages / Enveloppe	15%
% vitrage / SHON	17%

Données	
Hauteur par étage	2.8 m
Hauteur Bâtiment	13.8 m
Perimètre	84.0 m
Epaisseur des parois	32 cm
Volume	4500 m ³

Surface des façades	1155.0 m ²
Surface par niveau	360.0 m ²

Surface moy logements	65.0 m ²
Nb de logements	26

Total SHAB	1666 m²
-------------------	---------------------------

Rapport SHON/SHAB	0.83
Coeff correc	0.9

L'outil est constitué dans un premier temps par un tableau de données d'entrée que nous appellerons les *données source*. Ce tableau contient l'information relative aux caractéristiques physiques d'un bâtiment « virtuel », ou qui sont déterminées par le programme.

Ces données sont donc choisies aléatoirement comme hypothèses de calcul avant la première esquisse du concepteur et permettent de définir une *surface*, un *volume* et pourtant une *enveloppe* - qui servira de base pour établir un premier bilan thermique.

Les premières informations concernent donc les dimensions du bâtiment, l'orientation et les surfaces. On définit les caractéristiques des parois avec l'épaisseur de l'isolant. De plus, l'outil permet de définir le pourcentage de vitrage de la façade par niveau et par orientation. Cette donnée sera essentielle par la suite dans la définition de l'enveloppe.

		% vitrage en hauteur							
		RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	R+6	
26%		40%	35%	30%	20%	15%	10%		NORD
21%		60%	50%	45%	40%	35%	30%		SUD
37%		40%	35%	30%	25%	20%	15%		EST
24%		40%	35%	30%	25%	20%	15%		OUEST
24%									
0%		45%	39%	34%	28%	23%	18%	0%	

Figure 100. Données source de l'outil relatives aux dimensions et à l'enveloppe générale.

6.2.1.2. Caractéristiques de l'enveloppe

Les informations suivantes définissent la qualité de l'enveloppe et les systèmes. Ces informations correspondent aux choix du concepteur dans les phases de définition de la *matérialité* et des *systèmes*. Ainsi on définit la nature des matériaux, le type d'isolation, le type de vitrages, les systèmes de ventilation et de chauffage (Fig101).

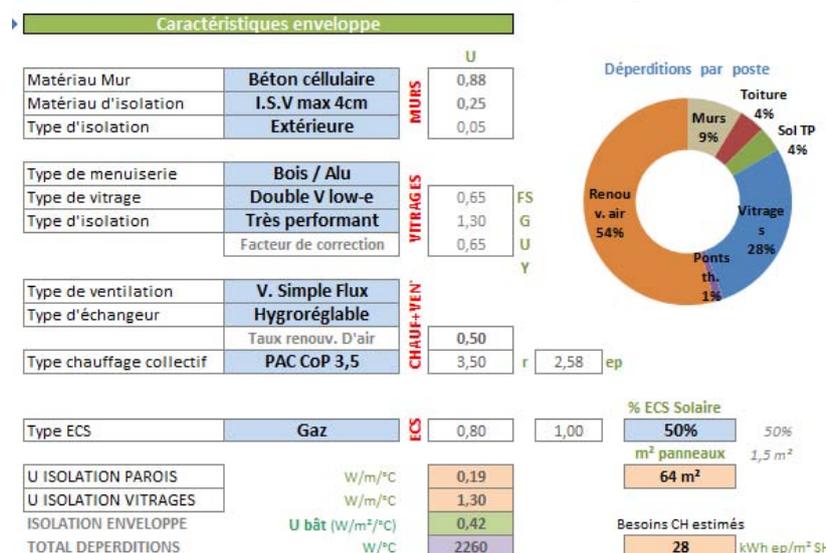


Figure 101. Données source de l'outil relatives aux caractéristiques de l'enveloppe.

Le concepteur définit ainsi un *coefficient de transmission thermique U* en (W/m²/°C) pour les parois, un *coefficient Ug* pour les vitrages. Le *facteur solaire* et le *facteur de correction* lié aux impuretés sont prédéterminés en fonction du type de vitrage. De plus, le taux de renouvellement d'air est établi en fonction de la disposition de l'enveloppe. Nous définissons également un système de chauffage en énergie primaire. A partir de ces informations nous pouvons établir les coefficients d'isolation des parois et le *coefficient Ubât* global, qui vont nous permettre de déterminer les déperditions totales de l'enveloppe (Fig.102).

Pertes par l'enveloppe		Surface	U	Déperditions	%		
Murs		866 m ²	X 0.23	= 201 W/K	23%		
Toiture		360 m ²	X 0.23	= 84 W/K	10%		
Sol TP		360 m ²	X 0.23	= 84 W/K	10%		
Vitrages		289 m ²	X 1.30	= 375 W/K	43%		
Ponts th.		504 ml	X 0.25	= 126 W/K	14%		
TOTAL ENVELOPPE		1875 m²		870 W/K			
Pertes par renouvellement d'air							
Renouv. air		2250 m ³ /h	X 0.34	765 W/K			
Pertes par paroi		U Mur	U Vitrage	S. Mur	S. Vitrage	Déperditions	%
Paroi Nord		0.23	1.30	X 330 m ²	83 m ²	= 221 W/K	25%
Paroi Sud		0.23	1.30	X 289 m ²	124 m ²	= 265 W/K	31%
Paroi Est		0.23	1.30	X 132 m ²	33 m ²	= 89 W/K	10%
Paroi Ouest		0.23	1.30	X 116 m ²	50 m ²	= 106 W/K	12%
Toiture		0.23	1.30	X 360 m ²	0 m ²	= 84 W/K	10%
Sol		0.23		X 360 m ²		= 105 W/K	12%
TOTAL PAROIS				866 m²	289 m²	870 W/K	

Figure 102. Tableaux de déperditions par l'enveloppe et par renouvellement d'air.

6.2.1.3. Calcul des déperditions

Le calcul des déperditions (Fig.102) est basé sur les principes de calcul évoqués dans § 4.1.2. Ainsi les coefficients de transmission *de transmission thermique* U sont calculés à d'après la relation :

$$\text{Si } R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{donc,} \quad R = \Sigma \frac{e}{\lambda} + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad (18)$$

Avec $h_i = 0,125 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ et $h_e = 0,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$.

$$\text{Or, } U = \frac{1}{R} \quad \text{soit,} \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \Sigma R + \frac{1}{h_e}} \quad (19)$$

Les déperditions surfaciques sont calculées d'après

$$Ds = U \times S \times \Delta T \quad (20)$$

Soit Ds en ($\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$), U en ($\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$), la surface S de la paroi en (m^2) et ΔT en (°C).

Les premiers calculs montrent les déperditions surfaciques en (W/K) fonction de l'orientation des parois et du niveau des étages. Ces résultats seront utiles pour évaluer les apports énergétiques postérieurement.

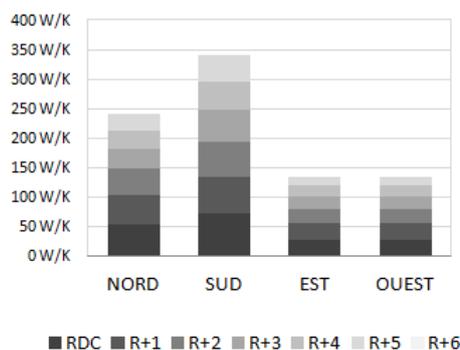


Figure 103. Déperditions surfaciques des parois par orientation et par niveau.

Les déperditions linéiques sont prises en compte avec des coefficients $k = 0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ pour une isolation à l'intérieur, $k = 0,18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ pour une isolation *repartie* et $k = 0,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ pour une isolation par l'extérieur.

Les déperditions par renouvellement d'air Hv sont prises en compte d'après la relation :

$$Hv = qv \times 0,34 \times \Delta T \quad (22)$$

Les valeurs du taux de renouvellement d'air varient entre : 0,7 V/h pour une ventilation naturelle, 0,5 pour une ventilation hygroréglable et 0,14 V/h pour une ventilation double flux. A partir de ces calculs il est possible d'estimer la répartition des déperditions par poste :

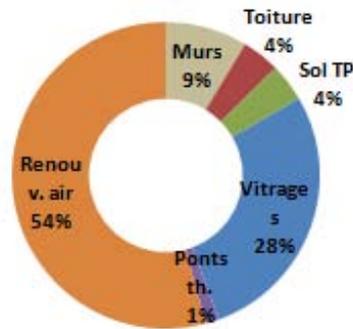


Figure 104. Répartition des déperditions en pourcentage

L'outil permet de visualiser les différents paramètres sur un même écran, afin d'observer l'impact de chaque décision concernant les dimensions, l'orientation, la morphologie, la matérialité ou les systèmes du bâtiment. Il faut remarquer l'importance dans la définition du taux de vitrage par niveau, ce qui constituera par la suite un instrument de valorisation des apports énergétiques externes.



Figure 105. Ecran des paramètres de la première phase de l'outil de conception

6.2.2. Structure du potentiel énergétique

La deuxième composante de l'outil de conception correspond à la définition du *potentiel énergétique* comme élément d'optimisation de la performance énergétique. Ce potentiel permet de définir une enveloppe comme élément capteur ou générateur d'énergie.

L'enveloppe définit la limite entre l'intérieur et l'extérieur, joue le rôle d'abri et détermine la morphologie du bâtiment. Le développement des nouvelles technologies permet aujourd'hui d'intégrer des surfaces pour capter de l'énergie que nous appellerons des « surfaces actives » (photovoltaïque). Les bâtiments performants utilisent ces éléments pour produire de l'énergie tout en réduisant ses besoins, mais une fois que la technique permettra d'augmenter le rendement des capteurs et d'intégrer définitivement les surfaces actives aux matériaux de l'enveloppe, la peau d'un bâtiment sera « intelligente ». Elle devra être capable de s'adapter à son environnement et de modifier ses caractéristiques pour optimiser son rapport avec l'extérieur : une enveloppe *mutable*. Pour l'instant, nous abordons cette question du point de vue du *potentiel énergétique*, raison pour laquelle nous avons développé une méthodologie d'optimisation de l'enveloppe dans les premières phases de la conception d'un bâtiment.

Sachant qu'un volume dans l'espace est en interaction avec son environnement parmi des échanges thermiques, l'objectif est d'utiliser le potentiel *passif* du contexte urbain pour modéliser une « enveloppe théorique » capable d'équilibrer les gains et les déperditions énergétiques du bâtiment. En principe, cette enveloppe n'est jamais la même. Elle change en fonction de l'environnement et du climat car les apports solaires passifs varient en fonction du rayonnement incident sur un volume. Il est donc question de prendre en compte des périodes d'étude plus longues dans l'année et de moyenner les résultats.

Les conditions climatiques et les effets de masque des bâtiments voisins vont modifier sensiblement le niveau d'irradiation solaire en impactant directement sur le potentiel énergétique *passif* de la parcelle. Il est possible de définir une morphologie optimale à partir de la représentation de ce potentiel en couplant les informations du contexte avec les différents paramètres de la composition des bâtiments : les dimensions, l'orientation, la composition de l'enveloppe et les systèmes.

6.2.2.1. Calcul des apports énergétiques externes

Les apports énergétiques sont calculés à partir de deux bases de données : la première correspond à la base d'irradiation solaire¹¹⁶ pour chaque ville d'étude, la deuxième est constituée par la base de données des températures.

L'outil permet de choisir la période de calcul par mois. Ainsi à partir de la première base nous obtenons une valeur d'irradiation totale en kWh/m²/an pour la période de calcul donnée (Fig.106). La deuxième nous permet d'établir une base de *degrés jours unifiés*¹¹⁷ (DJU) pour une température de référence choisie, (dans ce cas 19°C en hiver et 25°C en été). Nous pouvons définir ainsi une base de *degrés heure unifiées* par an, qui serviront pour calculer les besoins de chauffage ou rafraîchissement du bâtiment.

		Période de calcul				
Sélectionnez mois		HORIZONTAL	NORD	SUD	EST	OUEST
J	Jan	33	10	63	21	24
F	Feb	46	14	61	29	29
M	Mar	86	23	84	53	53
A	-	-	-	-	-	-
M	-	-	-	-	-	-
J	-	-	-	-	-	-
J	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-
O	Oct	67	19	85	43	43
N	Nov	33	11	49	21	21
D	Dec	25	8	48	17	17
1139		290	86	391	185	187
kWh/m ² /an						

Figure 106. Outil de sélection de la période de calcul

Nous avons calculé les déperditions pour chaque paroi en fonction de son orientation en (kWh ep/m² SHON/an¹¹⁸), pour les comparer avec les niveaux d'irradiation solaire relevés sur le site en (kWh/m²/an). A partir de cet exercice de définition des gains et des pertes nous pouvons réaliser un *bilan énergétique*. Ce constat constitue le point central de notre recherche, car il nous a permis de formuler l'hypothèse suivante : le bâtiment peut prendre forme à partir de l'analyse des données environnementales. En d'autres termes, l'enveloppe pourrait se construire comme un tissu à partir d'un bilan énergétique par paroi.

¹¹⁶ Source : SATEL - LIGHT

¹¹⁷ Le nombre de degrés jours unifiés (DJU) est déterminé en faisant la différence entre la température de référence (19°C) et la moyenne de la température extérieure médiane de la journée. Les DJU permettent de réaliser des estimations de consommations d'énergie en fonction des conditions climatiques.

¹¹⁸ kWh ep : Kilo Watts heure en énergie primaire.

6.2.2.2. Bilan énergétique

L'idée de la construction d'un tissu d'enveloppe à partir du bilan énergétique par paroi est essentiellement théorique, dans la mesure où il s'agit de trouver de la stabilité dans un système en déséquilibre. Une fois sont calculées les déperditions et les apports solaires externes, il est possible de porter un regard plus détaillé sur l'enveloppe comme élément capteur et producteur d'énergie. Nous nous sommes donc intéressés à comparer les gains et les pertes énergétiques par paroi et par étage (Fig.107).

	RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	R+6	
Paroi Nord	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	1.5 kWh/m ²
Paroi Sud	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	10.2 kWh/m ²
Paroi Est	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	1.5 kWh/m ²
Paroi Ouest	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	2.0 kWh/m ²
Apports solaires / niveau	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	15.0 kWh/m ² kWh/m ² SHON/an

	RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	R+6	
Paroi Nord	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	3.5 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Sud	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.0	0.0	8.1 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Est	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	1.4 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Ouest	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	1.7 kWh ep/m ² SHON/an
Ueperditions / niveau	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	0.0	0.0	10.6 kWh/m ² kWh ep/m ² SHON/an

	RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	R+6	
Paroi Nord	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.0	0.0	-2.0 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Sud	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.0	0.0	6.1 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Est	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1 kWh ep/m ² SHON/an
Paroi Ouest	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3 kWh ep/m ² SHON/an
Bilan energie / niveau	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.0	0.0	4.3 kWh ep/m ² SHON/an

Figure 107. Bilan énergétique par paroi et par étage d'un bâtiment

Dans ce cas nous avons comparé les valeurs en kWh/m² en utilisant un code de couleurs : *vert* pour un équilibre énergétique positif, et *rouge* pour un équilibre énergétique négatif (Fig.109). Bien que le comportement thermique d'un bâtiment soit global, cette méthode nous permet de localiser les points du bâtiment où l'équilibre énergétique ne serait pas garanti. Il est ainsi possible d'étudier le pourcentage d'ouvertures pour une orientation donnée : c'est le premier pas pour esquisser une volumétrie à partir du potentiel du site.

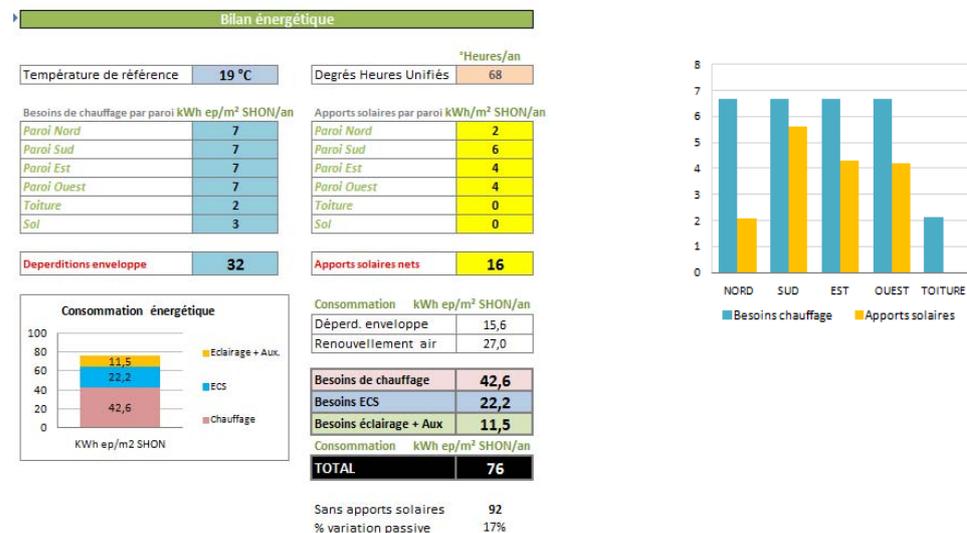


Figure 108. Bilan énergétique de l'outil de conception par orientation

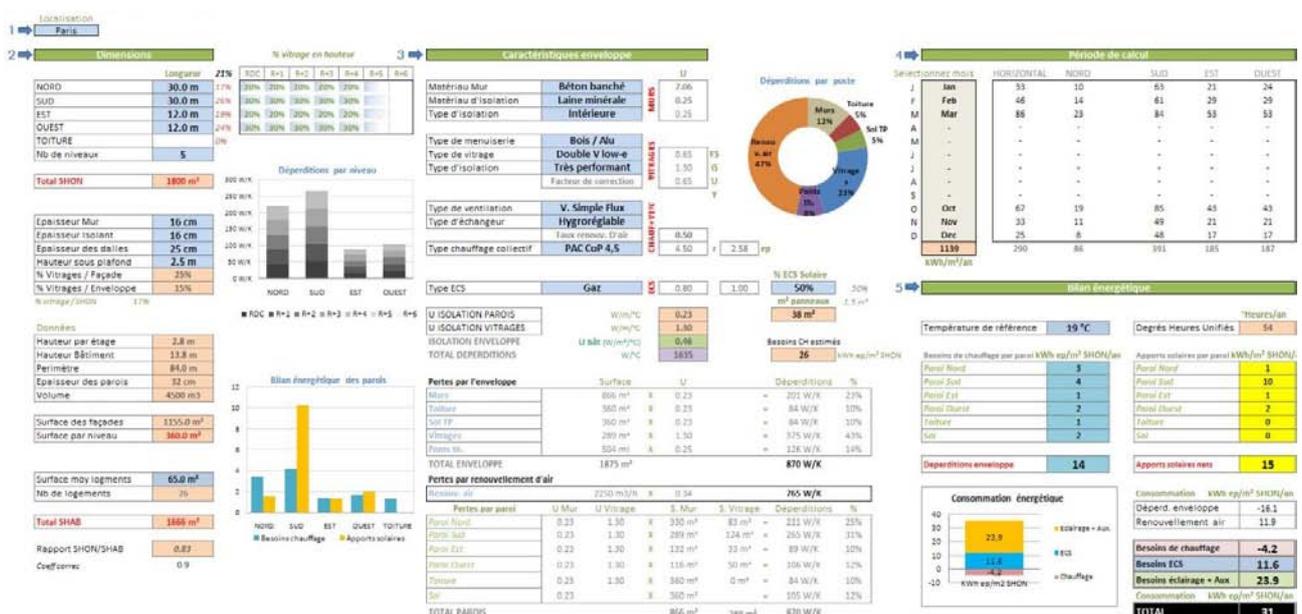
6.2.2.3. Configuration générale

Nous avons construit la première partie d'un outil simple qui permet à l'architecte d'aborder les principales problématiques du bâtiment dans une optique de performance énergétique.

Dans un premier temps, il permet de *mesurer* la consommation énergétique du bâtiment. Il nous montre les consommations prévisionnelles en fonction de la qualité de l'enveloppe et de la performance des systèmes, pour une température de confort donnée. Ceci permet au concepteur de comprendre la dimension énergétique du bâtiment avant de formuler une esquisse. Nous pourrions faire référence à la phase de *définition du problème* évoqué dans le deuxième chapitre §2.1.1.1 [Simon, 1973].

Dans un deuxième temps, il permet de manipuler les données, notamment pour modifier les dimensions du bâtiment et le pourcentage d'ouvertures, afin de valider une première esquisse. Le concepteur reprendra plusieurs fois la solution pour reformuler le problème de façon itérative. Nous ferons ainsi référence aux processus de *formulation de la solution* à partir de l'énoncé du problème §2.1.1.2 [Prost, 1992].

Dans un troisième temps l'outil nous montre les conditions d'équilibre énergétique de chaque partie de l'enveloppe avec l'extérieur. Nous pourrions visualiser la capacité de différentes parties du bâtiment à s'adapter aux conditions du contexte. Toutefois, il est question d'étudier la question de la représentation de la forme dans l'espace à partir de ce principe.



6.2.3. Modélisation volumétrique

Nous avons montré dans §6.1.3.4 qu'il était possible de faire une représentation tridimensionnelle du potentiel du site. En outre, nous pouvons établir le bilan énergétique de chaque paroi d'un bâtiment « virtuel » en fonction de l'orientation et l'étage où elle est localisée. Nous avons donc procédé à coupler ces informations à partir d'une représentation tridimensionnelle de l'espace.

6.2.3.1. Représentation du potentiel

Pour chaque site étudié, nous avons modélisé les conditions de l'environnement : ses aspects climatiques, les aspects urbains et la matérialité des espaces. Nous pouvons établir une première image de l'environnement soumis à des conditions d'ensoleillement pour une période donnée. A partir de ce modèle, nous simulons les conditions d'irradiation solaire de cet environnement pour la même période à partir d'une grille en trois dimensions qui permet de mesurer tous les points de l'espace de la parcelle en à partir de plusieurs plans en x, y z (Fig.110).

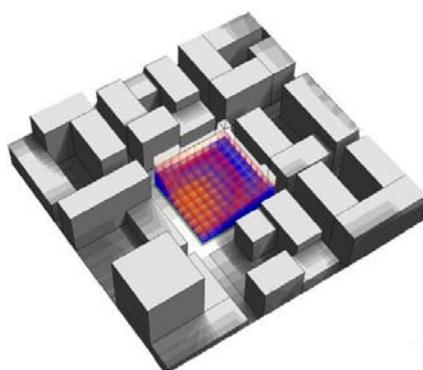


Figure 110. Simulation de l'irradiation solaire dans un contexte urbain.

Nous obtenons ainsi plusieurs *sections* superposées qui peuvent être comparées à partir de la même échelle et qui expriment le potentiel énergétique dans l'espace, en Wh/ m². (Fig.111).

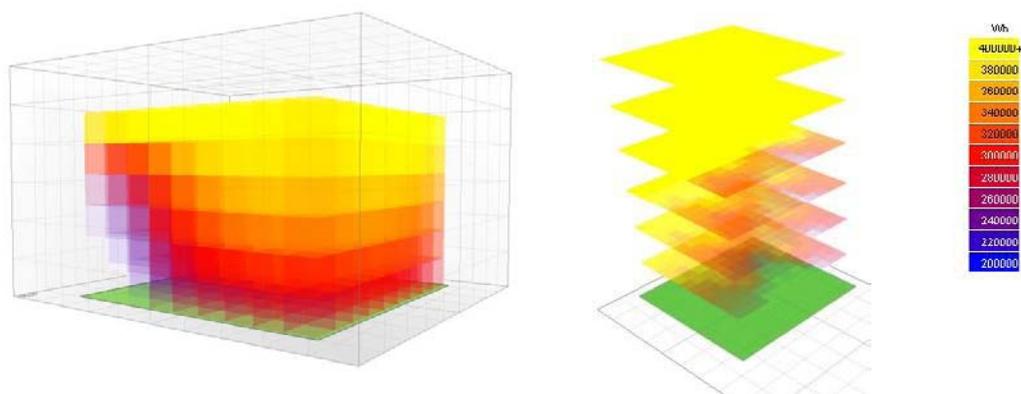


Figure 111. Représentation des plans de mesure de l'irradiation solaire

6.2.3.2. Transposition des données

Afin de coupler les simulations de l'irradiation solaire avec l'outil proposé, nous avons intégré les mesures aux *donnés source*. Les niveaux d'irradiation relevés à différentes hauteurs sont transposés à une base de données qui contient toutes les valeurs relevées (en Wh/m²) pour chaque point de la parcelle à différentes hauteurs (Fig.112)

	RDC (0.00m)										kWh/m ² /an									
1	252	247	240	230	166	154	149	147	146	146	147	149	154	171	243	251	261	266	274	
2	254	249	244	234	193	172	163	161	159	157	159	161	165	178	204	247	254	262	274	
3	255	251	246	238	211	190	177	173	170	170	171	176	183	198	220	250	257	263	269	
4	257	254	250	241	222	202	192	195	193	191	194	199	195	212	235	253	260	265	271	
5	260	256	253	245	229	214	205	197	194	195	197	200	211	222	232	257	264	267	273	
6	263	260	256	249	236	225	213	209	207	205	208	215	222	232	243	260	267	270	276	
7	265	262	259	253	243	236	223	220	219	217	221	224	230	243	250	263	269	271	279	
8	268	265	261	257	250	241	233	228	228	227	229	233	237	250	257	267	271	274	280	
9	269	267	265	261	254	247	242	234	234	236	237	239	245	257	261	270	275	276	282	
10	272	271	269	266	259	253	250	243	244	244	247	247	253	261	265	273	277	279	285	
11	275	273	271	268	263	257	255	254	248	249	251	252	261	264	268	275	280	281	287	
12	277	277	274	272	266	263	261	258	256	255	257	258	266	270	271	278	282	283	289	
13	280	279	277	275	269	269	267	264	260	260	260	265	273	273	275	280	284	284	291	
14	282	281	279	277	272	270	270	268	268	262	263	271	276	277	278	283	286	286	293	
15	285	284	282	279	278	277	274	276	272	269	268	275	280	280	282	286	290	289	294	
16	288	289	286	285	282	281	277	276	276	273	274	279	284	285	286	290	293	293	294	
17	293	293	290	290	287	284	283	284	283	280	281	284	286	287	290	294	294	295	296	
18	294	295	293	291	291	290	287	288	287	284	286	288	289	291	294	295	296	296	297	
19	296	296	295	294	293	293	291	290	290	289	289	291	290	293	295	297	299	297	299	
20	298	299	295	295	294	296	294	292	291	292	292	294	293	294	297	300	299	300	301	
(m)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figure 112. Relevé des valeurs d'irradiation du site pour le niveau RDC.

A partir de cette base de données, l'outil fait un bilan énergétique en fonction des déperditions du bâtiment « virtuel » § 6.2.1.1 dont ses caractéristiques ont été définies préalablement. En comparant les *gains énergétiques* par irradiation solaire sont et les déperditions par l'enveloppe théorique dans chaque point, l'outil colorie (en vert) les points dans l'espace dont le bilan énergétique est positif (Fig.113).

L'outil dessine ainsi des « empreintes énergétiques » pour chaque étage. Nous obtenons ainsi une « cartographie » qui exprime le bilan énergétique positif dans chaque niveau. Contrairement à la définition du *potentiel énergétique du site* § 6.1.3.4, ces images suggèrent le début d'une *morphologie performante* du bâtiment.

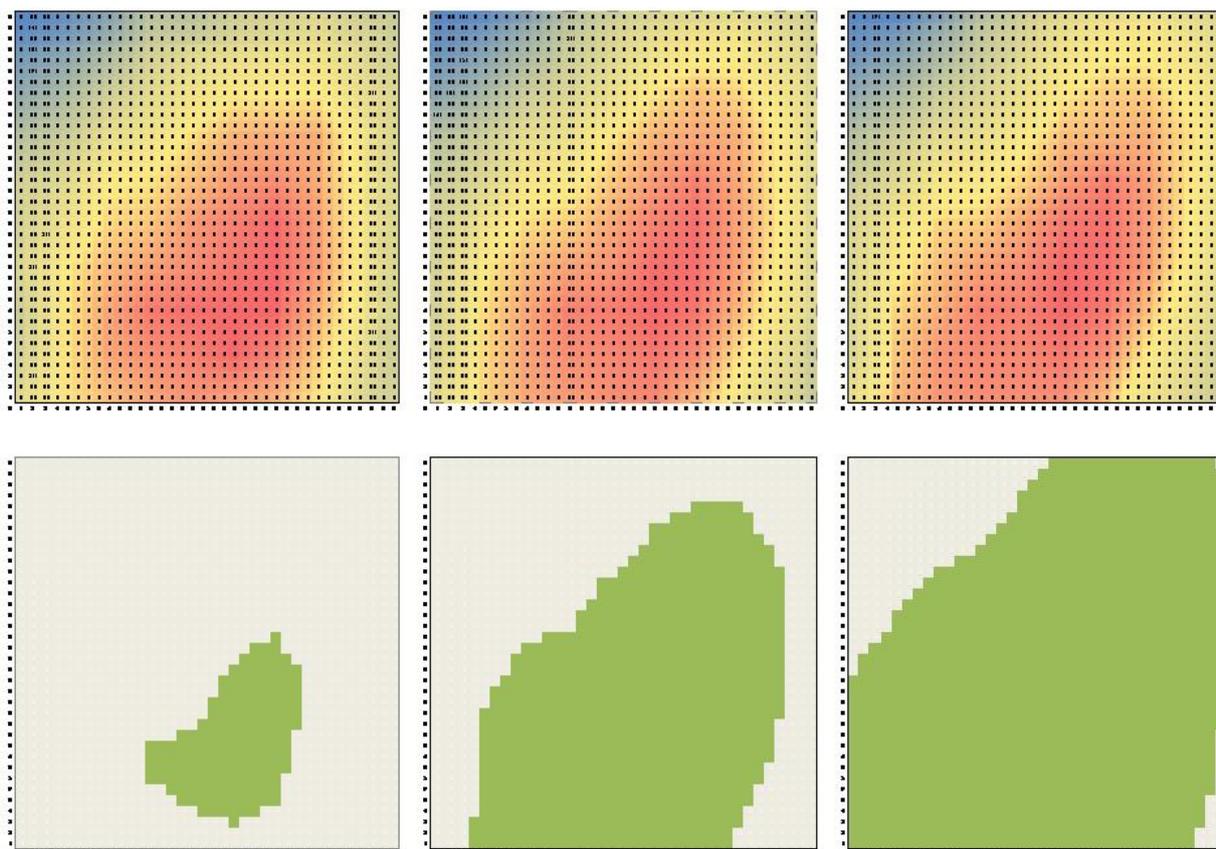


Figure 113. Bilan énergétique des points dans l'espace pour les niveaux RDC, R+2, R+4

La représentation des « empreintes » du potentiel énergétique pour chaque étage en plan et en section, permettent de comprendre graphiquement l'influence de l'environnement externe sur les conditions d'ensoleillement de la parcelle. A partir des « empreintes » en plan et en coupe, il est possible de modéliser « l'objet architectural ».

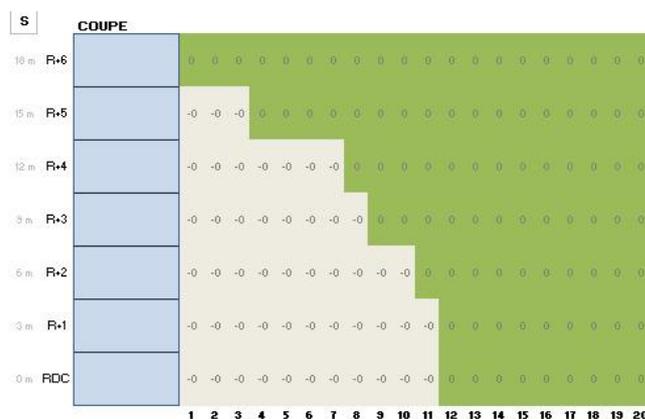


Figure 114. Représentation en coupe du bilan énergétique

6.2.3.3. Modélisation de la forme

En superposant les différentes couches, nous obtenons ainsi la *forme* mieux adaptée au site d'un point de vue énergétique. Cette approche morphologique traduit la capacité d'un bâtiment à utiliser les ressources de l'environnement – dans ce cas l'énergie solaire - au maximum. D'un point de vue théorique, tous les points de l'espace qui ont un bilan énergétique positif sont potentiellement constructibles : l'enveloppe dessinée est capable de produire un surplus d'énergie et représente la forme plus performante d'un point de vue thermique (Fig.115).

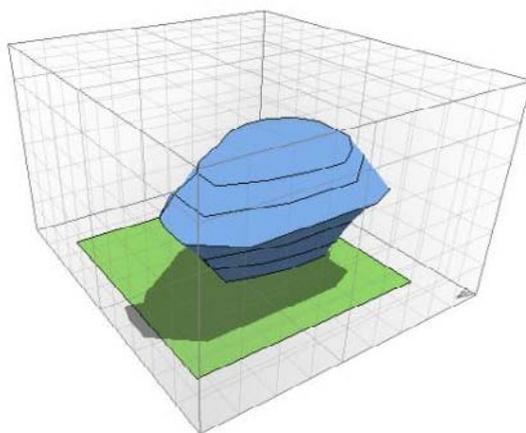


Figure 115. Représentation de la morphologie énergétiquement performante.

La forme obtenue traduit une problématique commune aux bâtiments dans les environnements urbains denses. La partie basse du volume est peu ensoleillée et par conséquent elle mobilise plus d'énergie pour l'éclairage artificiel. Les parties hautes sont bien ensoleillées, exposées à l'irradiation solaire directe et aux risques de chauffage. Il serait donc pertinent d'inverser les flux et d'utiliser l'énergie thermique captée en partie haute pour chauffer la partie basse du bâtiment. Inversement, la taille des ouvertures devrait être plus importante en partie basse pour bénéficier de l'éclairage naturel et moins importante en partie haute afin de contrôler les apports solaires directs.

Nous avons procédé à dessiner cette enveloppe en la traduisant cette morphologie dans un langage architectural, intégrant ainsi les caractéristiques de l'enveloppe et le pourcentage d'ouvertures. On a soumis ces informations à une équipe d'architectes qui les a pris en compte dans l'ensemble de leur démarche. Les concepteurs ont réalisé leur propre travail de synthèse et ont formulé un projet en concordance avec la réglementation urbaine prescrite. Ils ont donc superposé le dessin de leurs intentions de projet avec les images de l'outil.

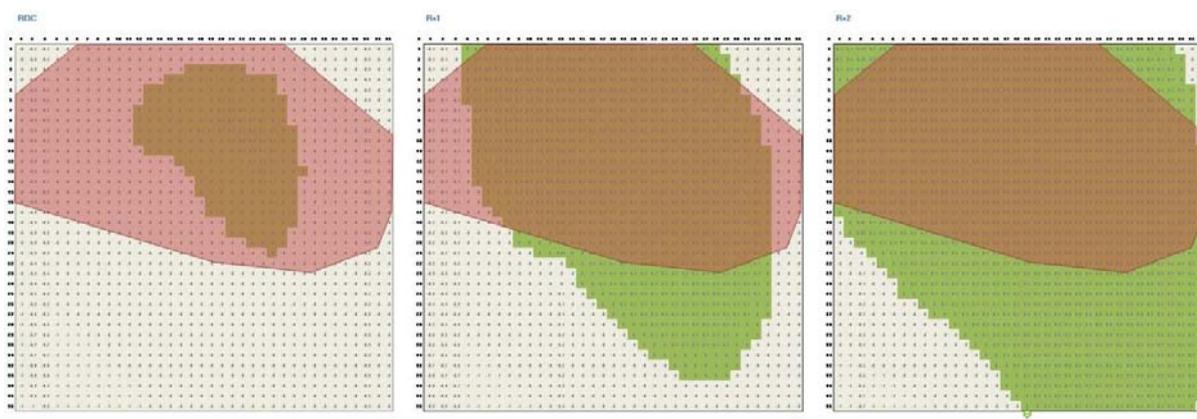


Figure 116. Superposition de l'implantation formulée par les concepteurs et les dessins de l'outil.

Il est important de remarquer que l'architecte peut s'écarter de la volumétrie proposée par le logiciel (Fig.116) à partir de considérations urbaines ou architecturales. Aucune forme ne le lui est imposée, laissant la place à la création architecturale et au développement de nouveaux concepts. Toutefois il est possible de calculer l'impact énergétique dans l'écart entre la forme proposée et la forme projetée.

Le projet résultant utilise l'information fournie par l'outil méthodologique concernant l'optimisation de l'orientation, de l'enveloppe et du dimensionnement des ouvertures. Le pourcentage de vitrages par niveau est adapté en fonction de la hauteur et de l'ensoleillement de chaque façade et les ouvertures sont dimensionnées en fonction de la quantité de lumière disponible (Fig.117).

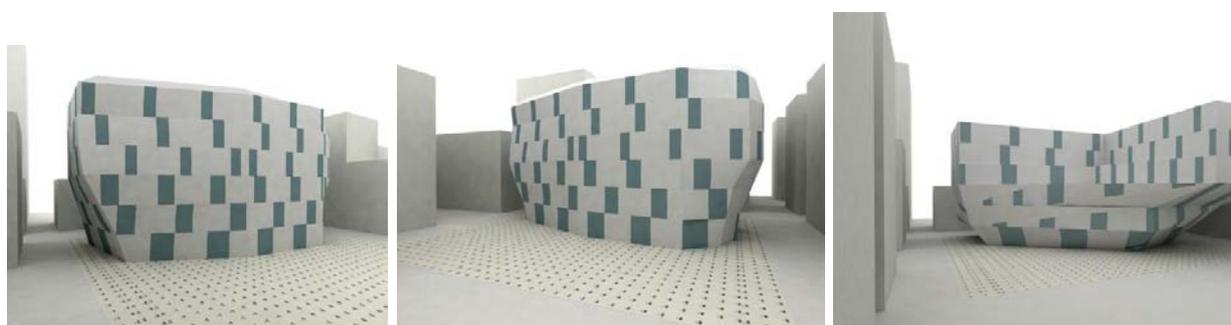


Figure 117. Représentation architecturale des informations fournies par l'outil méthodologique.

La méthodologie proposée permet de faire une approche morphologique à la performance énergétique. Cependant compte tenu de la simplification de l'outil, celui-ci a des limitations. Il est question maintenant d'analyser les résultats obtenus et l'évolution de l'outil.

6.3. Evaluation de l'outil

Nous avons développé cet outil méthodologique à partir du principe de valorisation du potentiel d'énergie solaire dans un site. Ce potentiel permettrait d'optimiser la performance énergétique à partir de la *forme* architecturale. Il est question d'évaluer l'outil par rapport aux attentes du *concepteur*, aux *résultats* obtenus et aux *évolutions* en tant qu'instrument de conception.

6.3.1. Evaluation de l'outil et des résultats

La construction de l'outil méthodologique a pris en compte un grand nombre d'aspects propres à la conception d'un projet architectural à l'échelle de l'objet architectural et à l'échelle de l'environnement. Concernant l'objet, l'outil permet au concepteur de modifier la composition du projet en termes d'implantation, morphologie, matérialité et systèmes. Ainsi il est possible de modifier la volumétrie, l'orientation, la composition des parois et les systèmes. Du point de vue environnemental, il permet d'intégrer l'ensemble d'aspects climatiques, et urbains à travers la définition des conditions du paysage et des énergies renouvelables.

6.3.1.1. Les modes d'utilisation

Cet instrument simplifié permet aux architectes d'intégrer les différents aspects de la composante énergétique à la conception du projet architectural. D'après les expériences relevées en agence, malgré sa faible ergonomie l'outil fournit des informations claires sur la performance thermique de l'enveloppe et sur la performance énergétique globale.

Le concepteur peut ainsi anticiper dans la phase esquisse - sans passer par des calculs - des questions techniques qui étaient réservées à la phase de définition des systèmes du projet. Ceci constitue un atout majeur, car la temporalité du dialogue entre architectes et ingénieurs pour valider une solution, est réduite à la manipulation d'un instrument en temps réel. Ces manipulations sont de l'ordre de l'évaluation d'une solution à partir de plusieurs critères, soit la définition d'une solution *non unique*. En effet, traditionnellement la première préoccupation dans la conception énergétique d'un bâtiment est d'atteindre la performance énergétique à partir de l'amélioration de l'enveloppe ou de l'amélioration des systèmes. Les critères étant diverses il est possible d'obtenir la même performance avec des configurations matérielles ou systémiques différentes.

6.3.1.2. La représentation des images

La question de la représentation reste essentielle. La visualisation morphologique du potentiel énergétique permettrait au concepteur de mieux appréhender ses problématiques et les rendrait accessibles à leur résolution à travers d'autres images – concept. Cependant, elle imposerait la vision *iconique* décrite par Kosslyn à propos du rôle de l'image dans la résolution du problème [Kosslyn, 1980]. En d'autres termes, le concepteur aurait des difficultés pour se détacher de l'image proposée par l'outil de conception.

La question de la représentation dans le processus de conception serait également bouleversée. Les nouvelles formes de représentation morphologiques agiraient sur les trois aspects relatifs à la représentation des images (§2.2.2.2): le caractère *isomorphique* de l'idée/objet, la forme de construction des *images mentales* et leur *plasticité*.

Le rôle fonctionnel de l'image dans la résolution du problème [Carroll, Thomas, Malhotra, 1980] serait ainsi modifié. Le concepteur n'aurait plus recours à la démarche de représentation figurative qui lui permet de comparer plusieurs hypothèses.

6.3.1.3. Les limites de l'outil

La simplification de l'outil présuppose des limitations, notamment en ce qui concerne les données d'entrée. Tout d'abord, l'outil ne permet pas d'évaluer des géométries plus complexes : l'approche veut que le concepteur fasse un processus préalable de synthèse pour simplifier le modèle, mais elle ne permet pas d'analyser tous les cas possibles. Les architectures évoluent vers des nouvelles formes qui, étant complexes, ne peuvent pas être modélisées dans une première phase.

En outre, la simplification impose des calculs de performance dans un régime permanent, non dynamique. Les temps de calcul pour un régime dynamique sont plus longs et doivent intégrer un grand nombre de variables. Bien que l'outil utilise comme source des données météo journalières, il ne prend pas en compte les plages d'occupation horaire, les heures de fonctionnement des systèmes CVC, ou l'inertie des matériaux.

Certes le comportement thermique du bâtiment ne peut pas être étudié finement, mais ceci est un choix de recherche car l'outil a été conçu pour faire une approche méthodologique à la morphologie d'un point de vue énergétique et non pas du point de vue du confort, même si ces deux questions sont étroitement liées.

6.3.1.4. Evaluation des résultats

Les calculs de performance thermique et de consommation énergétique sont basés sur un bilan thermique simplifié en régime permanent. Cependant nous avons comparé les résultats avec le logiciel de simulation thermique dynamique (STD) *Design Builder*¹¹⁹ afin de vérifier la fiabilité de l'outil.

6.3.1.4.1. Comparaison des outils en régime permanent et dynamique

Dans un premier temps, nous avons comparé une typologie avec 3 pourcentages de vitrages différents. Le modèle étudié correspond à un bâtiment en R+5 avec 10%, 20% et 50% de vitrage (Fig.118).

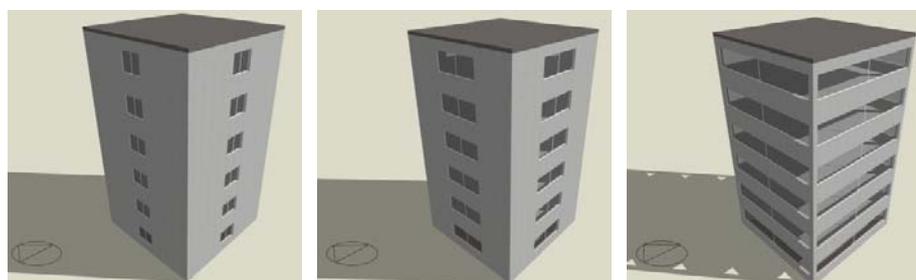


Figure 118. Modèles d'étude en simulation thermique dynamique.

Les hypothèses de calcul établies sont les suivantes :

MATERIAUX		SYSTEMES		USAGES	
Murs	0,26 W.m2.k	Chauffage	NON	Consigne de température	19 °C
Laine de roche	13 cm	COP Chauffage	0	Eclairage général	5 W/m2
Béton	12 cm	Rafraichissement	NON	Eclairage d'appoint	0 W/m2
Placard Plâtre	3 cm	CoP Rafraichissement	0	Control éclairage	NON
Toiture	0,22 W.m2.k	ECS	65 °C	Gain Ordinateurs	2 W/m2
Sol	0,24 W.m2.k	Type Ventilation	Naturelle	Miscellaneous	2 W/m2
Vitrages	1,50 W.m2.k	Débit ventilation	2,0 V/h	Equipement bureaux	0 W/m2
Taux vitrage	10%	Infiltration air	0,5 V/h	Cuisson	5 W/m2

Figure 119. Hypothèses de calcul en STD.

Nous avons simulé le comportement thermique du bâtiment afin d'établir les déperditions énergétiques par poste, les besoins de chauffage, les apports internes et les gains par irradiation solaire. Ces données nous permettront d'établir un bilan énergétique pour chaque cas d'étude.

¹¹⁹ Design Builder est un logiciel qui permet de calculer la performance énergétique, le bilan carbone, l'éclairage et le confort d'un bâtiment. Cet outil est conçu pour simplifier le processus de simulation de bâtiment, en comparant la performance des bâtiments et en produisant des résultats rapidement.

Cas d'étude A (10% vitrage) :

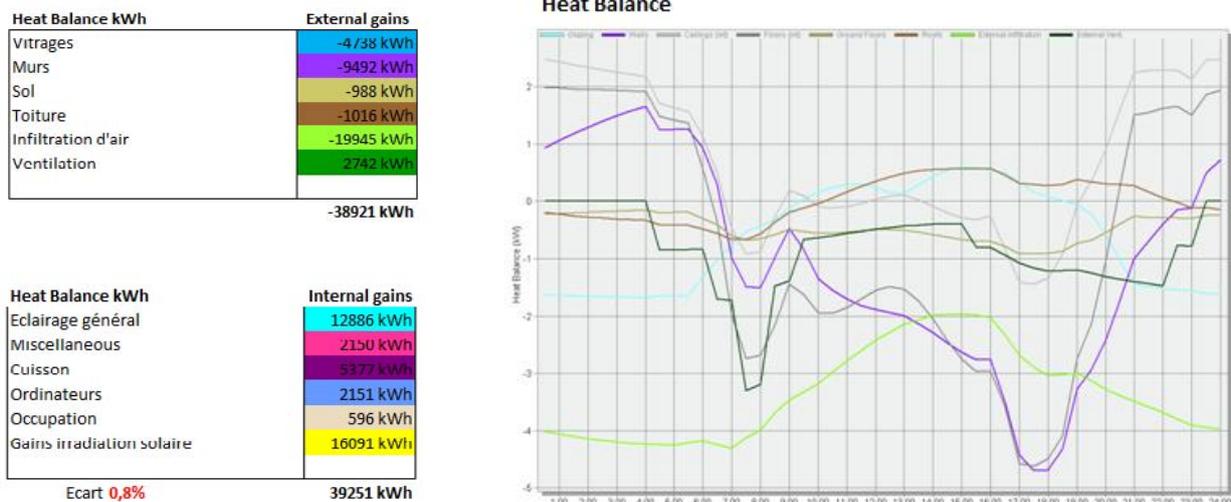


Figure 120. Cas A : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.

Les estimations en termes d'apports et déperditions énergétiques entre les outils sont semblables. Dans le cas du bâtiment à faible pourcentage d'ouvertures (10%), l'équilibre entre les gains et les déperditions d'énergie est atteint : l'écart est de 0,8% (Fig.120). Cependant, si on observe attentivement la question de l'enveloppe, on constate que les *apports solaires* représentent la moitié de la quantité d'énergie équivalente en déperditions.

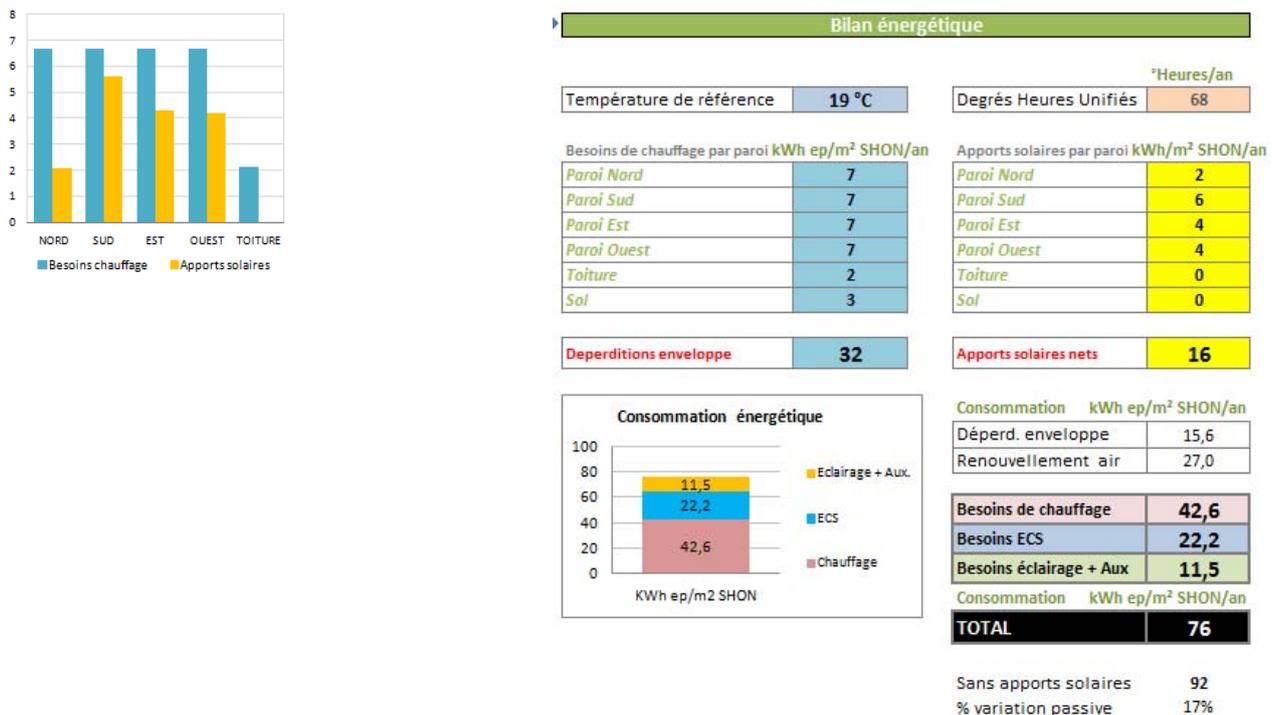


Figure 121. Cas A : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.

Cas d'étude B (20% vitrage) :

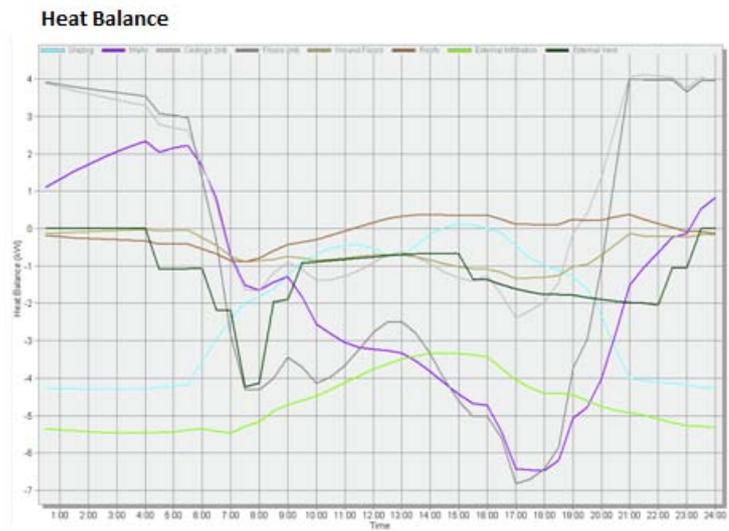
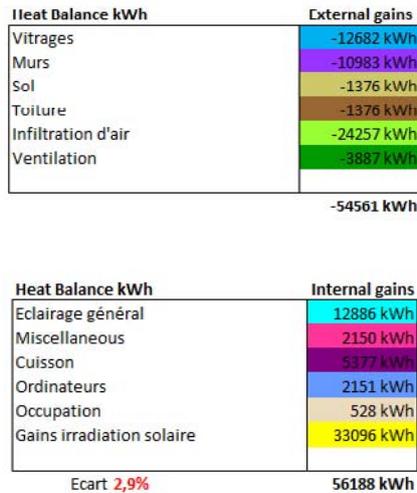


Figure 122. Cas B : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.

Dans le deuxième cas d'étude, l'estimation des apports solaires nets est la même pour les deux outils. L'estimation des déperditions énergétiques varie légèrement : 54,5 kWh pour la STD (Fig.122), et de 66 kWh (39+27,0) pour l'outil proposé (Fig.123). A noter qu'en dessous de 20% de vitrage, les apports externes sont inférieurs aux déperditions et que le pourcentage d'ouvertures ne fait pas varier les apports internes en éclairage artificiel pour la STD.

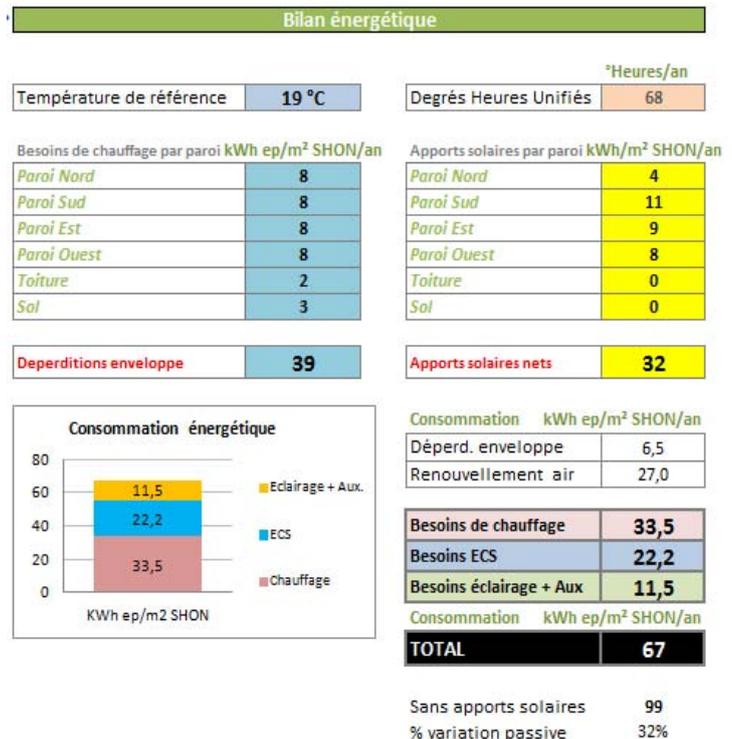
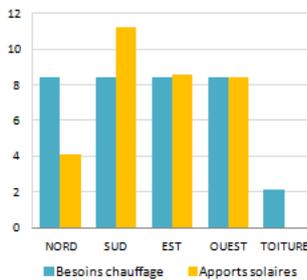


Figure 123. Cas B : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.

Cas d'étude C (50% vitrage) :

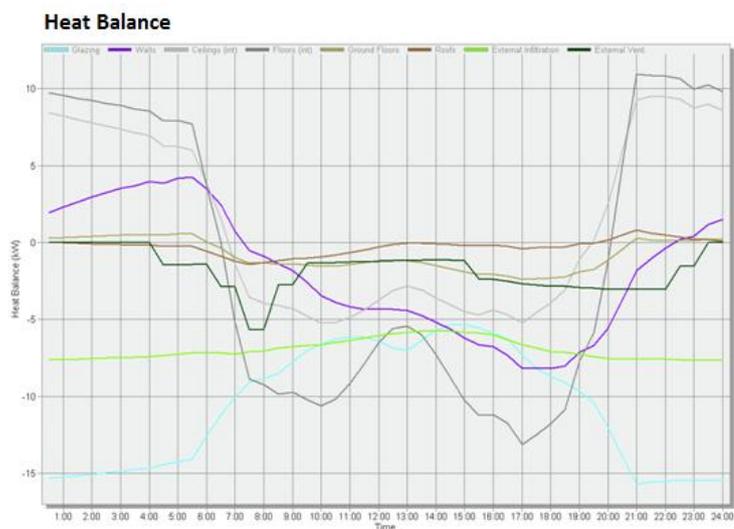
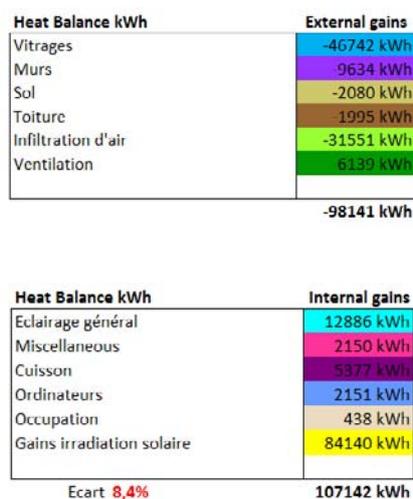


Figure 124. Cas C : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.

Dans le cas d'un bâtiment avec 50% d'ouvertures, les résultats en termes d'apports solaires nets et de déperditions par l'enveloppe sont presque identiques. Les gains par irradiation sont de 81 kWh pour la STD et 84 kWh pour l'outil. Les déperditions par l'enveloppe sont équivalentes à 60,4 kWh pour la STD (*vitrages + murs + sol + toiture*) et de 60 kWh pour l'outil de conception.

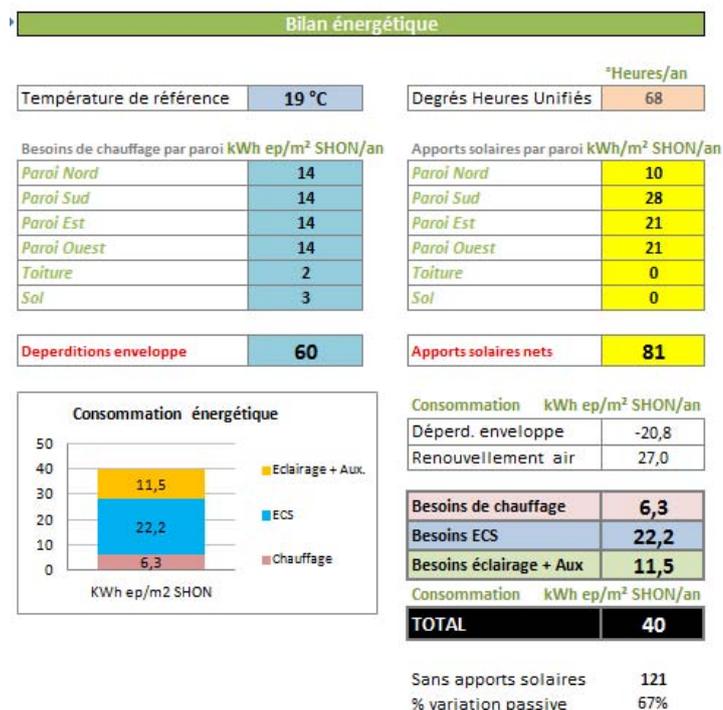
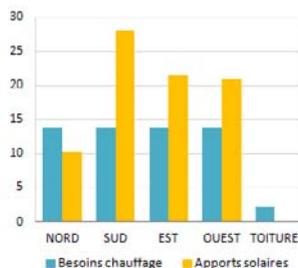


Figure 125. Cas C : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.

Les mesures relevées montrent à grands traits, une concordance entre les outils en régime *permanent* et *dynamique*. Or il est important de remarquer plusieurs aspects.

Dans un premier temps, l'estimation des pertes énergétiques est sont fiable. Cependant quelques apports internes liés à l'occupation du logement ne sont pas pris en compte, or, ils sont négligeables et peuvent être intégrés sous forme de *ratios*.

Deuxièmement, ni la STD ni l'outil méthodologique ne prennent en compte l'impact du pourcentage des ouvertures sur les besoins énergétiques de l'éclairage artificiel. Or, c'est une question essentielle : l'autonomie en éclairage naturel devrait augmenter avec le pourcentage de vitrage. Toutefois il est possible d'intégrer des valeurs par défaut à des pourcentages d'ouverture, car on connaît les courbes de pénétration de la lumière dans un espace en fonction de la taille de l'ouverture, des dimensions de la pièce, et des coefficients de réflexion des matériaux. Ceci a constitué une interrogation majeure pour l'évolution de l'outil.

Enfin, les apports solaires nets sont relevés à partir des surfaces vitrées, ce qui conditionne l'équilibre énergétique au pourcentage d'ouvertures. Or, le confort thermique n'est pas évalué et ceci peut devenir contradictoire. L'hypothèse est basée sur l'évolution de la technique vers des vitrages avec des capteurs photovoltaïques intégrés, mais il serait nécessaire d'aborder la question de l'équilibre énergétique de l'enveloppe *opaque*, compte tenu de son potentiel d'intégrer des matériaux producteurs d'énergie et d'éviter les problèmes liés aux surchauffes.

6.3.1.4.2. Application de l'outil pour l'optimisation de la performance énergétique

Dans un deuxième temps nous avons essayé d'évaluer l'application de l'outil méthodologique en termes d'optimisation de la performance énergétique. Nous avons comparé deux démarches avec des équipes d'architectes différentes au sein de l'agence NFA Architectes¹²⁰ : La première ne possédait pas l'outil de conception, et ne disposait d'aucune information concernant le potentiel environnemental du site. En contrepartie, la deuxième équipe a utilisé l'outil et l'ensemble des informations environnementales. L'information commune aux deux équipes correspondait à un programme pour un bâtiment de logements collectifs en R+5, avec une SHON d'environ 600m² par étage et les mêmes caractéristiques techniques. Nous avons développé ainsi deux projets comparatifs afin d'évaluer la pertinence de la démarche.

¹²⁰ NFA Architectes : équipes dirigées par Tam Vo Phi et Raphael Philippe.

Equipe A :

La seule information fournie correspond aux données d'ensoleillement sur la parcelle à différentes saisons. L'équipe a suivi une démarche de conception classique, en respectant les alignements et les hauteurs maximales. Le parti pris initial n'a pas tenu compte des considérations environnementales ni de l'information fournie par l'outil de conception.

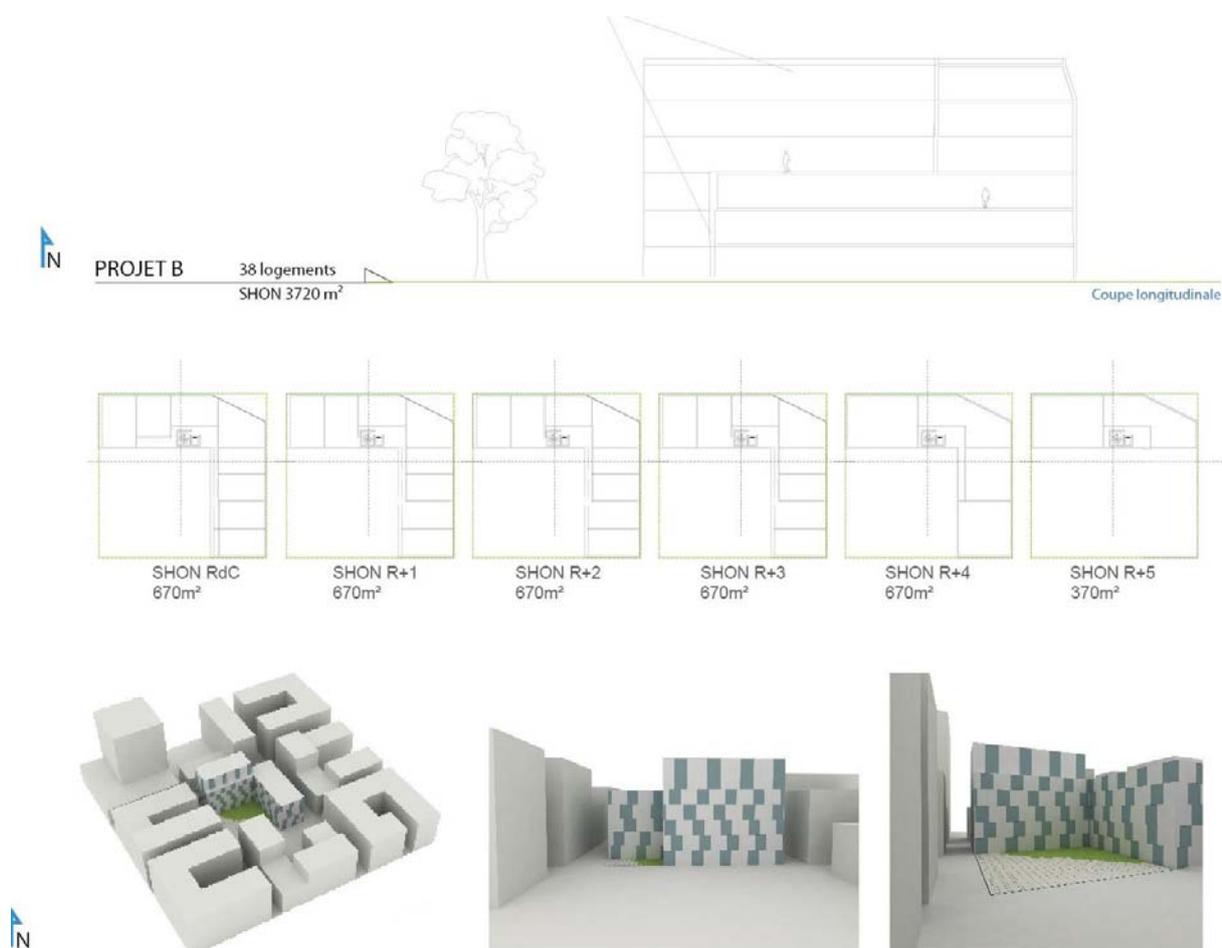
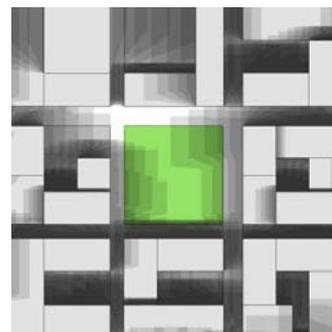


Figure 126. Coupe, plans et schémas d'esquisse présentée par l'équipe A.

Le projet est composé de deux bâtiments orientés Nord-Sud et Est-Ouest, laissant une esplanade côté sud pour l'aménagement d'un espace public. L'implantation en L des côtés Est et Nord de la parcelle bénéficie des apports solaires au Sud, mais pénalise les façades Nord et Est, qui sont particulièrement ombragées. Le volume au nord est plus haut en raison de l'alignement avec les bâtiments avoisinants. Les façades sont homogènes en termes de pourcentage d'ouvertures dans toutes les orientations.

Equipe B :

L'équipe B a utilisé l'information fournie par l'outil méthodologique, sous la forme de plans du bilan énergétique potentiel pour chaque étage. A partir de ces plans l'équipe a formulé une volumétrie qui prend en compte l'optimisation de l'orientation et de l'enveloppe.

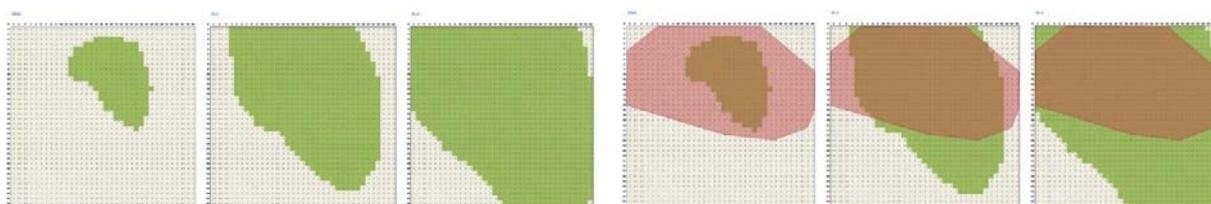
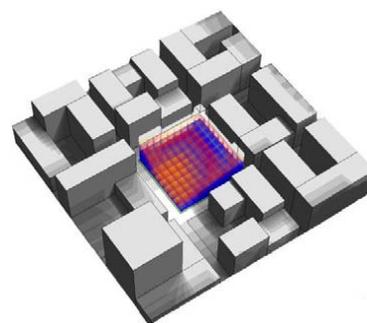


Figure 127. Implantation du projet d'après les plans du potentiel énergétique par niveau.

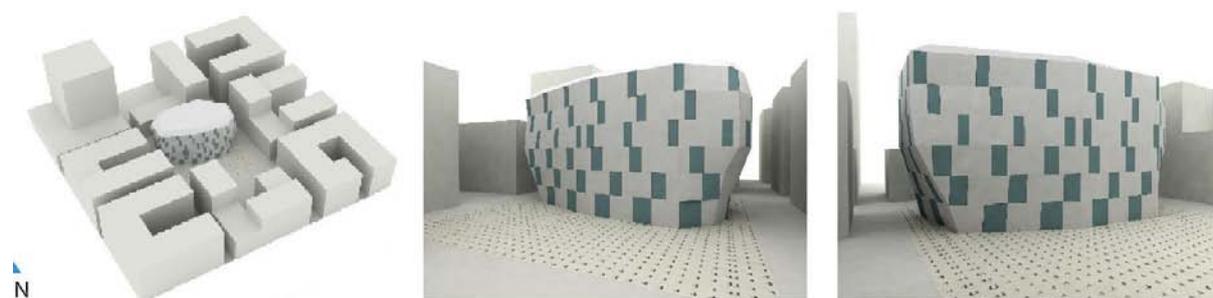
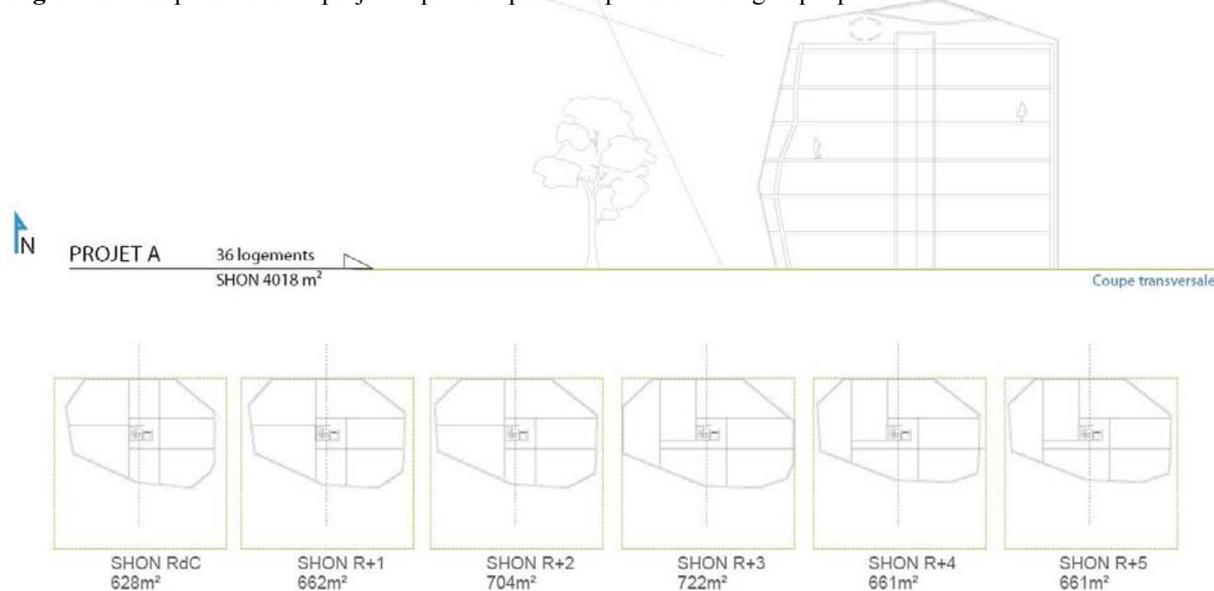


Figure 128. Coupe, plans et schémas d'esquisse présentée par l'équipe B.

Le plan est compacte, - suivant le «dessin» fourni par l'outil - et la dimension des étages est variable en fonction de la hauteur. Le volume prend la forme optimale et les ouvertures sont dimensionnées en fonction de la quantité de lumière disponible. Le pourcentage de vitrages par niveau est adapté en fonction de la hauteur et de l'ensoleillement de chaque façade.

Comparaison des résultats :



Figure 129. Comparaison des caractéristiques techniques des projets

Lors de la comparaison des projets, nous avons constaté que les deux partis ont adopté le choix d'une implantation côté nord de la parcelle avec une ouverture au sud pour bénéficier des apports solaires. Le programme donné étant le même, les surfaces des deux projets sont équivalentes et les développés de façade ne sont pas très différents.

Or, les stratégies climatiques sont opposées. La première équipe, qui n'a pas utilisé la méthodologie proposée dans ce travail de recherche, a opté pour un bâtiment fragmenté, avec un traitement uniforme des façades. Cette approche peut être associée à une démarche architecturale « classique », dans le sens où *l'implantation* du projet prime sur l'approche environnementale et *morphologique*.

En contrepartie, la deuxième équipe a utilisé les données fournies par l'outil en développant un bâtiment qui s'insère dans « l'empreinte » dessinée par l'outil. En outre, l'approche méthodologique a permis d'anticiper la problématique des apports énergétiques, et les baies vitrées ont été dimensionnées de façon hétérogène en fonction de l'irradiation solaire reçue selon l'étage et selon l'orientation.

La comparaison des résultats nous montre que les projets possèdent des caractéristiques techniques similaires, d'une part car l'énoncé du problème a été le même pour les deux équipes et d'autre part car nous avons utilisé les mêmes composantes en termes de matériaux et de systèmes pour faire la performance énergétique comparable.

Les taux de vitrages sont aux alentours de 30% avec un niveau de déperditions plus ou moins équivalent dans les deux cas. Cependant, la répartition est inégale selon les étages pour le projet B. Les apports solaires sont plus importants que ceux du projet A, le tout sans nuire au confort climatique pendant une journée de mi-saison (Fig.130). Ces apports solaires sont moyennés et contrôlés à partir d'une forme « évasée », plus étroite dans les niveaux inférieurs. Ceci témoigne de la faible capacité des bâtiments insérés dans des environnements urbains denses à valoriser l'irradiation solaire dans les premiers étages.

Finalement, le bilan énergétique semble favorable au projet qui a mis en place la méthodologie à travers l'outil de conception. La consommation énergétique pour le chauffage et l'éclairage artificiel est 15% inférieure à l'équipe A. pourtant, la consommation pour l'ECS reste presque identique, car nous avons tenu l'hypothèse d'installer la même surface de panneaux solaires en toiture. Toutefois, la question du confort visuel et de l'autonomie en éclairage naturel semble être une piste pour l'évolution de l'outil.

La simulation thermique dynamique confirmera que le confort thermique est satisfaisant pour ce type de projet, et que les déperditions par l'enveloppe peuvent être encore réduites.

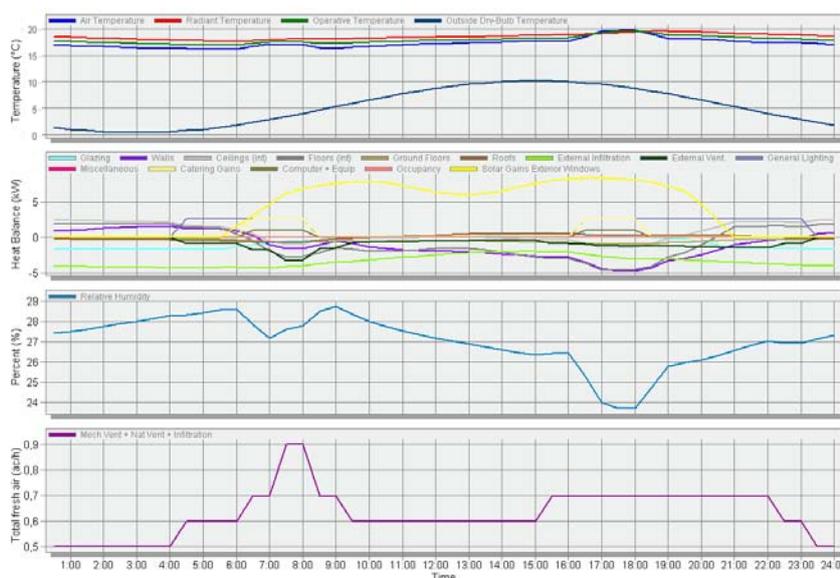


Figure 130. Simulation des températures en STD pour le cas B en une journée de mi-saison

6.3.2. Evolution méthodologique comme instrument de conception

D'après la comparaison avec le logiciel de simulation thermique dynamique (STD), l'outil méthodologique proposé permet de comparer les gains et les pertes énergétiques avec une fiabilité importante. Nous pouvons en déduire que l'outil est adapté aux phases initiales du processus de conception en tant qu'instrument de *vérification* d'une solution et non pas comme instrument de *mesure*.

La nuance est importante, car l'outil proposé donne des informations utiles au concepteur - préalablement à l'esquisse du projet – en ce qui concerne l'équilibre dans le traitement de l'enveloppe et dans le rendement des systèmes. Cependant, il ne fournit pas des données relatives au confort des occupants. Les variables seraient très complexes et exigeraient des temps de calcul prolongés. Certes, ces informations sont également importantes dans la conception du projet, mais il serait toutefois possible d'aborder la question du confort en couplant l'outil avec d'autres instruments numériques qui traiteraient cette question.

Cette démarche nous a permis de comprendre que la définition d'un projet performant se situe dans un contexte global qui intègre plusieurs variables. Nous avons considéré la performance thermique comme point de départ de notre réflexion, mais ils existent d'autres composantes liées au confort qui vont également impacter la performance énergétique.

Une des pistes plus importantes correspond à la conception de l'éclairage. Ce poste est essentiellement énergivore et les outils conçus à cet effet sont également des instruments de *mesure* et non pas de conception. L'étude couplée du confort thermique et de l'autonomie en éclairage naturel permettrait d'adapter l'enveloppe des bâtiments afin d'optimiser leur usage strictement en fonction des besoins. Ceci étant dit, les bâtiments prendraient forme à partir de différents *paramètres* comme les conditions d'ensoleillement, d'éclairage, de vent, etc.

Dans le cadre de cette recherche et comme évolution naturelle de l'outil formulé après le rapport fourni au PUCA, nous nous sommes donc intéressés aux outils numériques capables de *coupler* plusieurs éléments de calcul sous forme de *paramètres* dans la recherche de l'optimisation de la *performance* du bâtiment. Une de ces évolutions, déjà évoquée dans §4.3.3.3., correspond au *design paramétrique*. Nous nous sommes interrogés sur les modes de conception en couplant la méthodologie proposée avec des logiciels de calcul et de représentation. Nous appellerons ceci le *design paramétrique intégré*.

6.3.2.1. Le design paramétrique intégré

Nous avons étudié dans §4.3.2.2. les composantes du design paramétrique. Notre travail de recherche est une approche méthodologique à la conception à partir du lien entre le *potentiel environnemental* du site et la *forme* architecturale. En d'autres termes, nous abordons une réflexion sur l'intégration des *paramètres* contextuels et sur la rationalisation du processus de production de la *forme*, comme composantes de la démarche de conception de l'architecte. Dans la mesure où la méthodologie proposée évolue vers le design *paramétrique* couplé avec le design *scripté*, nous avons surnommé cette démarche le *design paramétrique intégré*. Cette démarche est importante car elle permet d'aborder une question qui n'a pas été résolue jusqu'à présent : la problématique de la *représentation* dans la *temporalité* du projet.

En effet, dans un premier temps nous avons montré que les outils de calcul thermique ne sont pas adaptés aux phases initiales du processus de conception car ils sont des instruments de *mesure* (*validation* vs *vérification* de la solution). Deuxièmement, pour appréhender l'impact des aspects énergétiques ces outils doivent passer par la *représentation* du *potentiel* environnemental et des *esquisses* de projet, le tout dans le même *tempo* de conception. Cependant ces outils sont inexistantes ou sont encore en développement. Certes l'outil méthodologique proposé a la capacité de répondre à cette problématique mais n'a pas résolu encore la dernière question : *l'évaluation* du confort thermique.

On pourrait ainsi affirmer, qu'aucun outil d'aide à la conception basé sur le calcul n'est adapté au processus de conception de l'architecte. Dans la recherche de la performance, le nombre et la complexité des paramètres a conditionné la spécialisation des instruments dans différents domaines. L'architecte, chargé d'analyser et de synthétiser les données issues des différents camps, serait dépassé par leur nombre croissant et par son incapacité à assimiler toute l'information en un temps donné.

Le seul instrument qui pourrait aider le concepteur à synthétiser cette information, serait une plateforme de mise en relation des différents logiciels autour de la représentation du modèle : ce sont les plateformes du type *Grasshopper*.

6.3.2.2. La plateforme grasshopper

Les plateformes du type *Grasshopper*¹²¹ sont des éditeurs graphiques d'algorithmes¹²² entièrement intégrés avec les outils de modélisation. Conçues à l'origine pour construire des générateurs de forme, ces plateformes simples de programmation permettent de mettre en relation les informations de différents logiciels, de les synthétiser et de les représenter tridimensionnellement. Ainsi chaque logiciel produit des données qui seront lues par la plateforme et « contenues » dans des « boxes » qui seront reliées entre elles.

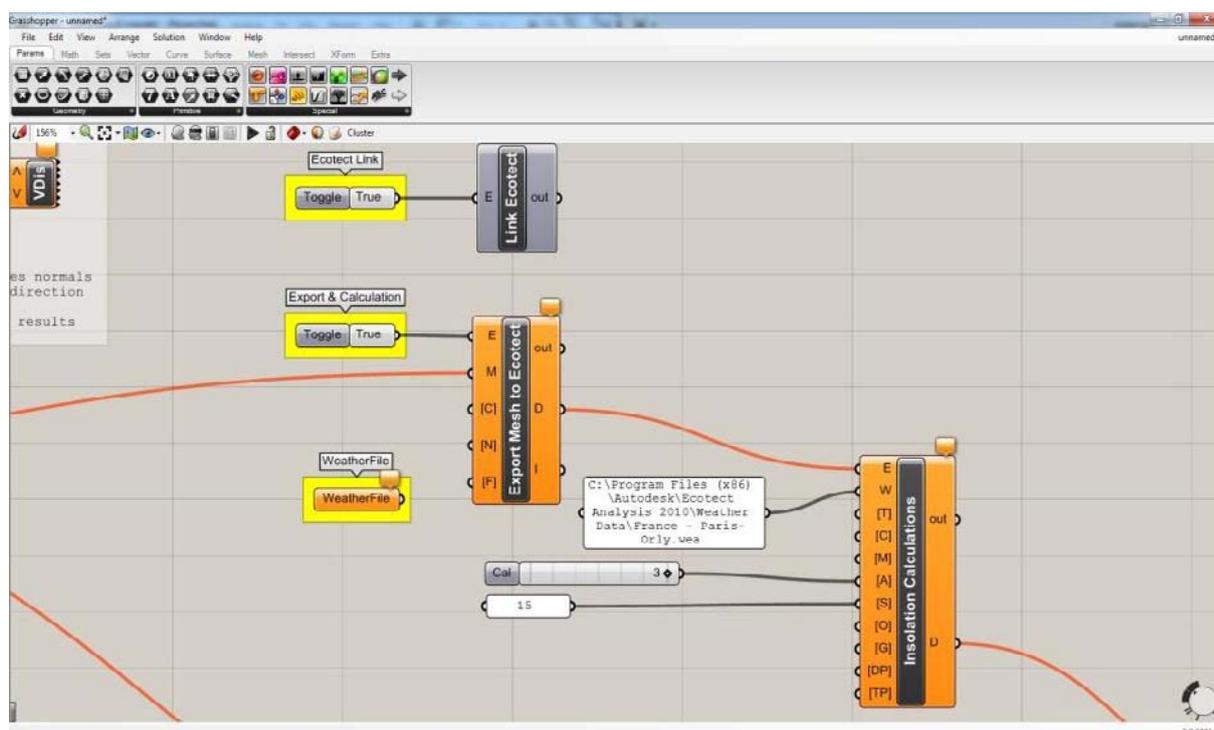


Figure 131. Zoom du tableau de navigation de la plateforme *Grasshopper*

Le tableau de navigation permet de modifier les critères d'analyse de l'information pour chaque élément de la chaîne qui aboutit à la représentation. La visualisation de la chaîne de liaisons entre les différentes sources (Fig.132) révèle la similitude avec la complexité des relations de la démarche de conception de l'architecte étudiée dans le chapitre §5.2.

¹²¹ *Grasshopper*® est un éditeur graphique d'algorithmes intégré avec Rhino 3-D. Contrairement à *RhinoScript*, *Grasshopper* ne nécessite aucune connaissance de la programmation ou de scripting, mais permet tout de même aux concepteurs de construire des générateurs de forme. Source : <http://www.grasshopper3d.com/>

¹²² Un algorithme est une suite finie et non-ambiguë d'opérations ou d'instructions permettant de résoudre un problème.

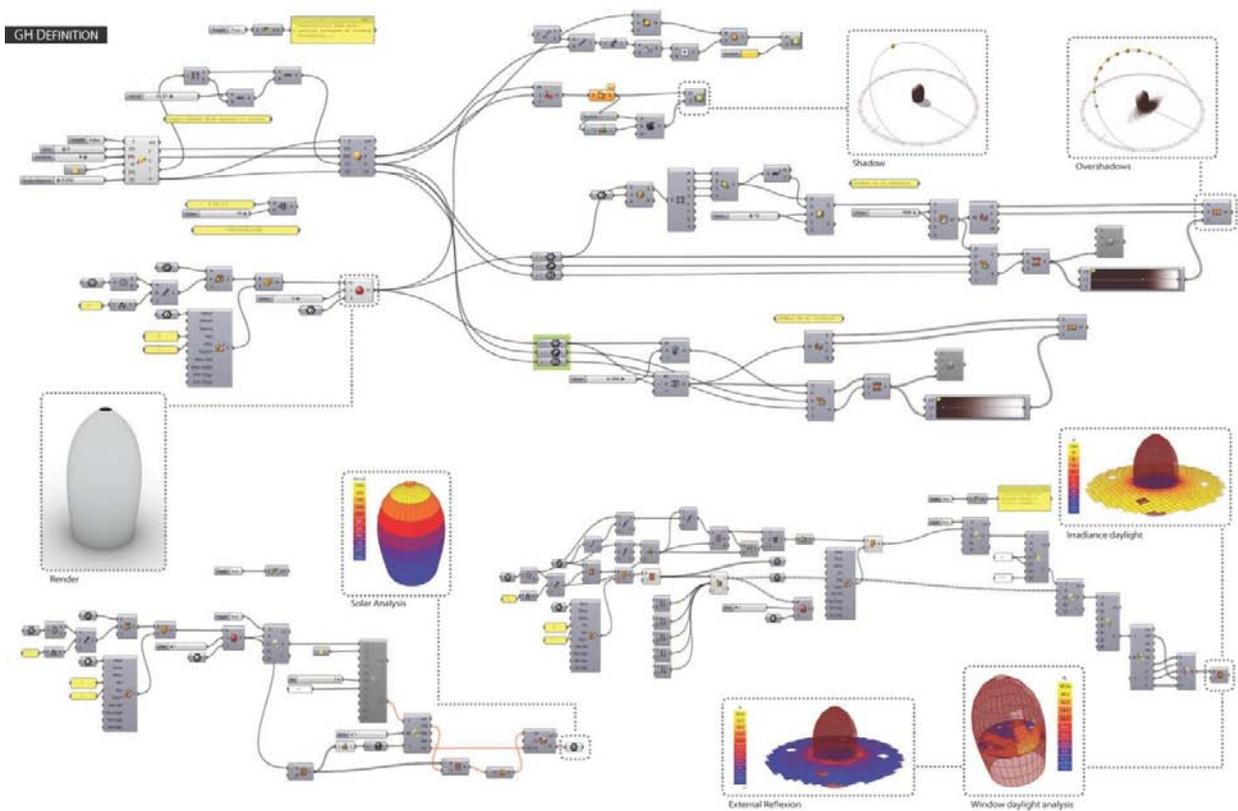


Figure 132. Visualisation du tableau de navigation de la plateforme *Grasshopper*

Bien que la visualisation des relations logiques entre les différents paramètres semble désordonnée, elle correspond à une chaîne logique de prise de décisions (Fig.133) similaire à la structure arborée d'analyse – synthèse décrite par Conan à propos des travaux d'Alexander (Fig.9) [Conan, 1990] sur [Alexander, 1974].

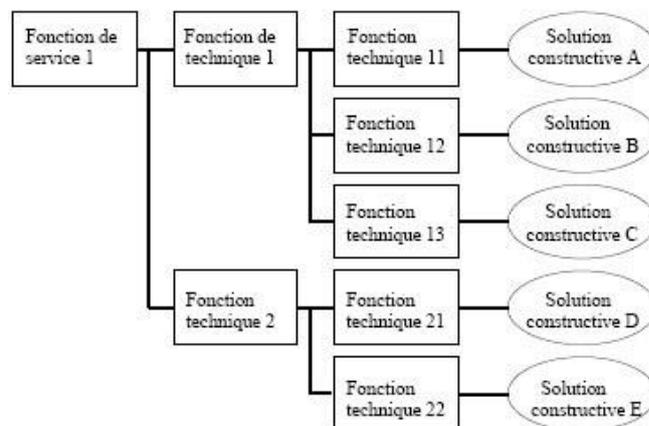


Figure 133. Functional Analysis System Technique

En effet, pour chaque base de données fournie par un logiciel, il lui correspond une chaîne logique de prise de décisions. Cette chaîne est similaire à la structure de la méthode FAST¹²³ (Functional Analysis System Technique) Le diagramme FAST se construit de gauche à droite, dans une logique du pourquoi au comment. Le concepteur développerait ainsi les fonctions de service du produit en fonctions techniques (Fig.133). Cette structure correspond à la base du langage de programmation des plateformes paramétriques.

6.3.2.3. Modélisation tridimensionnelle du potentiel environnemental

Dans le cadre de ce travail de recherche comme suite à l'évolution de notre outil méthodologique, avec l'aide de notre équipe¹²⁴ à l'agence NFA nous avons utilisé la plateforme pour modéliser le même type d'environnement urbain étudié au préalable.

Nous avons modélisé un environnement simple, caractérisé par un milieu urbain dense. Les premières simulations fournies par *Ecotect* montrent les conditions d'éclairage naturel en Facteur lumière jour FLJ pour le site. Le logiciel nous montre une représentation tridimensionnelle du potentiel environnemental en lumière naturelle.

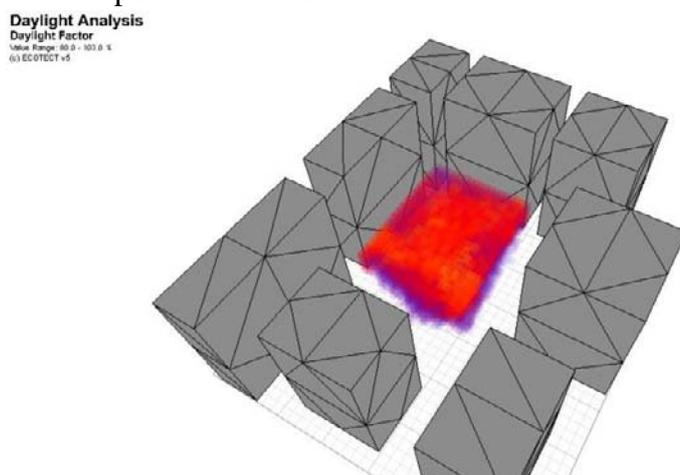


Figure 134. Modélisation 3D du Facteur Lumière Jour FLJ.

¹²³ FAST : acronyme de Functional Analysis System Technique — présente une traduction rigoureuse de chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) constructive(s). Source : Wikipedia

¹²⁴ Miguel Cormier, NFA Architectes, a développé l'application de la plateforme Grasshopper à partir de la construction de l'outil méthodologique.

Nous avons ensuite utilisé la plateforme pour relier, d'une part, les informations d'irradiation solaire et lumière naturelle fournies par *Ecotect*, d'autre part la modélisation de la parcelle et son environnement urbain en 3D par *rhino* et finalement le code de génération de la forme par *Grasshopper*.

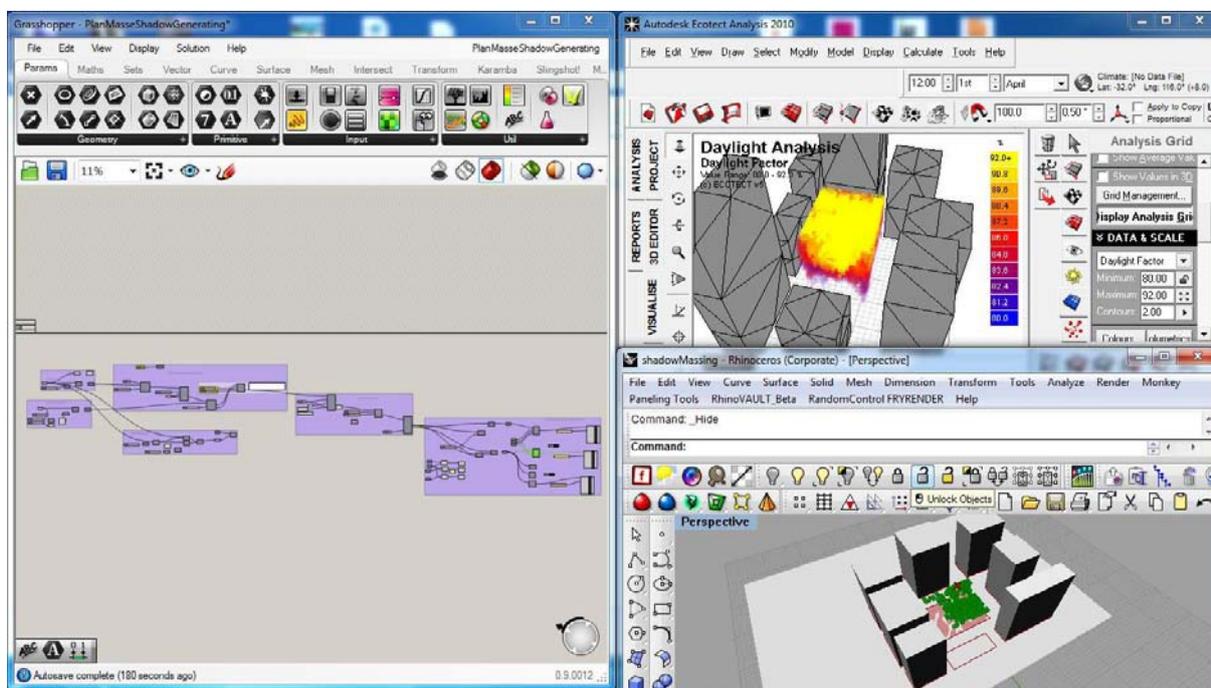


Figure 135. Visualisation des trois logiciels reliés par la plateforme.

La plateforme a dessiné ensuite la traduction tridimensionnelle de la forme optimale selon ces critères (Fig.136). Ce n'est pas à l'architecte de visualiser les plans fournis par notre outil, mais les données se traduisent en une représentation virtuelle, qui peut être ensuite exploitée.

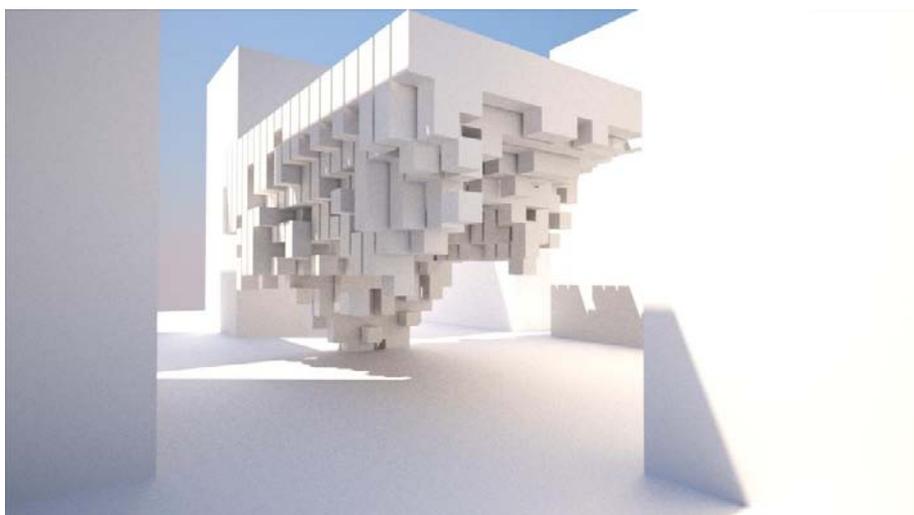


Figure 136. Représentations tridimensionnelle de la morphologie optimale en fonction du FLJ.

Le concepteur peut ensuite paramétrer la plateforme, prendre des décisions, s'écarter de la morphologie proposée ou rajouter d'autres composantes paramétriques à la définition morphologique du projet. Dans ce cas, nous avons intégré le paramètre « dessin par étages » pour modifier la morphologie proposée (Fig.137).

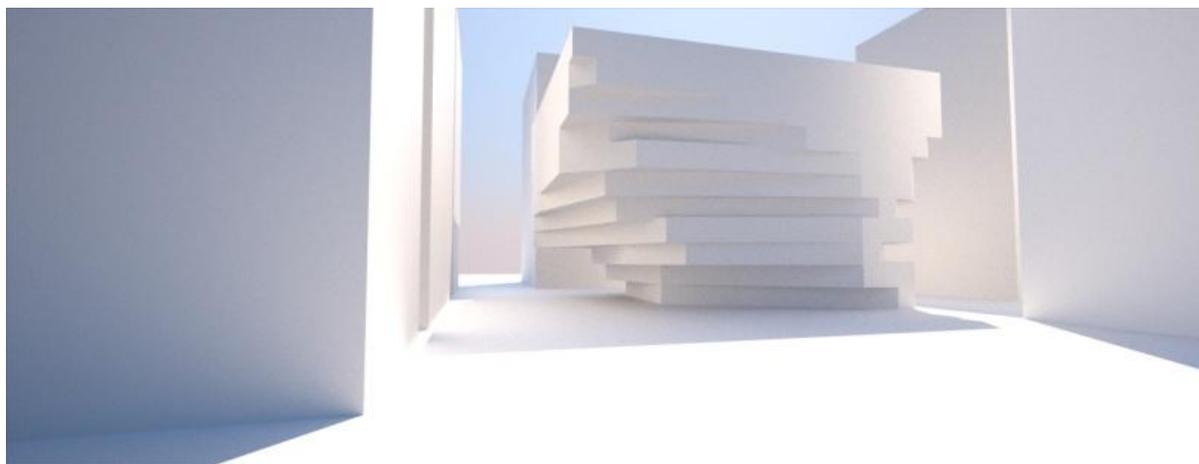


Figure 137. Représentations tridimensionnelle de la morphologie optimale par étages.

Nous avons ainsi développé une plateforme capable d'intégrer les données environnementales issues du contexte climatique et urbain, d'analyser l'information concernant les exigences programmatiques ou les caractéristiques générales du bâtiment fournies par le concepteur sous forme de *paramètres*, et de générer une *morphologie* potentielle qui traduit l'optimisation du bâtiment en termes de performance énergétique, confort thermique ou confort visuel.

Conclusion du chapitre

Cet outil a été conçu dans le cadre de l'appel à idées CQHE comme une forme d'application d'un travail de recherche que nous avons considéré d'un point de vue *méthodologique*. L'outil est l'aboutissement d'une réflexion, une approche à la conception de bâtiments énergétiquement performants.

Contrairement à la demande du PUCA qui suggérait la conception de « prototypes » de bâtiments innovants et performants, notre positionnement s'est appuyé sur l'idée que l'architecture ne peut pas être reproduite comme un modèle de performance, mais qu'elle se construit à partir du contexte. Cette considération qui semble une évidence, a été poussée à ses limites en concevant une démarche méthodologique qui soit cohérente avec la démarche propre à l'architecte et qui lui permette de définir le projet dans sa globalité jusqu'aux considérations techniques.

La méthodologie de conception proposée part de l'analyse de l'environnement urbain afin d'aider à définir un des premiers choix de l'architecte: la morphologie du bâtiment. Ces deux aspects vont déterminer son comportement énergétique et les caractéristiques générales comme la spatialité, les ambiances et le confort. Mais l'instrument développé est un outil d'aide à la conception. Il n'impose pas des structures ni des partis architecturaux. Il constitue un guide dans la recherche de la performance énergétique, donnant des informations utiles pour formuler, définir et manipuler les différents choix tout au long du processus de conception.

Cependant, cet outil n'est pas tout à fait innovant et possède ses limites. Mais on a constaté que la plupart des outils conçus en architecture, n'étaient pas adaptés au processus de conception de l'architecte. Il est incapable d'intégrer l'ensemble des informations fournies par les logiciels à un temps déterminé: le *tempo* du processus cognitif de formulation et validation d'une solution.

Dans cet ordre d'idées, nous avons montré que l'architecture doit intégrer les plateformes de synthèse des logiciels au processus de conception. C'est à travers l'étude du potentiel environnemental qu'il est possible d'en découler des architectures issues du contexte et performantes du point de vue énergétique ou du confort.

Conclusion de la troisième partie

La reconstitution de la démarche de l'architecte nous a permis d'identifier et d'évaluer de façon *intuitive* quel est l'impact de la performance énergétique dans le processus de conception. La construction de l'outil méthodologique nous a permis de vérifier les hypothèses sur lesquelles a été établie la hiérarchisation de la composante énergétique sur les choix du projet : l'impact est majeur quand les choix de projet touchent à l'enveloppe, quel qu'il soit le degré de spécificité du choix. Cette question est essentielle.

En tant qu'interface entre l'intérieur et l'extérieur, l'enveloppe conditionne tous les aspects relatifs à l'intégration des ressources externes au service du bâtiment, ainsi que tous ceux relatifs à la notion de confort. A partir de ce constat, nous retrouvons la relation entre la *morphologie* et la composante *énergétique*. Nous avons mis en place une méthodologie d'approche pour étudier cette question, à partir de la compréhension de l'enveloppe comme élément d'adaptation à son environnement. La construction d'un outil numérique d'évaluation et d'intégration du potentiel environnemental permettra de considérer les limites des instruments informatiques et d'estimer leur rôle dans le processus de conception.

La méthodologie-outil proposée ne permet pas d'évaluer le confort thermique en régime dynamique, et les outils de mesure existants ne permettent pas d'appréhender le potentiel énergétique du site préalablement à la phase esquisse. Il semblerait que l'évolution naturelle de l'outil tende vers le couplage entre les logiciels *d'analyse* environnementale, de représentation du *potentiel* énergétique du site, de *calcul* énergétique et de *simulation* du confort, le tout à travers la *représentation*. En effet, le temps entre la formulation d'esquisses et la construction de modèles tridimensionnels, serait crucial dans l'analyse de la performance environnementale et énergétique.

Mais il est souhaitable d'aller dans le sens du design paramétrique intégré et non pas vers le design génératif. Le premier, constituerait seulement une composante de la démarche de conception de l'architecte : elle suggérerait une morphologie potentielle mais laisserait la marge de manœuvre nécessaire à la création architecturale. Le deuxième, serait en train de remplacer la démarche de conception de l'architecte par un processus de génération informatique d'une forme à partir d'un certain nombre de paramètres. Dans cette subtilité serait fondée l'évolution du rôle de l'architecte dans le processus de conception.

Conclusion générale

« Le potentiel des économies d'énergie peut être acquis non seulement par l'activation des technologies spécifiques, mais grâce à la planification des milieux urbains et des bâtiments : l'ensemble de ressources naturelles dans l'environnement doivent être intégrées dans la planification »

Klaus Daniels (1997)

L'objectif de cette recherche a été d'apporter des lumières à la réflexion sur l'évolution du processus de conception architecturale face à l'intégration des nouveaux enjeux énergétiques. A travers notre approche nous avons abordé un travail d'un point de vue méthodologique et énergétique, pour aboutir à une réflexion sur l'évolution de la conception architecturale.

Conclusions méthodologiques

La conception en architecture correspond à un processus cognitif complexe, qui semblerait aléatoire et intuitif, mais qui peut être expliqué. On peut distinguer deux grandes phases dans la conception d'un projet : la démarche de formulation d'une problématique et la démarche de formulation de la solution.

La première phase correspond à un processus logique linéaire, dans lequel sont établies des corrélations entre les différentes données de base. La deuxième phase correspond à un processus plus complexe qui fait appel aux aspects cognitifs de façon itérative, non linéaire. Les modes de formulation d'une solution sont multiples et sont souvent associés à une démarche d'aller-retour ou d'essai-erreur, qui correspond plus précisément à une méthodologie de formulation et de vérification d'une solution.

La conception d'un projet est à nos jours pluridisciplinaire : la solution est formulée à partir de l'analyse réciproque entre les agences d'architecture et les bureaux d'étude. Le processus d'analyse – synthèse – formulation n'est pas assimilé de la même façon par les architectes et les ingénieurs. Il est question d'analyser deux formes de pensée : la pensée *picturale* (l'architecte) vs la pensée verbale ou *discursive* (l'ingénieur).

La pensée du concepteur *architecte* répond à des mécanismes cognitifs comme la perception, la mémoire, l'analogie et la représentation, associées et communiquées à travers d'images. L'architecte peut aboutir à plusieurs solutions après un processus de formulation et remise en cause du projet. En parallèle, la pensée du concepteur *ingénieur* est basée sur une démarche rationnelle qui aboutit à la résolution d'un problème à travers une démonstration. L'ingénieur répond ainsi à une problématique plus précise tenant compte de plusieurs *paramètres*, mais en formulant une seule solution *optimale*. Ce processus peut être assimilé à une chaîne logique du *pourquoi* au *comment* jusqu'à définir la solution optimale.

Les approches divergentes de ces deux types de pensée ne remettent pas en cause leur pertinence, car il est possible que les architectes comme les ingénieurs aboutissent à une même solution pour un problème donné. Mais en termes généraux ceci est une exception à cause de la question de la *temporalité*. En effet, a priori il n'existerait pas de réciprocité entre les architectes et les ingénieurs dans le *tempo* et le *temps* de formulation d'une solution. Ceci nous mène donc à la question de la *coordination* du projet architectural et technique.

Ce processus permet de mettre en relation un grand nombre de paramètres pour formuler une solution, mais ceci se traduit par la multiplication des choix du concepteur dans des processus itératifs de synthèse. Cependant, leur interprétation dépend de la capacité de jugement du concepteur et de l'ambiguïté de ses choix. C'est ce qui fait de l'architecture depuis des siècles un *art* et une *science*.

L'intégration de la performance énergétique

L'architecture évolue dans un monde qui est à la recherche de la performance énergétique, la réduction de la consommation d'énergie et le recours aux énergies renouvelables. C'est une transition logique dans une ère d'épuisement des énergies fossiles. Depuis plusieurs décennies, les recherches dans ce domaine ont donné lieu à l'architecture *bioclimatique*. Cependant, les nouveaux enjeux énergétiques ont imposé la technicisation de l'architecture. Les modes de conception et de représentation ont évolué vers les outils numériques, l'industrie a évolué dans la production des matériaux et dans les techniques constructives et le métier s'est diversifié en plusieurs spécialités, dont l'énergétique.

La démarche de conception d'un projet a évolué vers la coordination de différents corps de métier qui interagissent dans des temporalités différentes. Par conséquent le processus itératif de formulation – validation d'une solution qui était réalisé par un même concepteur, s'est

transformé dans l'interaction entre deux interlocuteurs pour la formulation et la postérieure vérification de la solution à travers des outils numériques.

Cette dichotomie est à l'origine des difficultés d'intégration de la composante énergétique dans le processus de conception. La *performance* énergétique est devenue un objectif et non pas une réflexion. La problématique énergétique est limitée à la question de l'évaluation, car les outils disponibles sont des instruments de mesure. Le manque de cohérence entre le parti architectural et le parti environnemental explique pour grande partie les écarts importants entre les bilans prévisionnels et les relevés de consommation d'énergie des bâtiments construits. Les outils numériques actuels sont donc obsolètes.

La composante environnementale et spécifiquement énergétique doit être traitée en même temps dans la formulation de la problématique que dans la synthèse des solutions. De cette façon on pourra les valider dans un processus itératif, à partir d'une problématique linéaire. Mais comment aborder la synthèse des solutions si l'essentiel de la question énergétique se situe dans les premières phases de conception ? Il s'avère nécessaire de traiter la question du *potentiel* énergétique, qui va permettre d'optimiser la performance avant même de commencer à esquisser le projet.

La question de l'efficacité énergétique impose donc l'exploitation du « potentiel environnemental » des bâtiments, à travers une approche d'optimisation de la *forme* et de l'enveloppe qui soit en concordance avec le contexte extérieur, telle une entité vivante qui interagit avec son environnement. Ceci se traduit par la conceptualisation de « gabarits capables », soient des *morphologies* potentiellement possibles et performantes, à partir desquelles le concepteur peut « sculpter » le projet.

Au-delà de la question de la « peau » des bâtiments, qui a condamné l'architecture à être habillée et revêtue d'ornements en concordance avec son temps, il est temps d'adapter les constructions à leur contexte, dans une optique de développement durable.

A partir de cette approche nous nous sommes intéressés à la valorisation des énergies renouvelables, à l'évaluation du potentiel d'économie d'énergie à partir d'une méthodologie spécifique et à proposer une démarche innovante utilisant l'énergie solaire et l'environnement urbain comme principaux outils de conception. Par ailleurs, au-delà de l'objectif d'apporter une réflexion en travaillant sur ces questions, nous avons débouché intuitivement sur l'évolution de la conception architecturale avec l'intégration des outils numériques.

Evolution de la conception architecturale

L'architecture se nourrit de l'ambiguïté et de la subjectivité dans l'interprétation, ainsi que de la singularité de la vision du concepteur et des usagers. Mais l'arrivée de la composante énergétique à travers la recherche de l'efficacité, est en train d'imposer de solutions - modèles performantes qui sont en contradiction avec les caractéristiques spatiales et les besoins changeants des occupants. De ce point de vue, l'évolution de la *technique* liée à la performance énergétique des bâtiments a impacté fortement sur les modes de conception.

Les questions environnementales et plus particulièrement, la question énergétique, ont modifié le processus de conception en architecture. Le concepteur est contraint par des nouveaux paramètres dont la multiplication le rend incapable d'analyser et de formuler des solutions à travers des processus cognitifs de synthèse. La démarche *d'essai - erreur* d'une solution n'existerait plus en tant que telle, mais elle serait remplacée par la vérification instantanée de sa pertinence. La voie est donc dans le développement des outils numériques qui vont permettre de construire le projet dans une démarche constante d'auto évaluation. Ces outils n'existent pas jusqu'à présent, car ils ne permettent pas de faire le lien entre le dessin schématique de l'architecte et les instruments de mesure de la performance.

Depuis de nombreuses années, on a développé des outils numériques qui ont permis à une génération d'architectes de développer des projets à partir d'un nombre déterminé de paramètres. Le *design paramétrique* a ouvert la voie à des nouvelles formes de conception, et de nouvelles formes et de nouvelles architectures. Mais la critique portée sur ces réalisations réside dans la remise en question de la pertinence du travail de l'architecte qui en contraposition à la tradition, vérifie un processus que la machine a développé à partir d'un algorithme. Les rôles étant inversés, il serait possible de programmer les paramètres, appuyer sur un bouton et attendre pour voir la « fin » de l'architecture telle qu'on la connaît.

Cependant, le grand progrès de ces architectures a été celui de conférer à l'ordinateur la place que les concepteurs ont cédé depuis longtemps et qu'ils essayent de récupérer à travers les différentes spécialisations en architecture : le rôle de synthétiser l'information de façon à produire une solution « optimale » à partir d'un certain nombre de critères. Face à l'incapacité du concepteur de concurrencer la machine dans la formulation d'un maximum de solutions dans une courte durée de temps, les nouveaux outils numériques semblent être une alternative.

Les recherches actuelles portent donc sur l'intégration des outils de mesure aux outils de représentation à travers le développement de plateformes simples de programmation qui permettent de relier les algorithmes de calcul aux modèles de représentation volumétriques comme *grasshopper*. Ces plateformes sont en train de résoudre la question de la *temporalité* dans la représentation des modèles. Ces outils sont capables d'optimiser la *morphologie* du projet à partir des conditions environnementales. Nous avons ainsi constaté que l'intégration des aspects énergétiques a modifié les modes de conception architecturale, évoluant ainsi vers le *design paramétrique*.

L'architecte et la ville

Klaus Daniels aura formulé dans « *The technology of ecological Building* », qu'il existe un potentiel important d'économie d'énergie dans la planification des milieux urbains. Loin de rester dans la logique «bioclimatique» des 30 dernières années, l'architecture fait face aujourd'hui à un défi majeur: construire les nouveaux bâtiments à énergie positive dans un contexte d'intégration de la technologie à la conception architecturale.

Les villes sont engagées dans un processus d'expansion et de transformation de ses structures dans une logique de développement durable. L'architecture jouera alors un rôle essentiel dans cette réflexion dans la mesure où la conception des projets dépassera le stade de l'introduction des systèmes techniques dans des enveloppes traditionnelles, afin de concevoir des ensembles dans une logique urbaine globale.

Dans le cadre de cette recherche nous avons contribué à cette réflexion en formulant une *approche méthodologique* à partir de l'analyse du processus de conception, de l'étude de l'intégration des aspects énergétiques et de la construction d'une démarche de conception qui s'appuie sur des outils numériques – paramétriques.

Avec le développement de ces outils, nous sommes face à des nombreuses applications dans le domaine de la conception architecturale et urbaine. Reste à résoudre le rôle de l'architecte avec sa capacité de *jugement*, faisant appel aux références symboliques de la société, rôle qu'il n'a pas perdu.

On pourrait ainsi conclure ce travail avec une réflexion de Renzo Piano en réponse à la question sur le devenir de l'architecture:

« - *Quels grands changements voyez-vous venir?*

- *Nous sommes entrés dans le XXI^e siècle avec une conscience aiguë de la fragilité de la terre, pas seulement écologique d'ailleurs. Les bâtiments que j'imagine en ce moment se veulent à l'unisson de cette fragilité. Ils doivent répondre à un impératif de légèreté, juste être dictés par la force de la nécessité, comme disait Pontus Hulten¹²⁵. »*

Cette recherche a été présentée à l'UKERC¹²⁶ Summer school en 2009 et a obtenu le premier prix pour son innovation. Ce séminaire annuel réunit des doctorants de différentes nationalités et de diverses disciplines travaillant en lien avec le domaine de l'énergie. Nous avons constitué les ANNEXES avec la synthèse du projet montré à l'UKERC, le rapport fourni au PUCA pour l'appel à idées CQHE, et une compilation des projets de logements étudiés comme support de cette recherche.

¹²⁵ Karl Gunnar Pontus Hultén fut philosophe, historien et commissaire d'art, fut le premier directeur du centre Georges Pompidou en 1977, mort à Stockholm en 2006.

¹²⁶ United Kingdom Energy Research Center

Bibliographie

- ADOPHE, L. (1991). *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l'énergétique du bâtiment*. Thèse de Doctorat. Ecole de Mines de Paris.
- ALEXANDER, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.
- ARNAULD, A. (1662). *La logique ou l'art de penser (La Logique de Port Royal)*. Paris, p.27.
- ARNOLD, F. (1996). *Le logement collectif*. Le Moniteur, Paris.
- ARNEHEIM, R. (1969). *Visual thinking*. University of California Press, Berkeley.
- BATTLE, G. Mc CARTHY, C. (2000). *Sustainable Ecosystems and the built environment*. Wiley – Academy
- BRANDI, U. GEISSAMAR, C. (2001). *Lightbook, the practice of lighting design*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- BEHLING, S. BEHLING, S. (2000). *Solar power, the evolution of sustainable Architecture*. Prestel, Munich, London, NY.
- BONNEAUD, F. BERNARD, P. ADOLPHE, L. (2004). *Efficienc e des outils d'aide à la conception, proposition d'une grille d'analyse multicritères*. EURAU'04. European symposium on research in architecture and urban planning, Marseille, France.
- BORILLO, M. GOULETTE, J.-P. *Cognition et création: Explorations cognitives des processus de conception*. pp. 97-118. Mardaga. Sprimont, Belgique.
- BOUDON, P. (1971). *Sur l'espace architectural. Essai d'épistémologie de l'architecture*. Dunod Editeur Bordas, coll. « Aspects de l'urbanisme », Paris.
- BOUDON, P. (1992). *De l'architecture à l'épistémologie - La question de l'échelle*, PUF.

- BOUDON, P., DESHAYES, P., POUSSIN, F., SCHATZ, F. (1994). *Enseigner la conception architecturale*, Cours d'architecturologie, coll. « Savoir-Faire pour l'architecture ». Les Editions de La Villette, Paris.
- BRINDEL BETH, S. (1989). *Les paramètres du confort: le point de vue de l'architecte*. Actes de colloque, comité français de l'électricité, 1989.
- BROADBENT, G. (1973). *Design in architecture* – J. Wiley, Toronto.
- BROTO, C. (2005). *New concepts in apartment buildings*. Structure.
- BROWN, G.Z. DEKAY, M. (2001). *Sun Wind & Light, Architectural Design Strategies*, Jhon Wiley & Sons, New York.
- BUNDESEN, C. LARSEN, A. (1975) *Visual transformation of size*, Journal of Experimental Psychology, 1, pp. 214-220.
- CALLON, M. (1996). *Le travail de la conception en architecture*, Cahiers de la Recherche architecturale, 37, pp. 25-35.
- CARROLL, J.M., THOMAS, J.C. et MALHOTRA, A. (1980). *Presentation and representation in design problem-solving*, *British Journal of Psychology*, 71, pp. 143-153.
- CHARBONNIER, S. PARANT, C. POUGET, A. (1992). *Guide thermique dans l'habitat neuf. Bâtir une stratégie globale*. Editions Moniteur, Paris 1992.
- CHATELET, A. FERNANDEZ, P. LAVIGNE, P. (1998). *Architecture climatique, une contribution au développement durable*. Edisud, France.
- CHUPIN, J.P. (2002). « *La mariée mise à nu...* », (*à propos de l'enseignabilité des modèles de conception*)
- CIBSE. (2005). *Natural ventilation in non-domestic buildings*. CIBSE Applications Manual. CIBSE, UK
- COMPAGNO, A. (1999). *Intelligent glass façades*. Birkhauser, Basel, Boston, Berlin.
- CONAN, M. (1990). *Concevoir un projet d'architecture*. L'Harmattan, Paris.

COURGEY, S. OLIVA, JP. (2006). *La conception bioclimatique des maisons confortables et économes*. Terre vivante , Mens, France

CSTB. (2005). *Certification HQE des bâtiments tertiaires, millésime 2005, système de management environnemental d'opération (SMO) et exigeants par cible*. CSTB, France.

DANIELS, K. (1997). *The technology of ecological building*, Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.

DANIELS, K. (1998). *Low tech light tech high tech*, Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.

DEPECKER, P. (1985). *Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture – Le cas de la thermique*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, France.

DESCARTES, R. (1637). *Discours de la méthode, pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*. IAN MAIRE ed, Paris.

EDWARDS, B. TURRENT, D. (2000). *Sustainable housing, principles & practice*. E&FN Spon, UK.

EUROPEAN COMMISSION. University College Dublin, the Architect's council of Europe, Softech and the Finnish Association of Architects (1999). *A green Vitruvius*. James & james, London.

FALZON, P. Bisseret, A. Bonnardel, N. *Les activités de la conception : l'approche de l'ergonomie cognitive*. Article de recherche « Recherche sur le design », Compiègne.

FERNANDEZ, A. MOZAS, J. ARPA, J. (2007) *D Book: Density Data Diagrams Dwellings. Análisis visual de 64 proyectos de vivienda colectiva*, a+t ediciones, Spain.

FERNANDEZ, L. (2010). *Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs aux choix des matériaux*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

FERNANDEZ, P. (2002). *Approches méthodologiques et modes opératoires dans le processus de conception architectural*. Cognition et création, Edition Mardaga, Belgique, pp. 99-117.

- FERNANDEZ, P. (1996). *Intégration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1996.
- HERZOG, T. (1996). *Solar energy in Architecture and Urban planning*. Prestel.
- GALIANO, L.F. (1991). *Fire and memory : On Architecture and Energy*, traduction anglaise de *El fuego y la memoria. Sobre Arquitectura y Energía*. Alianza Editorial, Madrid.
- GAUZIN MULLER, D. FAVET, N. (2001). *L'architecture écologique, 29 exemples européens*. Groupe Moniteur, Paris.
- GAUZIN MULLER, D. (2002). *Sustainable Architecture and Urbanism*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- GAUZIN MULLER, D. (2005). *25 Maisons en bois*, Editions du Moniteur, Paris.
- GERMAN SOLAR SOCIETY. (2005). *Photovoltaic Systems*. James & James, London.
- GUZOWSKI, M. (2000). *Daylighting for sustainable design*. Mc Graw – Hill professional Architecture.
- HASTINGS, R. (1999). *Solar Air Systems, built examples*. James & James, London.
- HAUSLADEN, G. SALDANHA, M. LIEDL, P. SAGER, C. (2005). *Climate design solutions for buildings that can do more with less technology*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- HEYLIGHEN, A. (2000). *In case of Architectural Design. Critique and Praise of Case-Based Design in Architecture*. Phd. Dissertation. Université Catholique de Louvain.
- HILLIER, W. HANSON, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. p 281 .
- HUBBERT, M.K. (1949). *Energy from Fossil Fuels*. American Association for the Advancement of Science. Volume 109, number 2823.
- HUMM, O. TOGGWEILER, P. (1993). *Photovoltaik und Architektur – Photovoltaics in Architecture*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- INTERNATIONAL ENERGY SOCIETY. (2001). *Solar energy - The state of the art*. Jeffrey Gordon

- JONES, C. (1969). *The state of the art in design methods*. Dans *Design methods in architecture* (pp. 193-197). AA Papers, London.
- KRAPMEIRER, H. (2001). *CEPHEUS, living comfort without heating*. Springer Wien New York.
- KOROBKIN, B. (1976). *Images for design : communicating social science research to architects*. Cambridge.
- LEBAHAR, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte – simulation graphique et réduction d'incertitude*. Collection architecture outils. Editions Parenthèses, Paris.
- LE CORBUSIER. (1924). *Vers une architecture*. Ed. Crès, p 73, Paris.
- LE CORBUSIER. (1925). *Urbanisme*. Ed. Crès, p 219, Paris.
- LE CORBUSIER. (1925). *L'art décoratif aujourd'hui*. Ed. Crès, p 72, Paris.
- LEFEVRE, P. (2002). *Architectures durables*. EdiSud.
- LEPLAT, J. (1985). *Les représentations fonctionnelles dans le travail*. Psychologie française, No 30, 3-4, pp. 269-275.
- LEVY, A. (1997). *A semiotic modelisation of the architectural conception*. Rauch, I., Carr, Mouton de Gruyter, pp.545-548. G. Berlin / New York.
- LIEB, O. HEUSLER, L. (2001). *Double skin façade, integrating planning*. Prestel Verlag GmbH + Company.
- LIEBARD, A. DE HERDE, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Obderv'ER.
- LLOYD JONES, D. (1947). *Architecture and the environment*. Lawrence King, UK.
- MALRAUX, A. (1947). *Psychologie de l'art*. Albert Skira Editeur, Paris.
- MAZRIA, E. (1979). *The passive solar energy book*. Rodale press, Emmaus, PA, USA. Pour la traduction française : (1981). *Le guide de la maison solaire*. Editions parenthèses, France.
- MC MULLAN, R. (2002). *Environmental Science in Building*. Edition Palgrave, 5ème édition.

- MELET, E. (1999) *Sustainable Architecture: towards a diverse built environment*. Nai publishers.
- MOLEY, C. (2002). *L'architecture du logement. Culture et logiques d'une forme héritée*. ADEME Editions, Paris.
- NIDAMARTHI, S. CHAKRABARTI, A. (1997) *The signifiante of coevolving requirements and solutions in the design process*. ICED 97, Tampere.
- NORMAN, D. (1982). *Learning and memory*. W.H. Freeman and company, San Francisco.
- PEREZ ARROYO, S. ATENA, R. KEBEL, I. (2007). *Emerging technologies and housing prototypes*, Black dog publishing.
- PEÑA, W. (1977). *Problem seeking : an architectural programming primer*. Cahners books International, Boston.
- POINCARÉ, H. (1902). *La science et l'hypothèse*. Flammarion, Paris.
- PRASAD, D. SNOW, M. (2005). *Designing with solar power: a source book for building integrated photovoltaics*. Images publishing,
- PROST, R. (1992). *Conception architecturale – une investigation méthodologique*. Paris, L'Harmattan.
- PURCELL, T. & GERO, J.S. (1998). *Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology*. Design Studies 19(4), pp. 389-430.
- RAYNAUD, D. (1990). *L'imagination architecturale*, vol. 1. Méthodologie et études, vol. 2. Essai de schématologie, thèse de doctorat, Grenoble, Université Pierre-Mendès-France.
- RAYNAUD, D. (1992). *La conception architecturale : un processus séquentiel, analogique et sémantique*. Séminaire sur les processus de conception, Paris, Ministère de l'équipement, vol. 3, pp 224-250.
- RICHARD, J.F. (2004). *Les activités mentales*. Armand colin, Paris.

- RICHARDSON, J. (1980). *Mental imagery and Human memory*. St. Martins Press, New York.
- ROWE, P.G. (1991). *Design thinking*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- SALAT, S. (2006). *The sustainable design handbook. CHINA, high environmental quality cities and buildings*. CSTB, China.
- SEGAUD, M. BONVALET, C. BRUN, J. (1998). *Logement et habitat. L'état des savoirs*. Editions la découverte, Paris.
- SCHANK, R. (1982). *Dynamic memory*. Cambridge university Press, Cambridge.
- SCHIITTICH, C. (2001). *Building Skins, Concepts, layers*. Edition Detail.
- SCHIITTICH, C. (2003). *Architecture solaire: strategies, visions, concepts*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- SCHON, D. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in Action*. Basic Books.
- SHEPARD, R.N. COOPER, L.A. (1982). *Mental images and their transformations*. Cambridge, The MIT Press.
- SIDLER, O. (2007). *Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France*. Rapport du projet « Renaissance », programme Européen Concerto, Enertech.
- SIMON, H.A. (1973). *The structure of ill-structured problems*. Artificial Intelligence, 4, 181-201.
- SIMON, H.A. (1974). *Les sciences de la conception*. L'Harmattan, Paris.
- SMERDON, T. WAGGETT, R. GREY, R. (1997). *Sustainable Housing – Options for independent energy, water supply and sewerage*. The building Services Research and information Association BSRIA, Oakdale.
- SMITH, E. & KOSSLYN, S. (2006). *Cognitive psychology: Mind and brain*. Prentice Hall, New Jersey.
- SOLANAS, T. (2007). *Vivienda y sostenibilidad en España*. Editorial Gustavo Gili.

- SOURIAU, E. (1947). *La Correspondance des arts, Eléments d'esthétique comparée*. Paris, Flammarion.
- SPRECKELMEYER, K.F. (1981). *Application of computer-aided decision technique in architectural programming*. PHD Diss. University of Michigan press.
- STITT, F. (1999). *Ecological Design Handbook*. McGraw-Hill
- THOMAS, R. (1999). *Environmental Design : an introduction for architects and engineers*. E&FN Spon, London.
- TRIC, O. (1999). *Conception et projet en architecture – articulation des composantes enveloppe, structure, usage et coût dans la conception et au sein du système d'acteurs*. Paris, L'Harmattan.
- VITRUVÉ. *De l'architecture*, livre I. De l'architecture ; Qualités de l'architecte. C.L.F. Panckoucke, 1847. Trad. par M.Ch.-L. Maufra, Paris.
- VLAAMS ARCHITECTUUR INSTITUT. (2005). *Flanders Architecture Yearbook*.
- WOLFRAM, S. (2002). *A new kind of science*. Wolfram media inc., USA.

Table des illustrations

Figure 1. Structure théorique de la conception.....	13
Figure 2. Schéma de la Conduite d'une opération en architecture selon Prost (1992).....	14
Figure 3. Phases de la démarche de conception d'un projet selon Prost.	27
Figure 4. Processus de projet architectural et urbain. Fernandez (2002).	28
Figure 5. Niveaux relatifs à un énoncé de problème [Prost, 1992].	31
Figure 6. Dynamique du couple Problème / Solution [Prost, 1992].....	33
Figure 7. Références normatives et processus de conception [Prost, 1992].....	35
Figure 8. Composantes relatives au processus de formulation d'une solution [Prost, 1992].	37
Figure 9. Structure « arborée » analyse - synthèse [Conan, 1990] sur [Alexander, 1974].....	39
Figure 10. Structure « arborée » de résolution d'un problème [Conan, 1990] sur [Alexander, 1974]. .	40
Figure 11. Structure de résolution par « niveaux » [Conan, 1990], sur [Alexander, 1974]	41
Figure 12. « Black box designer » Design methods, [Jones, 1969]	43
Figure 13. Modèle d'Asimov.	49
Figure 14. Modèle de Zeisel.....	50
Figure 15. Population urbaine par grandes régions géographiques en pourcentage.....	57
Figure 16. Croissance annuelle des agglomérations urbaines Européennes ente 1950 et 1990.	58
Figure 17. Taux de croissance urbaine annuelle (moyenne 1990 – 2006).	58
Figure 18. Emissions de GES dans le monde par secteur en 2004.....	60
Figure 19. Emissions de CO ² dues à la consommation d'énergie par pays.....	60
Figure 20. Production pétrolière par régions. Source : BP Statistical Review, 2011	62
Figure 21. Production pétrolière annuelle par région et type d'hydrocarbure. Source : ASPO , 2003.	63

Figure 22. Estimations de la production pétrolière annuelle en Amérique du nord. Source : BITRE. .	64
Figure 23. Estimations de la production pétrolière annuelle en Amérique latine. Source : BITRE.....	64
Figure 24. Evolution de la consommation mondiale d'eau. Source : UNESCO.....	66
Figure 25. Energie primaire totale par source. Agence Internationale de l'Energie (IEA), 2005.	71
Figure 26. Répartition de la consommation mondiale de pétrole. Source : Observatoire de l'énergie, 1999.....	75
Figure 27. Répartition mondiale des émissions GES par activité en 2004 en imputant les émissions de l'industrie de l'énergie au secteur de la consommation.	77
Figure 28. Répartition mondiale des émissions brutes de GES par activité en 2009 (sauf ozone) pris en compte.	78
Figure 29. Répartition de la consommation finale d'électricité par secteur en France en 2010.....	78
Figure 30. Synthèse de l'Etude CREDOC.	83
Figure 31. Répartition des logements selon leur catégorie et le type de logement en 2011.....	84
Figure 32. Consommation énergétique finale du secteur résidentiel – tertiaire, par type d'énergie.	85
Figure 33. Répartition de la consommation énergétique par type de logement du parc résidentiel.	86
Figure 34. Etiquette énergie pour le secteur tertiaire.....	86
Figure 35. Zones climatiques de la Réglementation thermique de 2005 et de 2012.	99
Figure 36. 14 cibles de la démarche HQE.....	107
Figure 37. Flux de chaleur en parallèle à travers une enveloppe.	123
Figure 38. Flux de chaleur en série à travers une paroi.....	124
Figure 39. Spectre du rayonnement solaire dans le vide, sur terre et sous l'eau.	128
Figure 40b. Flux de chaleur en série à travers une paroi.....	131
Figure 41. Débits d'air réglementaires en fonction du nombre de pièces par logement.	132
Figure 42. Taux d'irradiation solaire I_s (W/m^2) en fonction de la zone climatique et l'orientation. ..	134

Figure 43. Bilan énergétique d'un logement.	138
Figure 44. Schémas urbanistiques de new York	147
Figure 45. Classement non exhaustif des outils en fonction de différents paramètres.....	156
Figure 46. Processus de projet architectural et urbain. Fernandez (2002)	166
Figure 47. Grille d'analyse thématique par ADDENDA.	168
Figure 48. Phases de conception du projet.	169
Figure 49. Phase <i>Analyse du programme</i>	172
Figure 50. Phase <i>Etude de la réglementation</i>	173
Figure 51. Phase <i>Implantation</i>	174
Figure 52. Phase <i>Morphologie</i>	175
Figure 53. Phase <i>Matérialité</i>	176
Figure 55. Phase <i>Systèmes</i>	178
Figure 56. Etude du lien entre choix de conception et aspects énergétiques.....	179
Figure 57. Etude de la composante énergétique dans la phase <i>Analyse du programme</i>	180
Figure 58. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>Etude de la réglementation</i>	181
Figure 59. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>Implantation</i>	182
Figure 60. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>morphologie</i>	183
Figure 61. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>Matérialité</i>	185
Figure 62. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>Spatialité</i>	186
Figure 63. Impact de la composante énergétique dans la phase <i>Systèmes</i>	187
Figure 64. Impact de la composante énergétique dans les différentes phases de conception	188
Figure 65. Irradiation solaire journalière en Wh /m ² . Base de données météo Paris.....	192
Figure 66. Température moyenne horaire. Météo Paris.	193

Figure 67. Humidité relative moyenne en pourcentage. Météo Paris	193	
Figure 68. Irradiation solaire - plan horizontal	Figure 69. Irradiation solaire - plan vertical sud ...	194
Figure 70. Irradiation solaire - plan ouest	Figure 71. Irradiation solaire - plan vertical nord	194
Figure 72. Comparaison du taux d'ensoleillement et de l'irradiation solaire à Paris et à Marseille. ...		195
Figure 73. Irradiation solaire mensuelle selon l'orientation du plan en kWh/m ² : météo Paris.		195
Figure 74. Comparaison Paris – Marseille de l'irradiation solaire en fonction de l'orientation		196
Figure 75. Irradiation solaire d'un bâtiment à Paris en fonction de son orientation.		196
Figure 76. Etude des effets de masque sur une parcelle vide et occupée.		197
Figure 77. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 3m d'hauteur.		197
Figure 78. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 12m d'hauteur.		198
Figure 79. Effets d'ombrage sur une parcelle pour un bâtiment de 18m d'hauteur.		198
Figure 80. Masque d'ensoleillement journalier et taux d'irradiation solaire.....		200
Figure 81. Influence des effets de masque sur les taux d'irradiation solaire d'une parcelle.		200
Figure 82. Niveaux d'irradiation solaire sur une parcelle à différentes hauteurs.		201
Figure 83. Structure urbaine modélisée.....		202
Figure 84. Modélisation 3D - typologies.....		202
Figure 85. Masque d'ensoleillement journalier en été.	Figure 86. Modélisation 3D.	203
Figure 87. Etude des effets de masque sur un environnement avec des orientations variables.		203
Figure 88. Etude des effets de masque en modifiant les typologies des bâtiments avoisinants.		204
Figure 89. Etude des effets de masque en modifiant les typologies des bâtiments éloignés.....		204
Figure 90. Etude niveaux d'irradiation solaire sur une parcelle et représentation 3D.		205
Figure 91. Mesures du niveau d'irradiation (en Wh/m ²) à hauteur 0m (RDC), 9m, 15m, 21m.		205
Figure 92. Visualisation de l'irradiation solaire en coupe sous forme de « radiographies ».....		206

Figure 93. Images du niveau d'irradiation solaire (de gauche à droite) en hiver, été et annuelle.	207
Figure 94. Images d'irradiation solaire en hiver, été et dans l'année à une hauteur de 6m du sol.	207
Figure 95. Niveaux d'irradiation solaire dans la parcelle d'étude en période hivernale	207
Figure 96. Niveaux d'irradiation solaire dans la parcelle d'étude en période estivale.....	207
Figure 97. Niveaux d'irradiation solaire annuels dans la parcelle d'étude.....	207
Figure 98. Niveaux d'irradiation solaire annuelle pour le site d'étude : gabarit « capable ».	208
Figure 99. Phases de <i>l'approche morphologique du potentiel énergétique</i>	208
Figure 100. <i>Données source</i> de l'outil relatives aux dimensions et à l'enveloppe générale.	210
Figure 101. Données source de l'outil relatives aux caractéristiques de l'enveloppe.	211
Figure 102. Tableaux de déperditions par l'enveloppe et par renouvellement d'air.	211
Figure 103. Déperditions surfaciques des parois par orientation et par niveau.....	212
Figure 104. Répartition des déperditions en pourcentage	213
Figure 105. Ecran des paramètres de la première phase de l'outil de conception	213
Figure 106. Outil de sélection de la période de calcul	215
Figure 107. Bilan énergétique par paroi et par étage d'un bâtiment.....	216
Figure 108. Bilan énergétique de l'outil de conception par orientation.....	216
Figure 109. Vue générale des tableaux de l'outil de conception.	217
Figure 110. Simulation de l'irradiation solaire dans un contexte urbain.	218
Figure 111. Représentation des plans de mesure de l'irradiation solaire	218
Figure 112. Relevé des valeurs d'irradiation du site pour le niveau RDC.	219
Figure 113. Bilan énergétique des points dans l'espace pour les niveaux RDC, R+2, R+4	220
Figure 114. Représentation en coupe du bilan énergétique.....	220
Figure 115. Représentation de la morphologie énergétiquement performante.....	221

Figure 116. Superposition de l'implantation formulée par les concepteurs et les dessins de l'outil. ...	222
Figure 117. Représentation architecturale des informations fournies par l'outil méthodologique.	222
Figure 118. Modèles d'étude en simulation thermique dynamique.	225
Figure 119. Hypothèses de calcul en STD.	225
Figure 120. Cas A : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.	226
Figure 121. Cas A : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.	226
Figure 122. Cas B : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.	227
Figure 123. Cas B : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.	227
Figure 124. Cas C : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en STD.	228
Figure 125. Cas C : Bilan des gains et des déperditions énergétiques en régime permanent.	228
Figure 126. Coupe, plans et schémas d'esquisse présentée par l'équipe A.	230
Figure 127. Implantation du projet d'après les plans du potentiel énergétique par niveau.	231
Figure 128. Coupe, plans et schémas d'esquisse présentée par l'équipe B.	231
Figure 129. Comparaison des caractéristiques techniques des projets.	232
Figure 130. Simulation des températures en STD pour le cas B en une journée de mi-saison.	233
Figure 131. Zoom du tableau de navigation de la plateforme <i>Grasshopper</i>	236
Figure 132. Visualisation du tableau de navigation de la plateforme <i>Grasshopper</i>	237
Figure 133. Functional Analysis System Technique.	237
Figure 134. Modélisation 3D du Facteur Lumière Jour FLJ.	238
Figure 135. Visualisation des trois logiciels reliés par la plateforme.	239
Figure 136. Représentations tridimensionnelle de la morphologie optimale en fonction du FLJ.	239
Figure 136. Représentations tridimensionnelle de la morphologie optimale par étages.	239

Table des formules

$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = W + Q$ (1).....	119
$P = Qt$ (2).....	121
$C = Q\Delta t$ (3).....	121
$Q = M . C . \Delta t$ (4).....	121
$Q = V . \rho . C . \Delta t$ (5).....	121
$Qt = Vt\rho . C . \Delta t$ (6).....	122
Si $P = Qt$, $P = Dv . \rho . C . \Delta t$ (7).....	122
$U = 1R$ (8).....	123
$\Delta T = r \Phi$ et $\Delta T = R \varphi$ (9).....	123
$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) \Delta T$	124
Soit $\Phi = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) \Delta T$	124
$\Delta t = R . \varphi$ (11).....	124
D'après $\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = (R_1 + R_2 + R_3) . \varphi$	124
Soit $\Delta T = (R_1 + R_2 + R_3) . \varphi$	124
$K = U \times S$ et $r = RS$ (12).....	124
$\varphi = \lambda e . \Delta T$ (13).....	125
$U = \lambda e$ (14).....	125
$R = e\lambda$ (15).....	125
$\varphi = \lambda . \Delta Te$ (15).....	126
$\varphi = \lambda . dTdx$ (16).....	126
$\varphi cv = Ucv (Ta - Tp)$ (17).....	126
Or, si $R = e\lambda$ donc, $R = \Sigma e\lambda + 1hi + 1he$ (18).....	129
Si $U = 1R$ donc, $U = 11hi + \Sigma R + 1he$ (19).....	129
$Ds = U \times S \times \Delta T$ (20).....	129
$Dl = k \times L \times \Delta T$ (21).....	131
$Hv = qv \times C \text{ th } \times \Delta T$ (22).....	132
Si $ei = nS$ donc $Qi = ei . S . t$ (23).....	133
$As = A . Fs . S$ (24).....	135
$Qs = \Sigma (Isj . Asj) . 24$ (24).....	135
$QECS = p \times 1,1628 \times V \times (T - Tef)$ (25).....	137



UNIVERSITE DE BORDEAUX 1

Ecole doctorale de Sciences Physiques et de l'ingénieur

Laboratoire GRECAU

Groupe de Recherche Environnement Conception Architecturale et Urbaine

THESE - ANNEXES

EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
DOCTEUR

Discipline : « Sciences et techniques architecturales »

Présentée par

Andres Fernando MORENO SIERRA

Intégration des aspects énergétiques dans la conception architecturale: approche méthodologique

Sous la direction de Catherine SEMIDOR

Docteur en sciences, professeur, ENS Architecture et Paysage de Bordeaux

Soutenue publiquement le 21 décembre 2012

Devant le jury composé par :

M. INARD, Christian

M. ADOLPHE, Luc

M. PUIGGALI, Jean- Rodolphe

M. BONNEAUD, Frédéric

M. ROJAS ARIAS, Juan Carlos

Mme. SEMIDOR, Catherine

M. FAVET, Nicolas

Professeur, Université de la Rochelle

Professeur, Universités INSA - GCU

Professeur, Université Bordeaux 1

Professeur, ENSA Toulouse

Professeur, ENSAPBx

Professeur, ENSAPBx

Architecte, NFA - CIFRE

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Invité

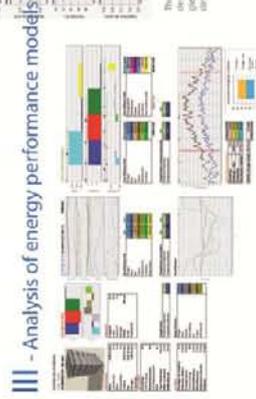
Integration of energy issues in architectural design of collective housing

Université Bordeaux 1 – FRANCE, Ecole Doctorale de Sciences Physiques – Laboratoire GRECAU – Nicolas Favet Architectes
Andres Moreno Sierra

I - Design process analysis



1



In the present state of the problem involved in increased low energy architectural solutions appear to be not of value compared to an architectural approach that takes account of the energy performance. Most existing approaches aimed at reducing energy consumption are based on the energy behavior of the building and not on the energy behavior of the building. The objective is to improve the design process as to constitute a working tool for architects and engineers based on the early stage of the design process. The objective is to measure the energy performance of different architectural strategies and propose a methodological tool for integrating building's energy performance in line with the optimization of cost.

The methodology is based on systems analysis of different morphological and topological configurations. A comparative study of cases will reveal the best architectural solutions in the early stages of the design process. The objective is to propose a simple formulation of design strategies that can be used by architects and engineers to optimize the energy performance of their buildings on the basis of energy performance, but also form specific standards of construction.

The objective is to propose a simple formulation of design strategies that can be used by architects and engineers to optimize the energy performance of their buildings on the basis of energy performance, but also form specific standards of construction.

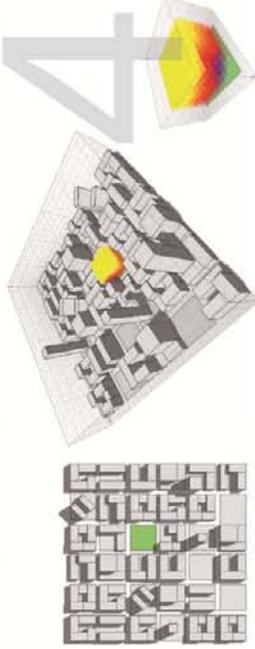
II - Conversion of urban environments in numerical models of solar irradiation



3

The objective of these numerical models is to create energy performance indicators. The representation of buildings' form and morphology allows different possibilities to the architect to develop the final project.

IV - Integration of energy numerical models to buildings morphology



V - Definition of building envelope and program - Synthesis project



8 7 3 9 2 4 1 0 1 0 1 0 0 8 6 2 9 2 4 8 9 2 5 1 8 4 1 0 1 1 0 0 8 7 3 9 2 4 8 9 2 5 1 8 4 1 0 1 1 0 0 8 6 2 6 7 1 8 4 5

2. *Projet de recherche NFA Architectes – Appel à idées CQHE*

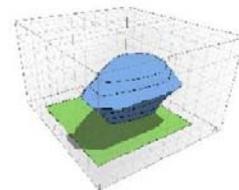
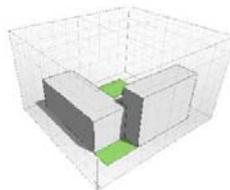
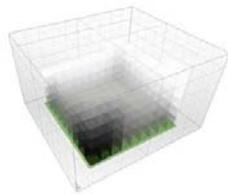
Concept Qualité Habitat Energie

plan urbanisme construction architecture **PUCA**

Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer

Méthode CQHE

10 août 2009



ECONCEPT

Approche méthodologique de conception de logements collectifs à Basse énergie

ECOFYS

CORETUDE
BUREAU D'ÉTUDES

NFA
NICOLAS FAVET ARCHITECTES



Nicolas Favet Architectes

Direction du projet:
Nicolas Favet, architecte
Andres Moreno, architecte R&D.
Equipe de concepteurs:
Tam Vo Phi, architecte
Raphael Philippe, architecte

NFA (NICOLAS FAVET ARCHITECTES) est une agence d'architecture et d'urbanisme créée il y a 10 ans par Nicolas FAVET, architecte D.E.N.S.A.L.S., urbaniste I.U.R. Basée à Montreuil (siège) et Dijon (bureau), NFA est une agence ayant une expérience européenne du projet (installée à Helsinki jusqu'en 2000). Depuis ses débuts, l'agence NFA a affirmé et démontré que la qualité architecturale ne saurait être atteinte sans dimensions environnementales et qu'inversement, la qualité environnementale ne saurait se passer d'une qualité architecturale affirmée. NFA a ainsi développé une expertise dans le domaine de la Haute Qualité Environnementale, de la performance énergétique et de la réduction d'émission de gaz à effet de serre, qu'elle intègre à différentes échelles de projets, de l'urbanisme à la conception de produits.



ECOFYS

Direction :
Christophe Neves
Equipe de concepteurs:
Markus Offermann, Dipl.-Phys
Christelle Bougard, Ingénieur

Depuis 1984, Ecofys se spécialise dans l'économie d'énergie et la recherche des solutions pour l'énergie durable. Partie intégrante du groupe Ecomcern, l'entreprise travaille dans ce domaine des services de conseil ainsi que dans le développement de produits. Ecofys mène également une importante activité de recherche et a ainsi finalisé mondialement des projets pour de multiples sociétés dans les domaines de l'énergie, de l'urbanisme, du bâtiment, des administrations locales, des institutions internationales, et des divers consommateurs d'énergie. Avec plus de 200 personnes dans neuf pays, il est aujourd'hui un des plus grands consultants dans les domaines de l'énergie durable et des stratégies climatiques.



CORETUDE

Direction et conception:
Alain Duval

CORETUDE est un BET tout corps d'état qui participe à la conception et à la mise en œuvre de différents projets dans les secteurs du logement, du tertiaire, des hôpitaux, des laboratoires pharmaceutiques et de l'industrie. Il travaille également depuis plusieurs années dans la mise en avant des techniques innovantes en matière de performance énergétique. En tant que Bureau d'Etudes spécialisé, il possède des compétences dans les aspects thermiques liés à la conception de bâtiments à haute qualité environnementale et possède une expertise dans les domaines du Chauffage, de la ventilation, de l'électricité, et des installations hydrauliques.

Index

PRESENTATION DE L'EQUIPE

- INTRODUCTION
- 1 • INNOVATION ET PERFORMANCE ENERGETIQUE EN EUROPE
- 8 • THEME I: APPROCHE GENERALE DE CONCEPTION
- 9 • I.A. Démarche de l'équipe
 - IA.1. Analyse du processus de conception en architecture
 - IA.2. Methodologie de conception - Démarche de l'équipe
- 27 • I.B. Moyens mis en œuvre
 - IB.1. Logiciels d'analyse et simulation
 - IB.2. Mise au point d'un outil de conception
- 34 • THEME II: APPROCHE ARCHITECTURALE ET ENERGETIQUE
- 35 • II.A. Implantation
 - II.A.1. Stratégies climatiques
 - II.A.2. Stratégies architecturales et environnementales
 - II.A.3. Intégration au contexte urbain
- 46 • II.B. Densité et morphologie
 - II.B.1. Réflexion sur la densité
 - II.B.2. Compacité & performance énergétique
- 46 • II.C. Réflexion sur l'enveloppe
- 49 • THEME III: CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT DU PROJET
- 50 • III.A. Orientations architecturales et techniques
 - III.A.1. Projet A - Démarche classique
 - III.A.2. Projet B - Démarche de l'équipe
- 53 • THEME IV: PERFORMANCE ENERGETIQUE
- 54 • IV.A. Etudes comparatives de performance énergétique
- 55 • V. CONCLUSIONS

introduction

A l'heure actuelle où les enjeux énergétiques liés à la conception des logements collectifs sont incontournables, une réflexion sur les nouveaux modes de concevoir et construire l'architecture dans les années à venir s'impose.

La technique a progressé rapidement dans le domaine de la performance des matériaux et dans l'efficacité des systèmes, mais il est évident que le cœur de la réflexion se trouve dans les moyens à mettre en œuvre pour concevoir non seulement des bâtiments à haute performance énergétique, mais aussi des projets à énergie positive et à faible impact environnemental.

Il semblerait que les modes de conception des bâtiments performants actuels, aient poussé les exigences techniques à une limite qui rentre en conflit avec la logique économique des logements collectifs. De nos jours, un bâtiment performant entraîne des coûts élevés, même en adoptant une vision globale des économies d'énergie à long terme.

Une des principales causes des surcoûts dans la construction à haute efficacité énergétique, est souvent liée au manque de coordination entre l'architecture et l'ingénierie dans la conception en amont du projet, entraînant des erreurs dans l'approche initiale devant être corrigées postérieurement par le sur dimensionnement de l'enveloppe et des installations techniques. Par ailleurs, les concepteurs manquent d'outils leur permettant d'ap-

préhender les aspects énergétiques dans les premières phases de conception d'un projet.

Il est donc fondamental de mettre en œuvre des nouveaux modes de conception pouvant intégrer à la fois les problématiques urbaines, les aspects architecturaux et l'ingénierie environnementale dans un processus commun de réflexion.

Architecture et innovation

L'objectif du programme CQHE est d'encourager des démarches afin de développer des concepts innovants d'habitat à haute performance énergétique, et pouvant être reproductibles et applicables dans différents contextes urbains.

Mais développer des concepts d'habitat «pilotes» exige une réflexion qui va au-delà de l'échelle du bâtiment. Par définition, la notion de performance impose une réflexion sur l'utilisation optimale des ressources disponibles: une architecture à haute performance énergétique est en relation directe avec son contexte géographique, climatique, et avec son environnement urbain. Comment aborder alors cette problématique?



Méthodologie de conception

La conception des bâtiments à basse énergie passe par une réflexion sur 3 axes: la réduction des besoins, l'optimisation des systèmes et la production d'énergie. Tous les bâtiments performants appliqueront cette logique, mais les solutions semblent être liées à la technique: sur-isolation, amélioration de l'étanchéité, récupération de chaleur par la ventilation, optimisation des systèmes de chauffage et installation de panneaux thermiques ou photovoltaïques. Mais la technique évolue rapidement, et les systèmes préconisés au moment de la conception seront probablement obsolètes très peu de temps après leur construction.

Il est certain qu'au-delà des prescriptions techniques, l'architecture évolue vers les constructions à énergie positive. Cela met en question le type d'exploitation des ressources renouvelables et pose l'enjeu de la production d'énergie sur place. Le concept «d'enveloppe active» semble être une piste incontournable: l'énergie solaire est la source d'énergie au plus grand potentiel dans l'avenir, raison pour laquelle le concept «d'accessibilité au soleil» des constructions va certainement déterminer le potentiel des bâtiments à être autonomes en énergie et va probablement modifier les règles d'urbanisme actuelles. Il existe donc un grand potentiel passif dans la conception des bâtiments qui doit être exploré dans la voie de l'optimisation énergétique.

Il est possible de concevoir aujourd'hui un bâtiment «prototype» à haute performance énergétique quelque soit son contexte d'implantation, certainement en s'appuyant fortement sur des moyens techniques coûteux.

Mais concevoir un «prototype» apparaît comme une contradiction du point de vue de la notion «d'accessibilité à la lumière» et de la relation de l'architecture avec son environnement. Il est essentiel de laisser la liberté à l'architecture de s'approprier le site, afin qu'elle puisse s'adapter aux caractéristiques du paysage, au climat, aux conditions du programme et au contexte urbain, en construisant par ailleurs une identité architecturale propre.

A partir de cette réflexion, le travail de notre équipe s'est concentré sur la mise en place d'une méthodologie de conception qui permette de répondre au contexte spécifique de chaque projet, en optimisant la performance énergétique du bâtiment.

La démarche générale propose une méthode d'optimisation du potentiel énergétique passif du bâtiment relatif au contexte urbain et à l'environnement du projet. Il s'agit donc de faire émerger de nouvelles formes architecturales à partir d'une approche bioclimatique qui répond plus «littéralement» aux caractéristiques de l'environnement dans l'objectif d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

INNOVATION & PERFORMANCE ENERGETIQUE EN EUROPE

Benchmark des méthodologies de performance énergétique et des stratégies d'innovation des logements collectifs en Europe.

A vant d'approfondir dans la méthodologie de conception, nous nous sommes intéressés aux méthodes et pratiques suivies dans six pays européens pour concevoir des logements collectifs à haute performance énergétique: l'Allemagne, la Suisse, les Pays-Bas, l'Angleterre et l'Italie.

Cette étude met en évidence l'état général des démarches de qualité environnementale dans chaque pays, en valorisant les stratégies énergétiques mises en place dans la conception des logements.

À partir de l'analyse des différents programmes de recherche développant des concepts et technologies innovantes, on peut mieux appréhender la question de l'efficacité énergétique comme un parti pris en faveur de l'amélioration de la performance et de la qualité de l'habitat. Quelques références de logements collectifs à haute performance énergétique sont présentées pour chaque pays, mettant en évidence les types de construction (matériaux, caractéristiques, systèmes et performances énergétiques du bâtiment).

Certificats et labels

Allemagne

3 Liter - Haus
Énergie primaire annuelle pour le chauffage < 24 kWh/m² en réf. à la surface nette au sol
Méthode: DIN 4109-6, DIN 4701-10 (→ ENEV 2007)

KfW Effizienzhaus 55 or KfW Effizienzhaus 70
Besoins annuels en énergie primaire et pertes de chaleur: (d'après ENEV) < 55 % ou 70 % des valeurs standard actuelles - bâtiments neufs.
Méthode: DIN 4108-6, DIN 4701-10 (→ ENEV 2007)
Certification par experts.

Passivhaus
Caractéristiques principales:
- Besoins de Chauffage et refroidissement < 15 kWh / (m²a)
- Demande d'énergie primaire < 120 kWh / (m²/an) (y compris ECS et domestiques élec.)
- Étanchéité à l'air (Test Porte soufflante)
n50 < 0,6 / h-1
- Apports internes (pour chaque zone) < 10 W/m²
Méthode: PHPP
Certification par l'Institut Passivhaus.

Nullenergiehaus / Plusenergiehaus
Sur la base d'une demande d'énergie minimale, la maison produit (généralement par le biais du PV) sur un an, une quantité égale ou supérieure aux besoins (à l'exclusion des domestiques élec.)
ZeroHAUS
Principales caractéristiques:
HT < (ENEV 2002 - 45%)
QP < 100 kWh/m²a (y compris tous les domestiques aussi el.)
Bilan CO₂ = 0 kg/m²a (par l'utilisation des énergies renouvelables).

Suisse

Minergie
30 kWh/m² (pour MFH comme Minergie)
- Chauffage, eau chaude sanitaire (ECS) et de ventilation (l'utilisation d'un Ventilateur mécanique est obligatoire)
- Qh < 90% de la demande de chauffage par la régulation du bâtiment
- Eau chaude sanitaire doit être fournie au minimum par 20% de sources renouvelables

Minergie P
30 kWh/m² (pour mfh comme MinergieP)
- Chauffage, eau chaude sanitaire (ECS) et ventilation (l'utilisation d'une ventilation mécanique est obligatoire)
- La demande de chauffage Qh doit être inférieure à 15 kWh / m² a ou 0 Qh < 60% de la demande de chauffage par la régulation du bâtiment.
- Les appareils et l'éclairage à haute efficacité énergétique doivent être utilisés
- Eau chaude sanitaire doit être fournie au minimum par 20% de sources renouvelables
- Étanchéité équivalente à 0,6 h doit être garantie

En plus des normes Minergie et MinergieP sont aussi définies des éco normes, qui utilisent le même seuil thermique, mais ajoutent des aspects écologiques tels que l'éclairage naturel, le recyclage des produits de construction, l'acoustique, le confort, le cycle de vie etc...

Les nouvelles normes sont appelées Minergie-ECO et Minergie-P-ECO.

* La part de Minergie en 2007 représente environ 25% des nouvelles constructions.



Certificats et labels

Angleterre (1/2)

	Code For Sustainable Homes	CarbonLite	Passivhaus
Organismes délivrant les certificats	Building Research Establishment (BRE)	Association of Environmentally Conscious Builders	BRE (accredited by the Passivhaus Institute)
Exigences d'efficacité	Bâtiments neufs (Angleterre, Pays de Galles, Irlande du Nord)	Bâtiments neufs: Silver Énergie utile pour le chauffage: 40kWh/m ² /an	15kWh/m ²
	Amélioration du taux d'émission cible des logements: Niveau 1 > 10% Niveau 2 > 19% Niveau 3 > 25% Niveau 4 > 44% Niveau 5 100% Niveau 6 Zéro Carbone	Consommation d'énergie primaire: 120kWh/m ² /an Émissions CO ₂ : 22kg/m ² /an	
Exigences d'efficacité	TER Benchmarks: Maison individuelle 24 kgCO ₂ /m ²	Passivhaus (interprétation AECB) Énergie utile pour le chauffage: 15kWh/m ² /an	
	Maison semi-individuelle 21 kgCO ₂ /m ²	Consommation d'énergie primaire: 78kWh/m ² /an	
	Appartements en hauteur 25 kgCO ₂ /m ²	Émissions CO ₂ : 15kg/m ² /an	
		Gold Énergie utile pour le chauffage: 15kWh/m ² /an Consommation d'énergie primaire: 58kWh/m ² /yr Émissions CO ₂ : 4kg/m ² /an	

Angleterre (2/2)

	Code For Sustainable Homes	CarbonLite	Passivhaus
Perméabilité à l'air	Aucune exigence obligatoire de règlement autre que la norme en vigueur: Bâtiments neufs: <10m ³ /(h.m ²) @ 50Pa Bâtiments existants: "Raisnable"	Silver <3.0m ³ /(h.m ²) @ 50Pa For MCV (Ventilation mécanique hygiénique) <1.5m ³ /(h.m ²) @ 50Pa For MVHR (ventil. mécanique avec récup. de chaleur)	<1m ³ /(h.m ²) @ 50Pa
		Passivhaus (interprétation AECB) 0.75m ³ /(h.m ²) @ 50Pa Gold 0.75m ³ /(h.m ²) @ 50Pa	
Investissements	Code de niveau 3 (mesures d'efficacité énergétique seulement) Maison individuelle: -4% Maison semi-individuelle: -5% Appartements: -3%	Pas d'information	Surcoût de 10% par rapport à une maison standard
	Code de niveau 5 (mesures d'efficacité énergétique seulement) Maison individuelle: -22% Maison semi-indiv.: -26% Appartements: -23%		
Usages	Chauffage, eau chaude, ventilation, climatisation, éclairage (appareils électroménagers inclus pour le code de niveau 6)	Chauffage, eau chaude, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, les appareils électroménagers	

Benchmark - Performance énergétique en Europe

2

Certificats et labels

Pays Bas

EPC - Coefficient de performance
En général, l'EPC est utilisé pour définir des ambitions au delà de la norme. Par exemple, les autorités locales peuvent demander des valeurs plus faibles que le CBE.

Dans le passé, l'étiquette WWF Solar House a été utilisée. À cette époque (1996), les ambitions du WWF étaient de parvenir à une réduction de 50% inférieure au EPC. Le EPC a baissé à plusieurs reprises (de 1,4 à 1,2 et à 1,0 tot 0,8). Le label se concentre sur le développement durable, et construit la qualité de la lumière du jour.

Dans l'alliance entre les gouvernements et les promoteurs de projets où il est convenu de réduire le CBE tot 0,6 et 0,4 dans les années à venir, il y avait même un accord des autorités locales qui ne sont pas autorisés à fixer des ambitions supplémentaires) sauf pour les 10 projets pilotes.

Part des bâtiments avec une meilleure performance que celles requises par la réglementation:
Règle théorique: 20% des constructions sont 10-15% supérieures en efficacité aux exigences du EPC et moins de 5% sont supérieures à 20% d'efficacité.

Qualité environnementale

Aux Pays-Bas, 3 systèmes sont utilisés:
• «GPR gebouws»: liste de contrôle sur une grille comportant 5 thèmes de développement durable. GPR bâtiment est utilisé par 120 collectivités locales (20% du montant total dans les Pays-Bas);
• GreenCalc: un outil d'ACV, plus complexe;
• Green Mortgage: liste de contrôle où un montant minimum de points est nécessaire pour obtenir un taux d'intérêt inférieur sur un projet de développement durable.
• BREEM «Environmental Assessment Method For Buildings» est introduit dans les Pays-Bas dans une phase pilote. Les pilotes sont principalement choisis dans le secteur de la construction commerciale.

Italie

1 Démarche volontaire "CASACLIMA". Ce régime a été créé par l'Agence CasaClima (province de Bolzano), et il est continuellement en cours de développement. Il prend en compte la qualité de l'enveloppe du bâtiment (matériaux utilisés et leur valeur U) ainsi que le système de chauffage. Les trois catégories pour l'obtention de la classification CasaClima sont les suivantes:
CasaClima Oro (une demande de chauffage inférieure à 10 kWh/m²/an),
CasaClima A (demande de chauffage inférieure à 30 kWh/m²/an),
CasaClima B (demande de chauffage inférieure à 50 kWh/m²/an).
CasaClima Plus est la classe obtenue lorsque le chauffage provient d'énergies renouvelables et si les matériaux sont naturels. Le certificat est donné par les évaluateurs (l'Agence CasaClima organise des cours spécifiques). Chaque année, l'Agence lance un concours pour identifier les meilleures réalisations CasaClima de l'année. L'Agence CasaClima a élaboré un outil logiciel pour effectuer les calculs nécessaires à l'évaluation de l'immeuble.

En regardant les données du dernier recensement Italien (2001), environ 75% des bâtiments résidentiels ont été construits avant 1976, la première année de la réglementation de l'énergie. Seul un très faible pourcentage de maisons ont été construites après 1993, année au cours de laquelle la loi 10/1991 (pour

réduire les consommations d'énergie des bâtiments) est devenu obligatoire. Cela signifie que le pourcentage de l'efficacité énergétique des bâtiments n'est pas encore significatif par rapport à l'ensemble du parc immobilier (près de 30 millions de maisons).

Comme environ 60% des investissements dans le secteur du bâtiment concernent la rénovation des bâtiments existants, la réglementation, les encouragements et les initiatives en faveur de l'efficacité énergétique des bâtiments devraient se concentrer sur les bâtiments existants plus que sur les nouvelles constructions.

En 2006 a été constitué à Trentino, le Green Building Council - Italie. l'objectif principal est l'introduction dans le pays du programme LEED.

Une démarche volontaire de certification environnementale et énergétique est la méthode de certification libre SB100 (construction durable dans 100 actions), élaborée par l'ANAB (Association nationale pour la Bio-Architecture). Il considère 100 actions équivalentes à un score de 0 à 100. Ce système peut être utilisé non seulement, pour calculer le score de durabilité d'un bâtiment, mais aussi en tant que ligne directrice de conception.

Benchmark - Performance énergétique en Europe

3

Vitrages «actifs»:
vitrages électrochromes et thermochromes

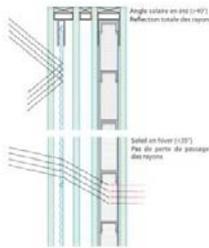
Plusieurs exemples ont aujourd'hui été expérimentés, à savoir : le verre passant instantanément de l'état transparent à l'état translucide grâce à une commande électrique ; le vitrage dont la coloration change, toujours à l'aide d'une commande électrique, selon la transmission lumineuse et le facteur solaire recherché ; enfin, les produits adaptables à la température ou à la luminosité ambiante.

En France, l'Institut d'Électronique du Sud 10ES, membre du pôle Derbi, s'implique activement dans le développement des énergies renouvelables. Trois de ses équipes de recherche travaillent actuellement sur six projets labellisés par le pôle de compétitivité Derbi. Parmi eux figure le projet Fluxo, qui vise à inclure et à polariser des cristaux liquides dits « cholestériques » dans des vitrages. Capables de réfléchir ou de laisser passer la lumière, ces vitrages pourront chauffer le bâtiment ou le protéger du soleil, voire même produire de l'électricité lorsqu'ils intégreront du silicium photovoltaïque.

En Allemagne, de nombreuses recherches sont menées par des instituts et entreprises pour développer des projets pilotes sur ces technologies de vitrage actif.

Vitrage 'PCM'

GLASSX crystal intègre 4 composantes du système dans une unité fonctionnelle: isolation thermique, protection contre la surchauffe, conversion de l'énergie et stockage thermique. Un triple vitrage isolant fournit une excellente isolation thermique d'une valeur $U = 0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$. Un volet de prismes dans la lame d'air extérieure reflète le rayonnement solaire à haute altitude en été et les transmet à des altitudes inférieures à 35° en hiver. Un des composants essentiels est le fin module de stockage de chaleur dans un matériau à changement de phase, qui équivaut à une capacité de stockage d'environ 20 cm de béton. La chaleur est stockée dans le MCP au moyen d'un procédé de fusion. Au cours de la nuit et les jours suivants, la chaleur stockée est livrée à l'intérieur pendant la recristallisation.



Benchmark - Performance énergétique en Europe

Vitrages photovoltaïques

Les lauréats du prix «POWER-CELL» (Wafer Polycrystallin Engineering) offrent aux architectes et aux planificateurs de nouvelles possibilités pour la conception des façades qui produisent de l'énergie en conservant l'esthétique.

Les baies vitrées dans les immeubles de bureaux, les jardins d'hiver ou sur les toits ouvrants automobiles, constitueront des fournisseurs d'énergie à cellules PV transparentes. Les modules translucides POWER-CELLS peuvent être directement intégrés dans la façade. Tous les types commerciaux de verre sont adaptés, de verre feuilleté de sécurité à isolation thermique, vitrages, même les surfaces courbes peuvent constituer des générateurs solaires avec POWER-cellules. Le produit standard permet à un dixième de la lumière de passer en travers avec un taux d'efficacité de 10%. Dans l'avenir, les cellules permettront un maximum de 30% de transmission lumineuse et seront fabriquées sur demande. Une large surface de systèmes photovoltaïques sera possible avec la nouvelle technologie. La transparence remplace les modules classiques qui génèrent de l'ombre, contribuant ainsi à la diminution des coûts de construction et à la réduction des consommations d'énergie pour le refroidissement des pièces. La surface de la structure des cellules POWER devrait permettre dans le cas où elle est montée verticalement, d'accroître le rendement énergétique des systèmes.



- PROGRAMME ○
- REGLEMENTATION ○
- ANALYSE/IDEA ○
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIAUX ○
- SPECIALITE ○
- SYSTEMES ○

High air tightness

L'étanchéité à l'air est, en principe, différente pour les constructions préfabriquées et pour la construction en brique. La brique est plus facile car aucune technologie spécifique est nécessaire (pas de membranes).

Construction en brique
Remplissage en plâtre nécessaire pour couvrir les surfaces murales du sol au plafond, et le plâtre constitue la couche d'étanchéité à l'air. En raison des hautes températures des surfaces intérieures, et par le biais de l'épaisseur de l'isolant, il n'y a pas de risque de condensation. Les installations électriques doivent être pleinement intégrées dans le plâtre, ainsi que les installations sanitaires (le plâtre doit être terminé avant la plomberie) et les fenêtres. L'autre point important est l'écart entre le mur et le toit de la construction (ici des films d'étanchéité sont souvent appliqués). Si le toit est isolé, un film doit être appliqué pour éviter l'humidité entrant dans la couche d'isolation. Cette feuille constitue normalement la couche de l'étanchéité à l'air. Tous les passages à l'air doivent être généralement examinés et définitivement scellés (câbles en dehors de l'éclairage, canalisations pour les capteurs solaires, etc.)

Constructions préfabriquées
Il est nécessaire d'appliquer une couche (souvent une plaque de bois), recouvrant entièrement la surface du mur. Les installations électriques sont à l'avant (pas de passage) et la maison doit être scellée uniquement entre le mur et le sol, dans les angles et à l'écart de mur et de la toiture. Les fenêtres Passivhaus ne sont pas particulièrement hermétiques. Elles sont installées in-situ afin d'être incluses dans le test de la porte soufflante.



Benchmark - Performance énergétique en Europe

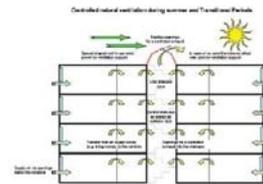
Isolants sous vide

La performance thermique des isolants sous vide se base sur la combinaison de deux phénomènes pour réduire la convection de la phase gazeuse :
- Une basse pression est établie pour éliminer le gaz au maximum.
- Des matériaux nanoporeux, tels que les poudres de silice et les aérogels, sont utilisés pour emprisonner le gaz restant dans des cavités de dimension inférieure au libre parcours moyen du gaz : la convection du gaz est ainsi minimale.

Avec une densité de 180 kg/m³, ces isolants améliorent considérablement l'inertie du bâtiment. A performance thermique équivalente, 1 cm d'isolant sous vide correspond à 6 cm de PSE et 9 cm de laine de verre. Le gain en surface et en volume dans le cadre d'isolation par l'intérieur est considérable. L'épaisseur de ces matériaux varie entre 15 et 30 mm, pour un coût entre 40 à 60 €/m². L'application de ces matériaux a été expérimentée en Allemagne. Elle est conseillée pour les portes, les coffres de volets roulants, les planchers de rénovation et les façades. La fragilité de ce produit limite son utilisation aujourd'hui à des bâtiments dont l'entretien est systématiquement assuré tels que les hôpitaux, les écoles, les hôtels, etc.

Ventilation hybride

En raison de la forte demande d'énergie primaire par l'utilisation d'électricité dans les systèmes de ventilation mécanique (environ 20%), cette demande peut être réduite par une ventilation hybride avec un système de ventilation naturelle pendant certaines périodes, (normalement plus de 50% de l'année) idéalement, l'escalier central est inclus dans la stratégie de ventilation hybride. C'est surtout lorsque la structure est plus élevée que des effets thermiques peuvent être utilisés en jouant le rôle de moteur. Afin d'utiliser également l'énergie éolienne, la construction technique de la toiture de la circulation peut assister la ventilation naturelle.



Le plus simple est la mise en œuvre des écrans qui indiquent le mode de ventilation, par exemple, mode vent, ventilation naturelle, ventilation mécanique est éteinte ou réduite au minimum et l'utilisateur est responsable de l'alimentation, en un troisième scénario alternatif en de plus par la ventilation mécanique, la ventilation naturelle supplémentaire entraînerait des charges supplémentaires de chauffage.

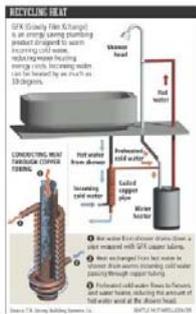
Plus coûteux mais de meilleure qualité est un contrôle automatique des ouvertures. Une ventilation hybride est de plus en plus courante dans les immeubles de bureaux en Allemagne et les pays scandinaves, mais pas encore pour les constructions résidentielles.

- PROGRAMME ○
- REGLEMENTATION ○
- ANALYSE/IDEA ○
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIAUX ○
- SPECIALITE ○
- SYSTEMES ○

Projets d'Innovation

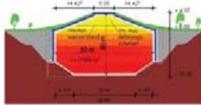
Récupération de chaleur à partir des eaux usées

Avec cette installation, les besoins de chauffage pour l'ECS sont réduits de façon significative. L'eau chaude provenant de la douche est utilisée pour préchauffer l'eau douce (voir photos ci-dessous). Ce système est jusqu'à présent très rarement réalisé. L'idée est développée dans les Pays-Bas et depuis quelques mois en France.



Stockage Inter-saisonnier

Exemple Lotissement Woggenhusen à Friedrichshafen
En raison de sa forme conique tronquée, le couvercle de la cuve de stockage s'auto-supporte et ne nécessite pas un soutènement supplémentaire. La morphologie est le résultat de nombreuses études concernant la forme et le mode de construction de la cuve. La surface de stockage et les coûts ont été optimisés grâce à une réduction de la masse et une réduction de l'excavation. Le fond de la cuve, en forme de cône tronqué, est posé sur une dalle de béton de 20cm. La paroi cylindrique est érigée. La paroi est 'précontrainte' par des câbles circulaires. De plus, la paroi est armée par des barres en acier. Pour le bétonnage de la toiture en forme de cône tronqué, l'acier inoxydable est employé comme coffrage. La soudure des tôles permet d'éviter les déformations. Le revêtement en acier inoxydable intérieur est composé de tôles de 1,25mm d'épaisseur. Celles-ci sont ancrées dans le béton. Le lien entre la toiture et les parois du cylindre est réalisé avec un support circulaire précontraint. Un an s'est écoulé entre le début du chantier et le premier remplissage de la cuve.

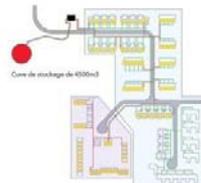


Stockage Inter-saisonnier

Exemple Lotissement Bramfeld à Hambourg
Le lotissement est composé de 124 maisons individuelles. Un réseau de chaleur alimenté par des collecteurs solaires reliés à une zone de stockage longue durée permettent de fournir 50% des besoins en chaleur.
2 940m² de capteurs solaires thermiques sont intégrés en toiture des bâtiments. L'unité de stockage de chaleur inter-saisonniers a une capacité de 4 500m³. Une centrale de production de chaleur assure le chauffage et la production d'ECS. Les besoins de chaleur résiduels (après intervention du stockage) sont assurés par une chaudière-gaz à condensation.

La distribution de chaleur se fait par le biais de 4 réseaux de chaleur associés. L'eau chaude produite par les capteurs et transportée par les réseaux transmet sa chaleur à l'unité de stockage par le biais d'échangeurs. L'eau chaude stockée passera à son tour dans un échangeur de chaleur pour chauffer l'eau du réseau alimentant les habitations en chauffage et eau chaude.

Coût de fixation : Collecteurs : 195 000€
Cuve de stockage : 930 000€
Centrale : 511 000€ (tout compris : viabilisation, construction, livraison, etc.)
Réseau de chaleur et réseau de collecteurs (de l'eau chaude fournie par les collecteurs), station d'échange : 600 000€
Planing, surveillance des travaux, main d'œuvre, taxes, etc. : 540 000€
Divers : 28 000€
TOTAL : 3 504 000€, soit 29 256€/par logement et 237€/m² de surface habitable.



Le réseau chaud correspond à la collecte de l'eau chaude produite grâce aux collecteurs solaires en toiture. Le réseau froid est le réseau de distribution de chaleur aux logements.



Benchmark - Performance énergétique en Europe

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- MORPHOLOGIE
- MATÉRIALITÉ
- SPECIALITÉ
- SYSTÈMES

Références de logements Passive House

Opérations Passive house en Allemagne

Photo	Type	Adresse	Localisation	Année de construction	Surface habitable	Coût	Matériaux	Isolation	Tuiles	fenêtres	Ventilation	Équipements	Chauffage	ECS	Structure	Performances	
	MPH	11	Bonn	2011	1071	1071	Coût de construction 950 €/m ² (hors taxes) 157 900 €/m ² (hors taxes)	Murs : isolation avec laine minérale et laine de verre Plafond : isolation avec laine minérale et laine de verre Sol : isolation avec laine minérale et laine de verre Toiture : isolation avec laine minérale et laine de verre	14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre	Tuiles plates avec isolation de laine minérale 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre 14 cm laine minérale, 20 cm laine de verre	Plafond en PVC avec couche protectrice et isolation fenêtres en bois fenêtres en bois fenêtres en bois fenêtres en bois	Ventilation avec ventilation avec récupération de chaleur par les parois fenêtres en bois fenêtres en bois fenêtres en bois fenêtres en bois	Chaudière gaz Chaudière gaz Chaudière gaz Chaudière gaz	Isolation sol Isolation sol Isolation sol Isolation sol	1000 1000 1000 1000	Structure en béton Structure en béton Structure en béton Structure en béton	Dépendance au chauffage (C) Chauffage central avec PCH Chauffage central avec PCH Chauffage central avec PCH Chauffage central avec PCH
	MPH	13	Kassel	1999	162	0	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	
	MPH	24	Stuttgart	2011	1071	0	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	
	MPH	16	Hamburg	2011	162	0	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	
	MPH	19	Hamburg	2011	162	0	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	
	MPH	14	Hamburg	2011	162	0	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	1000 1000 1000 1000	

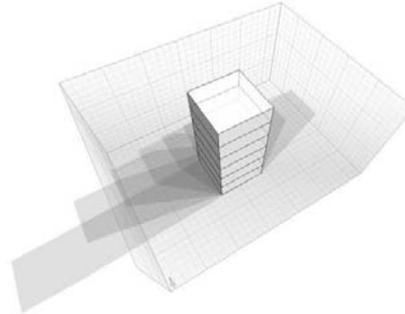
Coûts et performances
Les coûts de construction de ces logements passifs varient de 1350 à 1850 €/m² de surface habitable. Les coûts de structure varient de 1 100 à 1400 €/m² de surface habitable.
Les niveaux d'isolation des murs permettent d'atteindre une performance inférieure à 0,10 W/m²K. Dans l'un des projets, l'isolation est différente en fonction de la façade (Ouest, Nord et Est et Ouest, avec des valeurs de U plus faibles pour les façades Sud et Nord). L'isolation des planchers est également mieux performante, avec des valeurs de U comprises entre 0,11 et 0,20 W/m²K. L'isolation des toitures est importante, souvent de l'ordre de 20 à 30 cm, avec des performances de 0,07 à 0,10 W/m²K.
Les menuiseries sont en PVC, aluminium ou bois, munies de brins vibrants. La fenêtre possède un U compris entre 0,7 et 0,9 W/m²K, et le vitrage entre 0,5 et 0,7 W/m²K.

Tous les bâtiments sont équipés d'une ventilation avec récupération de chaleur. Les systèmes centralisés, semi-centralisés et décentralisés sont présents.
Le chauffage est assuré par des réseaux de chaleur urbains, ainsi que les chaudières bois / condensation au gaz.
L'ECS est souvent fournie par un réseau de chaleur urbain ou une installation solaire thermique. Dans l'un des cas, l'eau chaude solaire est récupérée pour alimenter tout ou partie des logements.

Benchmark - Performance énergétique en Europe

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- MORPHOLOGIE
- MATÉRIALITÉ
- SPECIALITÉ
- SYSTÈMES

I - Approche générale de conception



«Il faut repenser le statut même de la technique au sein des processus de formulation et de résolution d'un problème en architecture»
 Robert PROST
 «Conception architecturale»

I. APPROCHE GENERALE DE CONCEPTION

I.A. Démarche de l'équipe

La démarche générale du travail de recherche de l'équipe est divisée en 3 phases.
 La première phase consiste à analyser le processus de conception afin d'évaluer quels sont les aspects qui impactent le plus fortement le comportement énergétique d'un bâtiment. L'identification des «choix stratégiques» au moment de la prise de décisions dans la conception d'un projet, nous permet d'anticiper les problématiques de conception, et d'optimiser la performance très en amont. Mais la réflexion sur la performance énergétique dans les logements collectifs est fortement liée au contexte climatique, paysager, urbain, architectural et environnemental. Il semblerait difficile de concevoir des bâtiments «prototypes» qui puissent se dupliquer.

La deuxième phase propose donc une méthodologie de conception des bâtiments en fonction de leur environnement. Il s'agit d'une approche passive avec la mise en place d'un outil d'aide à la conception qui est complémentaire aux logiciels de modélisation énergétique. L'objectif est de développer une démarche qui puisse fournir des éléments complémentaires aux différents acteurs dans le processus d'élaboration d'un projet. On propose ainsi une étude comparative de cas constituant ainsi une base pour la définition des projets.
 La troisième phase consiste à développer un projet performant (objet de la commande), à partir de la mise en place de la méthodologie et de l'outil de conception. Il constitue la synthèse de la recherche dans la mesure où la méthode peut être reproduite dans différents contextes.

I.A1. Analyse du processus de conception en architecture

Le point de départ dans la formulation d'une méthodologie de conception, est précisément de réfléchir au processus de conception en tant que tel. La compréhension du processus de conception en architecture nous permet d'anticiper les différentes problématiques liées à la conception d'un projet, mais surtout nous permet d'identifier les phases essentielles dans la mise en œuvre de stratégies qui vont impacter sur la performance énergétique d'un bâtiment.

Dans cette optique, nous avons étudié le processus de conception classique d'un projet, et nous avons identifié 7 phases stratégiques dans la conception : (Analyse du programme, analyse de la réglementation, Implantation, Morphologie, Matérialité, Spatialité et Systèmes)

Ces phases correspondent à l'évolution d'un projet sous la vision des concepteurs (architectes), dès le stade initial d'étude du programme, jusqu'à la définition des systèmes et le dessin des détails constructifs.

Mais l'intérêt de cette étude est de comprendre quelles sont les phases stratégiques dans la formulation d'un projet performant. On a approfondi donc dans chacune de ces 7 phases afin d'identifier l'ensemble des critères qui vont impacter le plus le comportement énergétique du bâtiment. 378 critères de conception ont été identifiés et classés. Un grand nombre a été analysé dans la construction de l'outil méthodologique.

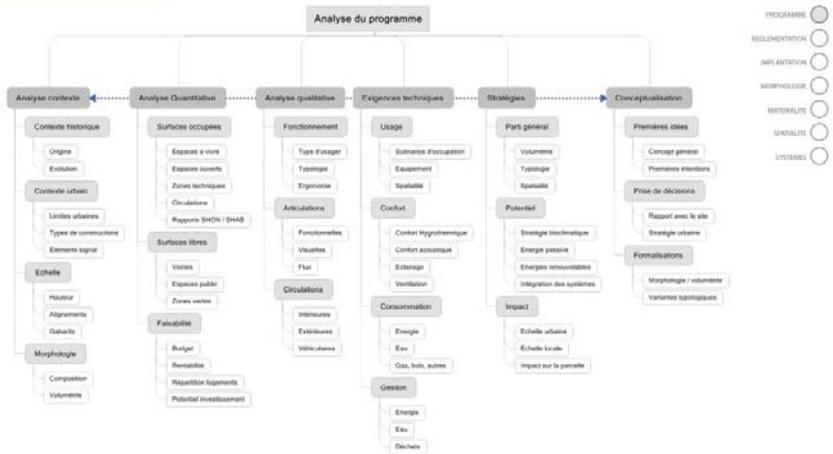
- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- IMPLANTATION
- MORPHOLOGIE
- MATERIALITE
- SPATIALITE
- SYSTEMES



Analyse du Programme

L'analyse du programme correspond à la première phase de conception. Elle se divise principalement en trois parties, la première concerne des considérations générales sur le contexte du projet, la deuxième des exigences en termes quantitatifs et qualitatifs sur des aspects techniques et de confort, et la troisième concerne la conceptualisation des stratégies à adopter pour répondre à la demande du programme. Ces stratégies constituent les premières esquisses théoriques dans la conception du projet.

Les aspects qui impactent le plus la performance énergétique sont ceux liés aux exigences techniques de gestion de l'énergie et du confort. De même, c'est à partir des stratégies initiales qui concernent le parti général d'implantation et les partis volumétriques que se définit la notion de compacité. Cette notion va impacter fondamentalement le comportement énergétique du bâtiment.



- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- MORPHOLOGIE
- MATERIALITE
- SPECIALITE
- SYSTEMES

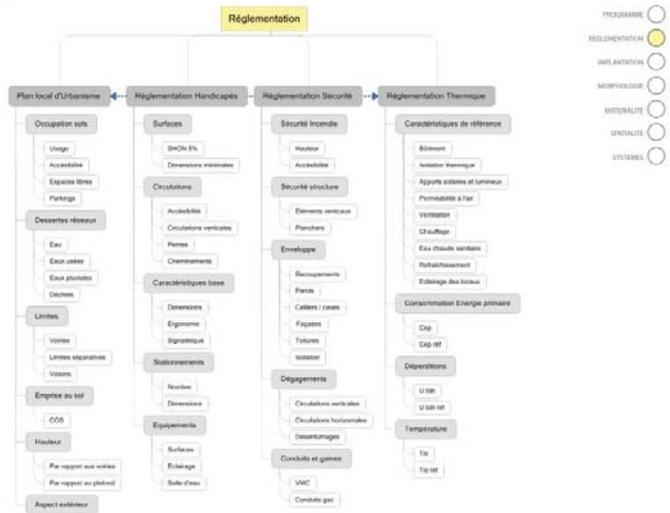
Choix de conception - Phase Analyse du programme



Analyse du processus de conception

Analyse de la réglementation

Les aspects plus importants à prendre en compte dans la conception énergétique du bâtiment dans la phase d'analyse de la réglementation, sont ceux qui concernent l'occupation du sol et les exigences de la réglementation thermique. Bien évidemment, ces thématiques sont au cœur de la réflexion sur l'optimisation de la performance, mais il est intéressant d'évaluer le poids de certaines réglementations en matière d'enjeux environnementaux. Il est à noter l'importance de l'enveloppe en ce qui concerne la réglementation sécurité. Ces considérations vont incidre directement sur les phases ultérieures de conception.



- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- MORPHOLOGIE
- MATERIALITE
- SPECIALITE
- SYSTEMES

Choix de conception - Phase Analyse de la réglementation



Analyse du processus de conception

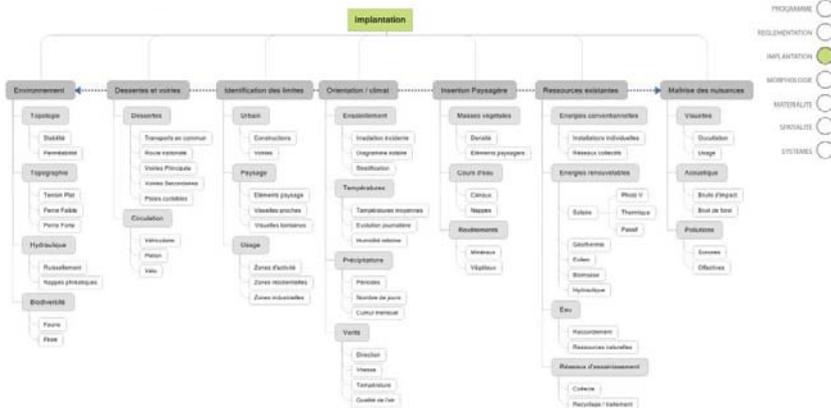
Implantation

L'implantation est probablement la phase la plus importante dans la conception d'un bâtiment performant. La plupart des décisions prises à ce stade, vont impacter directement sur la performance globale et le comportement énergétique du produit final. Les aspects les plus importants concernent l'étude des limites, l'orientation et le climat, aussi que l'utilisation des ressources naturelles existantes.

Il est fondamental de développer la notion d'implantation, pour faire une approche transversale dans la conception de bâtiments à haute performance énergétique.

D'une part, les ressources disponibles vont conditionner l'efficacité énergétique du modèle qui s'insère dans cet environnement. D'autre part, les aspects climatiques vont déterminer le potentiel passif du bâtiment. A partir des conditions d'utilisation de l'énergie solaire et éolienne, les objectifs seront sensiblement différents.

Pour cette raison, la réflexion sur l'implantation constitue un des deux axes principaux développés dans la méthodologie et dans la définition de l'outil de conception.



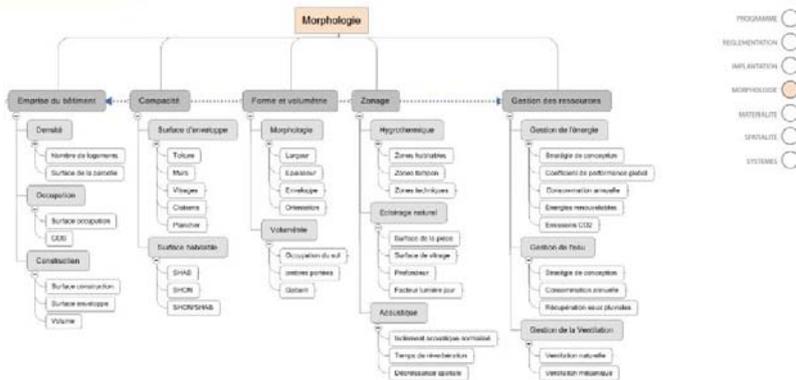
Analyse du processus de conception

Morphologie

La définition de la Morphologie, notion centrale de la problématique d'optimisation de la performance énergétique, constitue le deuxième axe principal de réflexion de notre étude. C'est à travers la forme et la volumétrie, que les bâtiments s'adaptent au contexte local et impactent sur l'environnement. L'élaboration de cette volumétrie joue le rôle d'interface avec l'environnement immédiat, et ceci est valable pour n'importe quel contexte. Ainsi chaque site possède un potentiel ou un volume capable, et un projet est une façon d'interpréter un site.

Cette remarque a suscité la réflexion principale de l'étude, dans le sens où optimiser la morphologie du volume permet d'optimiser la performance énergétique du bâtiment, et ce, dans une approche purement passive.

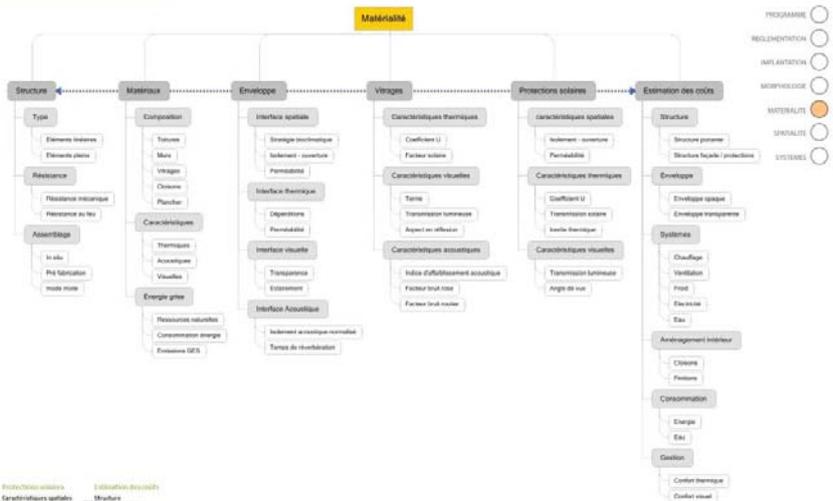
Il est évident que ce positionnement est adopté intuitivement dans la conception d'un projet avec les notions de compacité, orientation des façades, taille des ouvertures, etc., mais la valorisation détaillée du potentiel environnemental des différentes morphologies constitue une piste de recherche fondamentale dans la construction d'un outil de conception.



Analyse du processus de conception

Matérialité

La définition de la matérialité du projet, détermine directement les enjeux d'efficacité énergétique, en ce qui concerne la qualité de l'enveloppe. La matérialité du projet constitue une entrée de base de l'outil méthodologique, car elle permet d'adopter des stratégies sur l'enveloppe ou au contraire, de faire une approche à l'efficacité énergétique par les systèmes. Traditionnellement cette question ambivalente fait sujet de débat dans la conception d'un projet, alors que nous la considérons comme une piste importante dans la résolution de l'équation d'un projet performant à faible coût. Un grand nombre d'aspects sont pris en compte dans la construction de l'outil méthodologique, notamment les matériaux, l'enveloppe opaque, les vitrages et les caractéristiques thermiques.



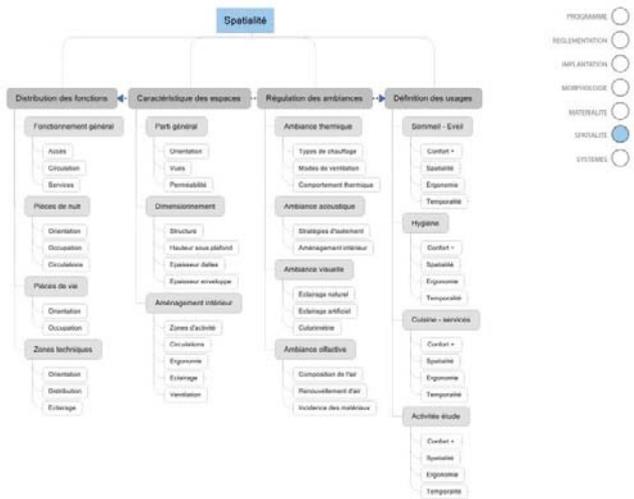
Choix de conception - Phase Matérialité



Analyse du processus de conception

Spatialité

La notion de spatialité prend en compte les caractéristiques du projet liées à la distribution des espaces, à leur dimensionnement, à la régulation des ambiances et aux aspects techniques liés à la définition des usages. L'ensemble des aspects liés au confort sont tenus en compte. Mais la régulation de l'ambiance thermique ou acoustique étant déjà traitée dans la phase Matérialité, c'est la notion d'ambiance Visuelle celle qui va influencer le plus fortement la performance énergétique du bâtiment. Dans l'objectif de réduire au minimum la consommation d'électricité liée à l'éclairage, la notion d'autonomie en éclairage naturel doit être exploitée.



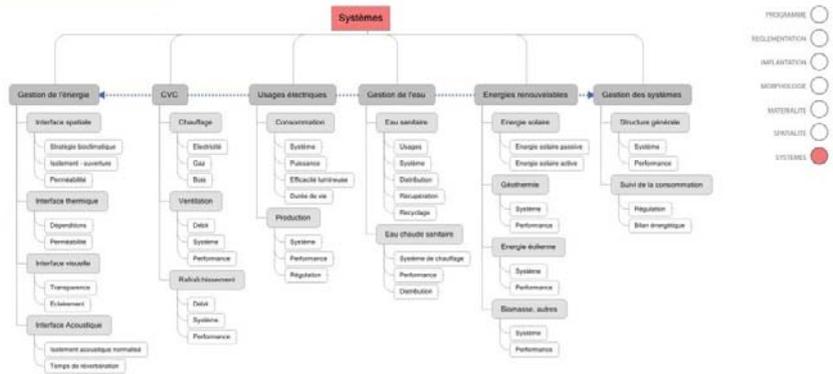
Choix de conception - Phase Spatialité



Analyse du processus de conception

Systèmes

La définition des systèmes est traditionnellement une des dernières phases dans le processus de conception. Mais c'est dans cette phase que sera définie l'installation d'équipements énergivores, qui ont pour objectif d'assurer le fonctionnement et les aspects du confort des bâtiments. Grâce à l'évolution de la technique, la performance des systèmes est optimisée et par conséquent la performance énergétique est améliorée. Mais très souvent la dimensionnement des systèmes est une solution aux défauts préalablement acquis dans la définition de l'implantation et de la morphologie. L'étude des systèmes doit donc être intégrée dans l'ensemble du processus de conception, afin de dimensionner les installations en cohérence avec le parti architectural et la morphologie du bâtiment. Ainsi il est possible d'anticiper les différentes problématiques et de définir la stratégie énergétique la plus adaptée au projet.



Choix de conception - Phase Systèmes



Analyse du processus de conception

Synthèse

L'analyse du processus de conception et l'identification des différents choix dans la réalisation d'un projet d'architecture nous a permis de comprendre quelles sont les phases les plus sensibles du point de vue de la performance énergétique. Certes dans ce processus il y a plusieurs choix de projet stratégiques qui vont déterminer le comportement du bâtiment tout au long de sa durée de vie.

Chacune des décisions prises dans la phase de conception, ont des répercussions plus ou moins importantes dans la définition de la performance énergétique finale. Sans doute les préconisations relatives à l'enveloppe et aux systèmes ont une influence conséquente - étant donné le poids relatif de la performance des systèmes de récupération de chaleur, de transformation en énergie et de qualité des matériaux - mais l'orientation la densité ou la compacité ont également un impact très important.

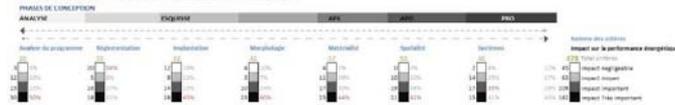
Une des conclusions de l'étude est donc le poids majeur des phases d'implantation et de morphologie du projet, qui vont définir le comportement du bâtiment avant les systèmes, soit le potentiel passif de chaque projet.

Pour l'équipe, il était essentiel d'évaluer ce potentiel passif, afin d'identifier les phases stratégiques de travail dans la définition d'une méthodologie de conception.

L'ensemble des critères a été évalué à partir de l'analyse des projets de l'agence, et d'un sondage auprès des architectes et des bureaux d'études concepteurs de l'équipe. Cette analyse a pris en compte chacun de ces aspects, en faisant une classification par rapport à l'impact sur la performance énergétique globale du bâtiment. A travers les 7 phases du processus, ont été identifiés 376 choix de conception. Dans chacune de ces phases, nous avons évalué le poids des décisions mais aussi l'influence sur la performance, en divisant les critères en 4 groupes: impact négligeable, moyen, important, très important. Ainsi, un total de 162 critères ont été recensés au niveau Impact Très important (43%), 108 au niveau Impact important (22%), 63 au niveau Impact moyen (17%) et 45 au niveau Impact négligeable (12%).

D'autre part, les phases qui ont le plus grand nombre de critères qui vont incidre sur la performance sont: l'Analyse du programme (50%), l'Implantation (45%), et la Morphologie (60%).

Synthèse des choix de projet par phase et impact sur la performance énergétique



Analyse du processus de conception

Conclusions

Cette étude nous donne une radiographie générale de l'ensemble des décisions prises dans un projet, dans un processus itératif de résolution d'un problème. Dans ce sens là, la thèse de Robert PROST évoquée dans sa Conception architecturale, nous permet de mieux comprendre ce concept. Selon PROST*, le processus de conception architecturale repose sur 4 phases non linéaires: la formulation d'un problème, la formulation de la solution, la concrétisation et l'appropriation de cette solution.

Dans le cas de notre étude, c'est à partir de la compréhension de cette dynamique que nous avons identifié la stratégie générale de l'équipe dans la conception d'une méthodologie de projet. Ce principe de base met en relation des choix de conception dans différentes phases du projet. C'est ainsi que le travail sur l'implantation aura un impact tant dans la phase esquisse, que dans la définition des surfaces vitrées et leur composition. De même, la morphologie va changer et s'adapter au fur et à mesure de l'avancement du projet, ce qui influencera la performance finale.

L'équipe s'est concentrée sur deux phases fondamentales dans la définition de la performance énergétique d'un projet: l'implantation et la morphologie.

L'impact sur la performance dans le processus de conception est fortement lié aux choix stratégiques dans ces phases, qui correspondent à la définition des stratégies passives d'un bâtiment: l'orientation, le potentiel d'irradiation solaire, le potentiel d'utilisation des énergies renouvelables, la compacité, la forme, le potentiel en éclairage naturel, etc.

Tous ces aspects définissent, non seulement le rapport du bâtiment avec l'extérieur, mais également la spatialité du projet et les conditions de confort pour l'occupant. Ce sont donc des phases stratégiques du point de vue de la définition du projet architectural et de la performance énergétique.

*PROST Robert, Conception architecturale, Une investigation méthodologique, L'Harmattan, Paris, 1992.

IA2. Démarche de conception générale de l'équipe

Il semble une évidence que la technique dans le bâtiment évolue très rapidement. L'ensemble des matériaux, installations et dispositifs techniques sont optimisés dans une logique de concurrence industrielle vis-à-vis des enjeux environnementaux et des directives européennes.

Définir un modèle qui s'appuierait sur la technique semble donc une contradiction avec ce principe. Il semblerait cohérent de travailler sur des principes de conception qui sont modifiés par l'environnement urbain, comme l'orientation, les effets de masque par les bâtiments voisins, la proportion et la taille des ouvertures, l'atténuation de la lumière en fonction de l'orientation des vues, etc.

L'équipe s'est fixé comme objectif de faire une approche méthodologique à la conception des logements à partir de la compréhension du contexte et de l'environnement de chaque site. Cette approche permet de développer un projet sans imposer aucune architecture, matérialité ou orientation, ce qui semble cohérent avec l'idée de reproduire ces modèles, de les adapter aux régions, et surtout de les construire avec des maîtres d'ouvrage possédant différentes visions et moyens financiers.

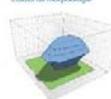
Nous sommes convaincus que les objectifs de performance doivent, non seulement, donner liberté à l'architecture pour se produire et évoluer, et qu'ils ne doivent pas constituer une contrainte supplémentaire dans le processus de

conception. D'après une vision purement technique, un volume dans l'espace a un comportement énergétique défini par un bilan thermique de gains et de déperditions de chaleur. Selon l'approche PASSIVHAUS, la conception d'un bâtiment performant commence d'abord par une approche bioclimatique, dans l'objectif de diminuer les besoins énergétiques et d'équilibrer les gains du bâtiment en fonction de la saison, et ce, sans recourir aux systèmes. Une des premières pistes de conception s'appuie sur les études de la performance de l'enveloppe comme élément d'isolation ou comme élément capteur d'énergie. Ceci constitue une piste de recherche, dans la mesure où l'optimisation de cette enveloppe permet d'améliorer la performance globale du bâtiment. En effet, l'enveloppe constitue l'interface d'équilibre entre les gains et les déperditions de chaleur, mais aussi entre l'environnement intérieur et extérieur, déterminant ainsi l'ensemble des conditions de confort. L'optimisation d'une «enveloppe théorique» permettrait d'équilibrer les besoins énergétiques, d'optimiser les surfaces captatrices d'énergie, et d'améliorer les conditions de confort à l'intérieur du bâtiment.

La démarche générale de l'équipe est donc, axée sur l'évaluation du potentiel passif des bâtiments, afin d'optimiser la performance énergétique à travers une approche morphologique.

Existe-t-il une forme idéale pour un bâtiment performant? Existes-ils des stratégies d'implantation qui puissent pré-conditionner l'efficacité énergétique d'un projet?

En principe, cette «enveloppe optimale» n'est jamais la même. Elle change en fonction de l'environnement et du climat, car les apports solaires passifs varient en fonction du rayonnement incident sur le volume. D'une part, les conditions climatiques vont modifier sensiblement le niveau d'irradiation solaire, et d'autre part, les effets de masque des bâtiments



voisins vont incidre directement sur le potentiel solaire passif de la parcelle. En étudiant en détail le potentiel passif de l'enveloppe, il est possible de définir une morphologie optimale.

Mais la morphologie n'est pas uniquement une donnée fixe. L'objectif est d'affecter ce «gabarit idéal» en modifiant différents paramètres liés à la composition de l'enveloppe, au pourcentage d'ouvertures, aux systèmes, mais surtout aux niveaux d'éclairage naturel. Cette condition va optimiser le comportement énergétique, en améliorant l'autonomie en éclairage naturel et en réduisant ainsi la consommation liée à l'éclairage artificiel.

On a donc développé l'ensemble de la recherche à partir du principe de valorisation du potentiel d'irradiation solaire dans chaque site, afin de faire ressortir «l'enveloppe théorique idéale», qui permet d'optimiser la forme du point de vue de la performance énergétique.

La méthodologie de conception proposée par l'équipe est une approche innovante dans la mesure où le concept est issu de la singularité de chaque site, ce qui permet d'avoir une approche «libre» dans le développement du projet. Il ne s'agit pas

d'imposer une forme ou une combinaison de systèmes, mais de laisser place aux concepteurs pour réaliser des architectures pouvant être très diverses, bien que performantes. Ces architectures seront sans doute éloignées de l'icône classique de l'habitat «passif» qu'on est habitués à regarder.

Cette approche est un champ d'exploration pour la conception «intelligente» des architectures qui utilisera immédiatement des moyens informatiques dans l'avenir. Bien entendu, loin de restreindre la part de l'architecte, elle tend, au contraire, à lui offrir un outil supplémentaire pour concevoir l'architecture.

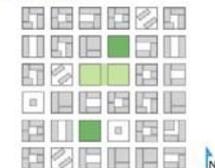
- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- IMPLANTATION
- MORPHOLOGIE
- MATÉRIALITÉ
- SPECIALITÉ
- SYSTÈMES

Étude de morphologie

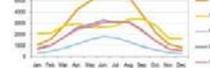
Méthodologie de conception : une approche innovante

La méthodologie de conception proposée par l'équipe est divisée en 7 phases. L'objectif est de superposer cette méthodologie à une démarche de conception classique, en évaluant spécifiquement le potentiel passif de chaque site pour développer le projet.

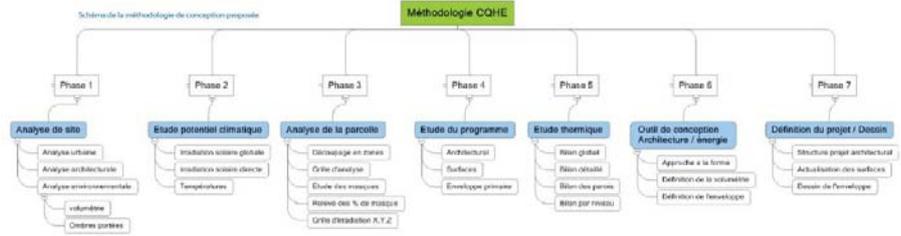
Phase 1 : Analyse de site
Cette phase correspond à l'analyse du contexte - environnement dans une démarche classique. L'équipe tient compte particulièrement des aspects urbains, architecturaux et environnementaux du contexte étudié. Une analyse des volumétries et des ombres portées est réalisée pour évaluer plus précisément l'impact de l'environnement bâti sur la parcelle. Une attention toute particulière est portée à l'organisation des volumes et à l'accessibilité des transports sur le site.



Phase 2 : Étude / potentiel climatique
L'analyse du potentiel climatique prend en compte les bases de données d'irradiation solaire, températures, précipitations et vents dominants. Ces bases de données constituent le cœur de la base de calcul dans la définition des niveaux d'apports solaires passifs dans un bâtiment. Les aspects hydrothermiques sont couplés à la base de données pour les simulations thermiques dynamiques d'évaluation. Les données d'irradiation solaire globale, directe et diffuse sont étudiées et le moteur de calcul est alimenté uniquement par les données d'irradiation globale provenant de SATEL-LIGHT*



*SATEL LIGHT est la plus grande base de données d'Europe en éclairage naturel et irradiation solaire. Le projet SATEL LIGHT a été financé par l'Union Européenne (Direction Générale III) de 1996 à 1998. Les images produites par le satellite Meteosat ont été choisies comme une source d'information. Source : www.satel-light.com



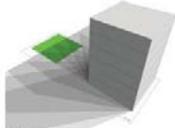
Méthodologie de conception : une approche innovante

Phase 6 : Outil de conception :

Architecture & Énergie

La phase de conception à partir de l'outil développé, se divise en 3 étapes: L'approche à la forme, la définition de la volumétrie, et la définition de l'enveloppe.

L'approche formelle, est faite à partir de l'étude de l'influence de l'environnement urbain sur la parcelle. Ainsi les informations relatives à l'ensoleillement, aux effets de réflexion, ombrage et des masques, sont étudiés à partir de la simulation du logiciel ECOTECH. La base de données fournie sous forme d'empreinte d'irradiations est étudiée en 3D, de façon à visualiser un «gabarit capable» ou une «forme résultante optimale» d'un bâtiment dans la parcelle étudiée.



Étude d'ombrages sur une parcelle

ENVELOPPE THÉORIQUE
Chaque parcelle possède un potentiel d'ensoleillement et de valorisation des énergies renouvelables. Dans ce cas, une image d'un «gabarit idéal», soit la forme optimale d'un bâtiment dans une parcelle, est créée qui serait affectée par un bâtiment réel.



Gabarit potentiel d'un bâtiment sur la parcelle

La définition de la volumétrie est réalisée à partir de la synthèse des études d'irradiation solaire de la parcelle, et de l'étude thermique par niveaux et par orientation (phases 3,4 et 5).

Le relevé des points dans l'espace est réalisé sous forme de couches tous les mètres, pour couvrir la totalité de la hauteur définie préalablement dans l'étude programmatique du projet.

A partir de cette base de données d'irradiation, on définit un «tableau de valeurs» pour tous les points de l'espace en X,Y,Z. Ainsi ces valeurs sont transcrites en pourcentages d'atténuation de l'irradiation, niveau par niveau.

Étant donné le fait que le niveau d'ensoleillement d'un bâtiment en milieu urbain n'est jamais le même de haut en bas, le dimensionnement des baies vitrées doit être différent pour chaque façade et pour chaque niveau.

L'outil informatique développé par l'équipe compare donc l'information relative à l'irradiation de tous les points de la parcelle, avec le bilan énergétique du bâtiment détaillé par niveau.

De cette façon le bilan peut être positif ou négatif en fonction du niveau d'irradiation, de la hauteur, des masques, et du pourcentage de vitrage défini pour chaque niveau.

L'outil affiche en vert les points de l'espace avec un bilan POSITIF, et en blanc les points à bilan NEGATIF.

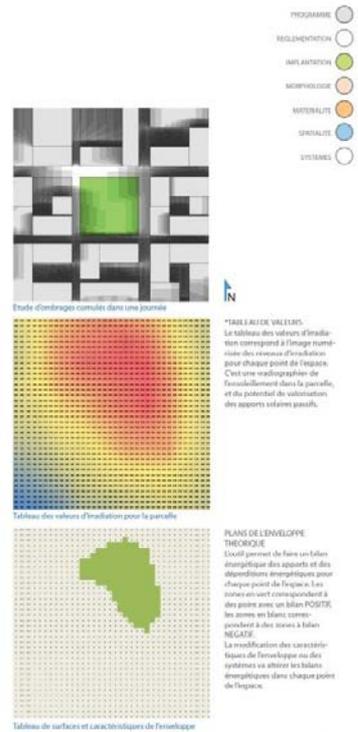
L'outil développé par l'équipe est dynamique et permet de «modifier les caractéristiques de matériaux, enveloppe et systèmes, pour modifier la morphologie et optimiser la performance.

Chaque modification de l'implantation, de la matérialité, de la spatialité ou des systèmes du projet, entraînera une modification du bilan thermique «local» dans chaque point de l'espace, et altèrera par la suite la forme du bâtiment.

Cette hypothèse constitue la base de la méthodologie de conception développée par l'équipe.

La recherche de l'équilibre énergétique permet d'obtenir des «formes idéales» de bâtiment, mais celles-ci doivent être adaptées à la logique constructive et aux exigences de chaque projet.

Les plans fournis par l'outil constituent une «enveloppe théorique» à partir de laquelle chaque concepteur peut faire des modifications, et améliorer ou diminuer la performance en fonction d'un parti architectural.



Méthodologie de conception : une approche innovante

L'étape de définition de l'enveloppe

prend en compte l'ensemble des informations fournies par l'outil de conception pour chaque niveau du bâtiment. Ainsi la volumétrie part d'une superposition de couches, qui vont constituer l'ensemble de l'enveloppe. Mais il s'agit d'une enveloppe «théorique» qui joue le rôle de guide pour le concepteur. Ainsi les architectes et les ingénieurs possèdent un outil leur permettant de décider quel est le niveau de performance à atteindre, et définissant les dispositions à prendre afin d'atteindre cet objectif.

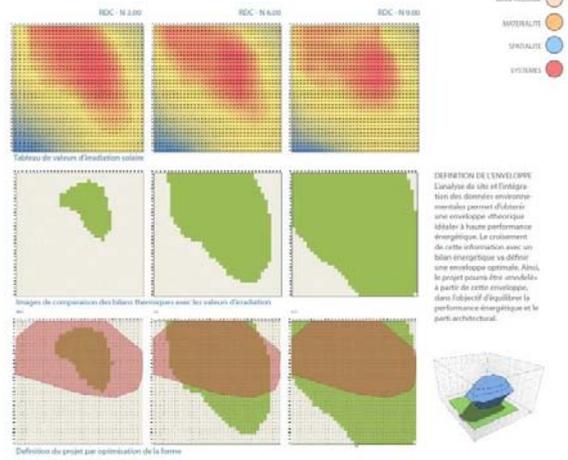
Le non respect de cette enveloppe est aussi un choix de projet, qui va être déterminé par des intentions urbaines ou des aspects réglementaires. Ces décisions vont entraîner des changements dans la phase de définition du projet.

Phase 7 : Définition du projet

La dernière phase de la méthodologie correspond à la Définition du projet.

A partir de ce point, la définition du projet final est abordée dans un processus itératif de conception. La modification de la morphologie déterminée par l'enveloppe entraîne à la fois une réévaluation des aspects techniques liés à la matérialité et aux systèmes. C'est un processus qui pourrait être infini - comme n'importe quel projet en architecture - dans la mesure où il résisterait pas des paramètres fixés préalablement.

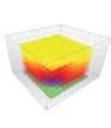
L'outil développé constitue ainsi la synthèse de la méthodologie. La démarche de conception est évaluée pour approfondir dans les aspects relatifs à l'implantation et la morphologie, et pour anticiper ainsi les questions relatives à la matérialité, la spatialité, et les systèmes. L'ensemble de ces aspects va déterminer la performance énergétique du bâtiment et les caractéristiques de confort pour les occupants.



DEFINITION DU PROJET
La méthodologie de conception permet de concevoir un bâtiment en optimisant la forme et la performance énergétique. Chaque projet est unique, et exige une analyse de l'environnement et de son potentiel.



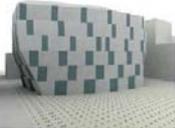
Gabarit potentiel d'un bâtiment sur la parcelle



Définition de l'enveloppe au potentiel maximum

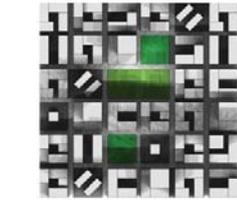
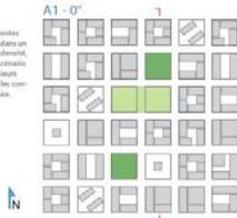


Définition du projet par optimisation de la forme

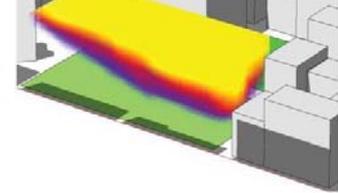
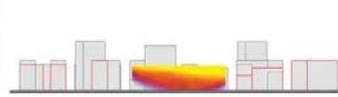
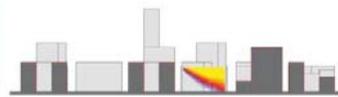
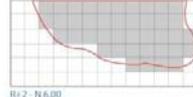
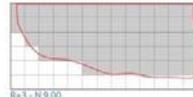
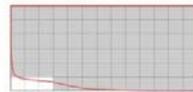
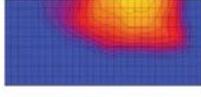
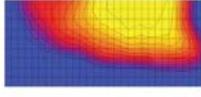
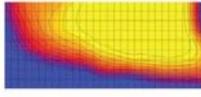
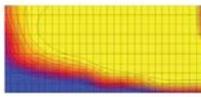
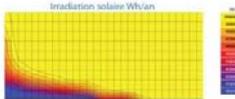


Stratégies d'enveloppe
Irradiation cumulée annuelle
CAS - A1

SCENARIO LIBAN
Afin de simuler les différentes configurations urbaines dans un environnement à forte densité, l'équipe a construit un scénario urbain composé de plusieurs typologies pour étudier les conditions d'irradiation solaire.



ENVELOPPE THEORIQUE
Chaque parcelle possède un potentiel d'ensoleillement et de valorisation des énergies renouvelables. Dans ce cas, une image d'un quartier idéal, voit la forme optimale d'un bâtiment dans une parcelle (en vert) qui n'est affectée par un bâtiment voisin.

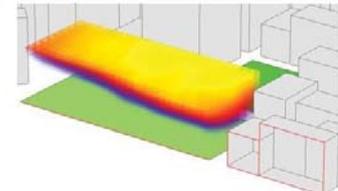
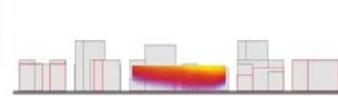
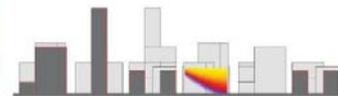
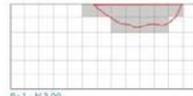
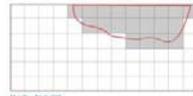
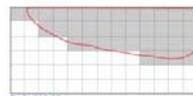
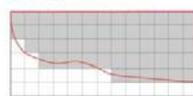
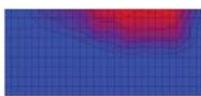
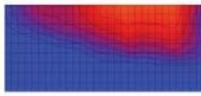
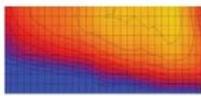
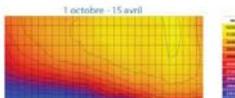
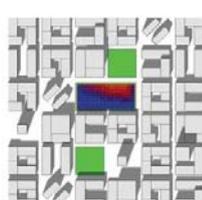
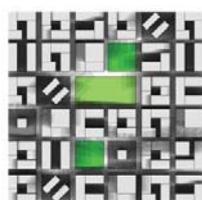
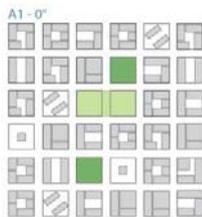


Démarche de conception générale

- PROGRAMME ○
- REGLEMENTATION ○
- IMPLEMENTATION ○
- ANALYSE ○
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIALITE ○
- SPATIALITE ○
- SYSTEMES ○

24

Analyse d'irradiation solaire cumulée - 1er Oct / 15 avril
Irradiation cumulée annuelle
CAS - A1

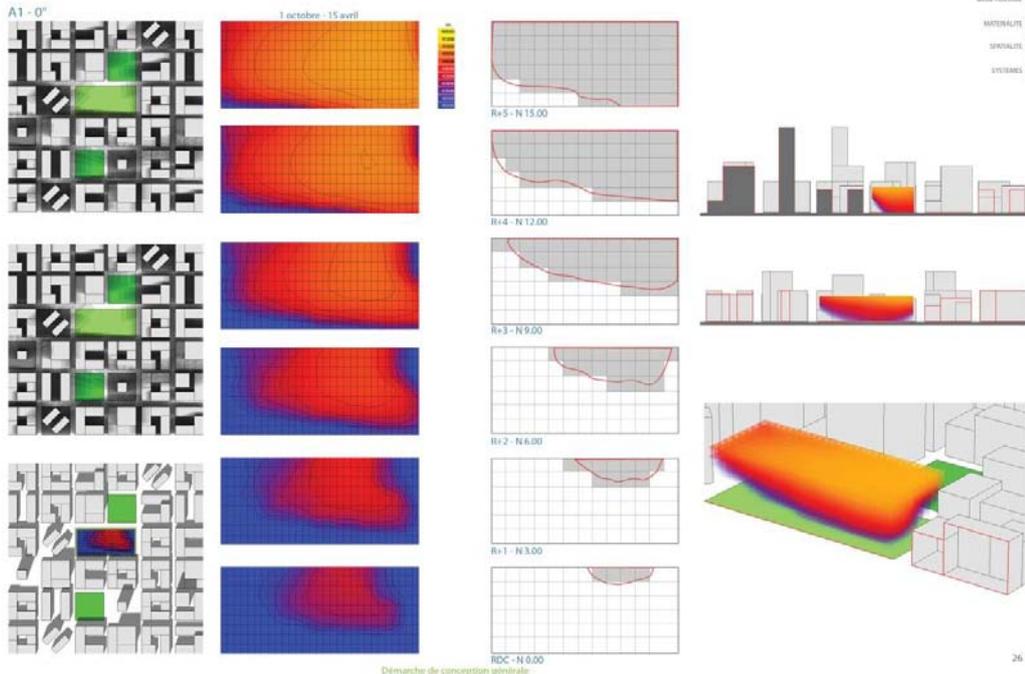


Démarche de conception générale

- PROGRAMME ○
- REGLEMENTATION ○
- IMPLEMENTATION ○
- ANALYSE ○
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIALITE ○
- SPATIALITE ○
- SYSTEMES ○

25

Analyse d'irradiation solaire cumulée en été
Irradiation cumulée annuelle
CAS - A1



Démarche de conception générale

I.B. Moyens mis en oeuvre

L'équipe a mis en oeuvre plusieurs moyens humains et informatiques pour concevoir la démarche méthodologique. Ils se divisent en 3 fronts, correspondant aux équipes de concepteurs.



Nicolas Favet Architectes dirige l'ensemble de la recherche, et travaille dans les aspects méthodologiques, architecturaux et dans la coordination de l'outil de conception.



ECOFYS travaille sur les stratégies énergétiques, la recherche des innovations, et la simulation thermique dynamique pour évaluer la performance des bâtiments.



CORETUDE est chargé de travailler sur les aspects thermiques réglementaires, de fournir les bases de calcul, et de préconiser les systèmes les mieux adaptés aux différents projets.

L'ensemble des enjeux environnementaux dans la construction ont entraîné des changements dans les modes de conception des bâtiments performants. L'équipe a utilisé plusieurs moyens informatiques dans l'objectif d'intégrer les différents aspects climatiques, architecturaux et environnementaux à la conception du projet.

Un des principaux aspects de la méthodologie est lié à l'optimisation du processus de conception afin d'anticiper les différentes problématiques qui vont ensuite définir la performance énergétique finale. Dans cet ordre d'idées, l'intégration de l'ingénierie environnementale est une priorité essentielle dans la définition d'un projet. L'équipe a formulé une méthodologie à partir de la compréhension du processus de conception comme la synthèse d'une démarche architecturale couplée à des considérations techniques. Ce processus, traditionnellement empirique, est rationalisé dans une démarche pratique mettant en relation différents outils informatiques. Cette méthodologie est fondée sur une base de calcul qui valorise les apports solaires et les intègre à la morphologie du bâtiment.

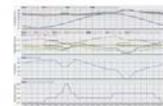
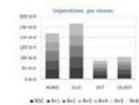
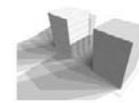
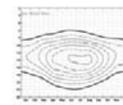
I.B1. Logiciels d'analyse et simulation

La phase de calcul est divisée en 4 étapes. La première utilise les données climatiques fournies par METEO FRANCE, SATEL-LIGHT et DESIGN BUILDER pour la ville de PARIS, et constitue ainsi la base de calcul pour les études postérieures.

Dans la deuxième étape, l'équipe utilise le logiciel ECOTECT pour analyser l'ensoleillement et évaluer les effets d'irradiation sur l'environnement extérieur et sur la parcelle.

La troisième étape met en place un outil développé par l'équipe sous forme de feuille de calcul. Il constitue le coeur de la méthodologie, car il permet de faire une approche à la morphologie du bâtiment dans une logique d'optimisation de la performance.

Enfin, la dernière étape correspond au calcul détaillé de la performance avec le logiciel de simulation thermique dynamique DESIGN BUILDER*



*SATEL-LIGHT est le plus grande base de données d'Europe en matière de données de rayonnement solaire.
Siteur: www.satel-light.com

ECOTECT et AUTODESK est un outil d'analyse et de conception environnementale des bâtiments, intégrant des méthodologies de performance énergétique.
Siteur: www.ecotect.com

DESIGN BUILDER
DesignBuilder est un logiciel de simulation thermique dynamique pour le contrôle de l'énergie dans la conception, au CEE, de l'éclairage et du confort. Conçu pour simplifier le processus de conception de la simulation, DesignBuilder permet de concevoir rapidement les fonctions et les performances de la conception des bâtiments et de produire des résultats sur les détails et le budget.

Logiciels d'analyse et simulation

Bases de données climatiques

Localisation
 Latitude 48° 51' 24" Nord
 Longitude 2° 21' 07" Est
 Altitude moyenne 33 m.s.n.m

Ensoleillement
 Durée d'insolation: 1630 h
 N jours faible ensoleillement: 156
 N jours fort ensoleillement: 47

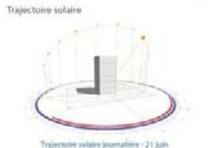
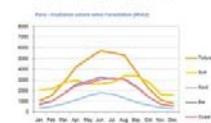
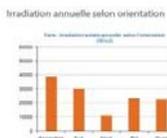
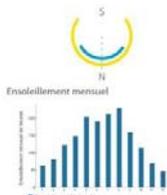
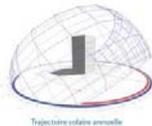
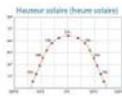
ETE (21 juin)
 Heure de lever: 04:03
 Heure de coucher: 19:57
 Hauteur max (mid): 65° 3'
 Durée du jour: 15h 54 min

HIVER (21 décembre)
 Heure de lever: 07:56
 Heure de coucher: 16:04
 Hauteur max (mid): 64° 4'
 Durée du jour: 08h 08 min

Hauteur solaire (Heure locale)

ETE (21 juin)
 08h: 18° 7'
 10h: 38° 3'
 12h: 56° 5'
 14h: 64° 7'
 16h: 54° 3'

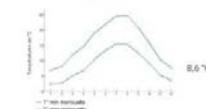
HIVER (21 décembre)
 10h: 1° 7'
 12h: 13° 9'
 14h: 17° 8'
 16h: 12° 1'



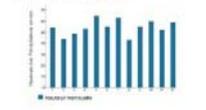
Températures
 Température moyenne (1971-2000): 8,6°C
 Température Record Maximale: 40,4°C
 Température Record Minimale: -23,9°C

Précipitations
 Quantité de pluie: 650 mm / an
 Nombre de jours de pluie: 111 jours / an
 > 1 Um³

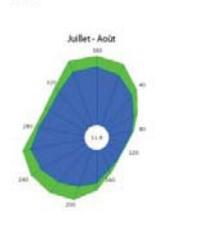
Normales des Températures



Normales des précipitations



Vents



Base de données
 METEO FRANCE*
 1971-2000

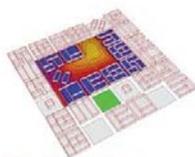
- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- SCENARIOS
- MATERIAUX
- SPECIALITE
- SYSTEMES

Outils d'analyse d'ensoleillement

L'ensemble de l'étude repose sur l'hypothèse de la valorisation des apports solaires passifs. Les outils d'analyse d'ensoleillement sont alors essentiels pour la bonne définition des objectifs de performance énergétique.

Trois sources ont été principalement consultées afin de vérifier l'authenticité des données climatiques: Météo France, SATEL-LIGHT, ECOTECT et DESIGN BUILDER. Les données climatiques ont été comparées, et la base de référence retenue pour les calculs est SATEL-LIGHT.

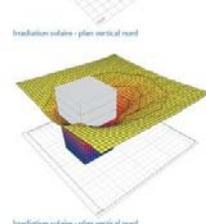
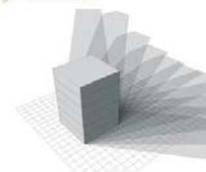
Le logiciel ECOTECT a été utilisé pour simuler les conditions d'ensoleillement, rayonnement, réflexion et ombrage dans un environnement urbain. Les données sont réinterprétées en pourcentage d'atténuation, de façon à coupler les résultats avec n'importe quelle base de données.



Outils de conception et simulation énergie - architecture

La simulation dynamique est essentielle pour évaluer la performance des modèles proposés par l'outil méthodologique et développés par le concepteur.

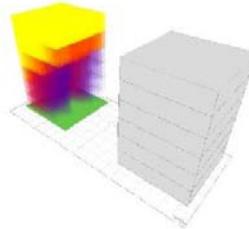
Le logiciel de simulation thermique dynamique DESIGN BUILDER permet d'analyser un bâtiment en mode conception, et d'évaluer la consommation énergétique à partir des informations sur la matérialité et les systèmes définis préalablement. Sa base de données a été comparée avec les données de référence afin de vérifier les résultats des calculs thermiques préliminaires.



DESIGN BUILDER
 DesignBuilder est un logiciel de simulation thermique dynamique pour le contrôle de l'énergie dans la construction, du CSD, de l'éclairage et du confort. Conçu pour simplifier le processus de construction de la simulation, DesignBuilder permet de comparer rapidement les fonctions et les performances de la conception des bâtiments et de produire des résultats sur les détails et le budget.

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYSE
- SCENARIOS
- MATERIAUX
- SPECIALITE
- SYSTEMES

II - Approche architecturale et énergétique



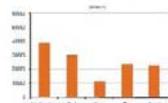
«Les bâtiments durables dans l'ère de l'information, seront situés dans des milieux urbains denses, où la vie et le travail seront de nouveau l'un à côté de l'autre, améliorant ainsi la qualité de vie et la prévention de l'étalement urbain»
Klaus DANIELS
«LowTech, light Tech, high Tech»

II. APPROCHE ARCHITECTURALE ET ENERGETIQUE

II.A. Implantation

L'ensemble de la démarche construite autour de l'outil méthodologique repose sur la phase d'implantation. Le postulat de l'équipe considère fondamentalement l'exploitation du potentiel énergétique par l'implantation, dans la conception d'un bâtiment à haute performance. Mais il y a eu sans doute une «stigmatisation» des projets écologiques dans les années précédentes au point de provoquer une transformation dans la façon de concevoir un projet. L'orientation SUD étant souvent préconisée, elle est ainsi devenue quasiment une norme. La conséquence a été la multiplication de projets mono-orientés, vitrés plein sud, avec des caractéristiques morpho-typologiques souvent iconiques.

Il est une évidence que, pour le cas d'une ville comme Paris située à une latitude de plus de 45° Nord, les apports solaires en façade sud sont plus élevés et plus facilement contrôlables d'un point de vue du confort d'été. Cependant il n'existe pas une règle générale ni d'orientation favorable unique pour l'implantation d'un bâtiment.



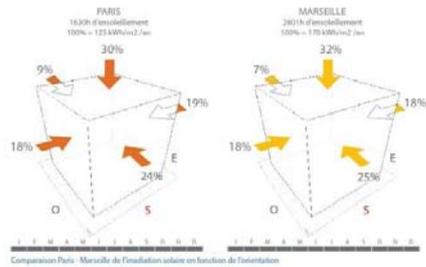
Irradiation solaire annuelle à Paris en fonction de l'orientation

Ce sont les conditions de l'environnement urbain qui vont déterminer le potentiel passif d'un bâtiment.

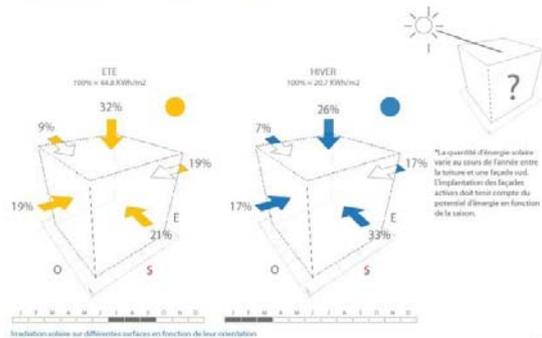
Dans un premier temps, l'étude analyse les conditions d'ensoleillement relatives à l'orientation. Dans un deuxième temps il évalue l'impact des effets d'ombrage sur une parcelle, et finalement il compare plusieurs contextes urbains afin de mesurer l'atténuation de l'irradiation solaire.

L'objectif est de comprendre l'influence des bâtiments sur le rayonnement solaire, et de mesurer les niveaux d'énergie pour chaque cas en particulier. En effet, l'étude du potentiel solaire passif nous permet de valoriser au mieux les aspects liés à l'implantation et la morphologie dans la conception d'un projet à haute performance énergétique.

II.A1. Stratégies climatiques



Comparaison Paris - Marseille de l'irradiation solaire en fonction de l'orientation



«La quantité d'énergie solaire varie au cours de l'année entre la toiture et une façade sud. L'implantation des façades actives doit tenir compte du potentiel d'énergie en fonction de la saison.»

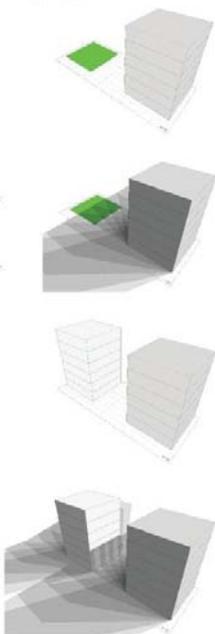
Irradiation solaire sur différentes surfaces en fonction de leur orientation

- PROGRAMME ○
- REGLEMENTATION ○
- ANALYSE DE LA SITUATION ●
- MORPHOLOGIE ○
- MATÉRIALITÉ ○
- SPATIALITÉ ○
- SYSTÈMES ○

II.A2. Stratégies architecturales et environnementales

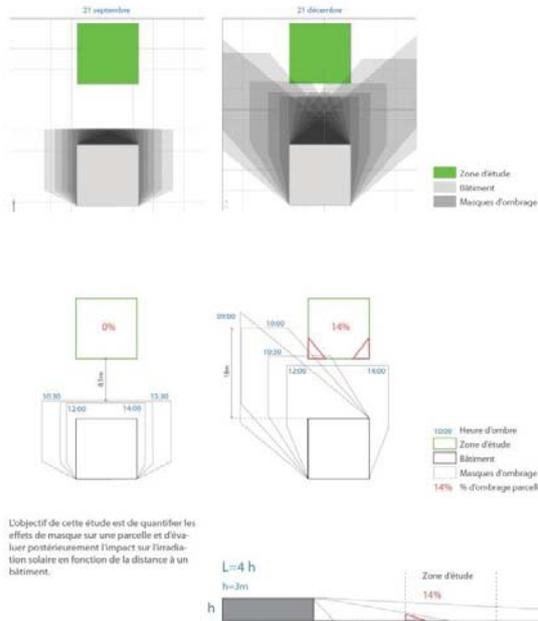
L'analyse des stratégies architecturales et environnementales est divisée en deux phases. La première, concerne l'étude des masques en fonction de la distance à un bâtiment, tandis que la deuxième, évalue l'affaiblissement des niveaux d'irradiation par rapport à cette distance et à la hauteur du masque.

L'équipe a analysé le pourcentage d'ombrage dans chaque parcelle en fonction des heures pour une journée du 21 mars, 21 juin, 21 septembre et 21 décembre, de façon à simuler l'occupation de la parcelle avec un bâtiment et analyser ainsi son comportement thermique postérieurement.



Stratégies architecturales et environnementales

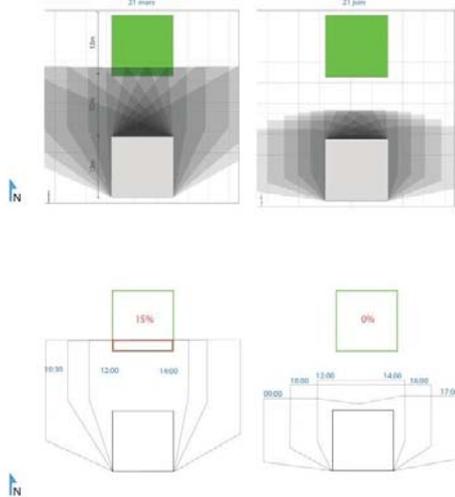
Etude de cas : Hauteur 3 m



L'objectif de cette étude est de quantifier les effets de masque sur une parcelle et d'évaluer postérieurement l'impact sur l'irradiation solaire en fonction de la distance à un bâtiment.

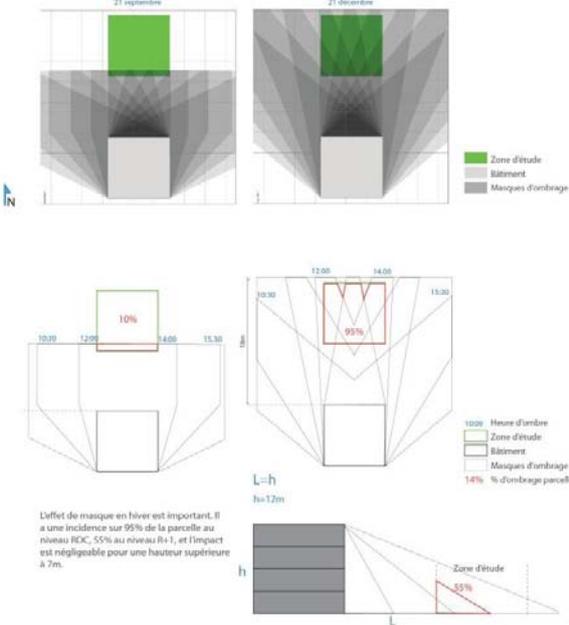
36

H=12m



Dans le cas d'une distance au bâtiment équivalente à la hauteur du même, le pourcentage de masque en été et en mi saison est négligeable. Uniquement la partie sud en alignement avec la rue est ombragée au niveau du RDC.

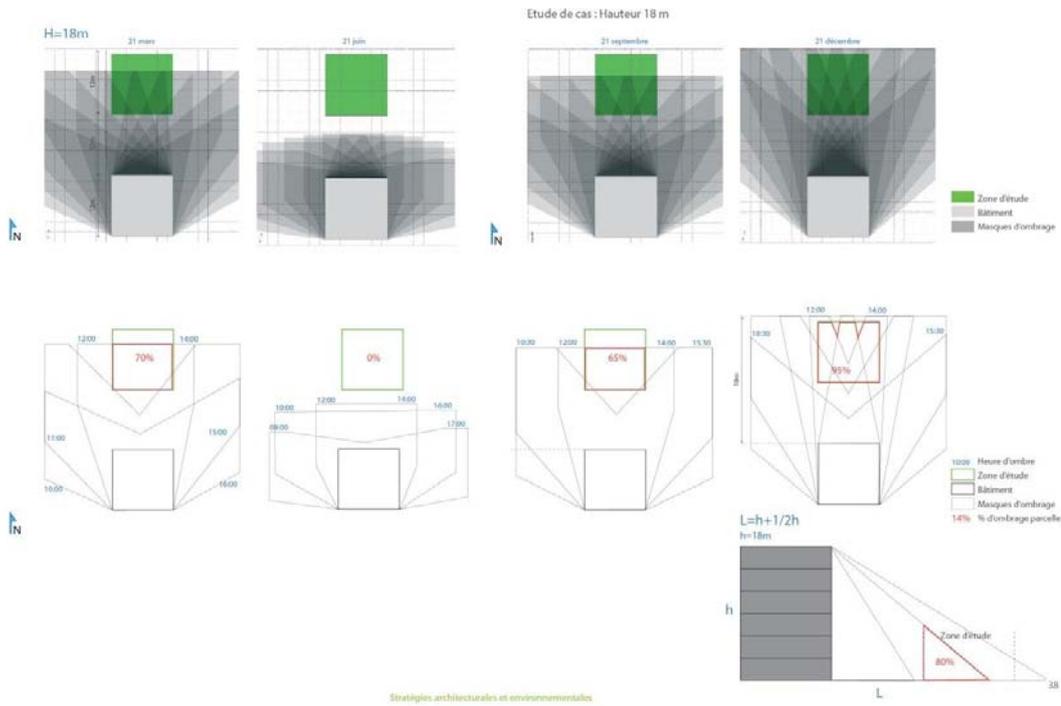
Etude de cas : Hauteur 12 m



L'effet de masque en hiver est important. Il a une incidence sur 95% de la parcelle au niveau RDC, 55% au niveau R+1, et l'impact est négligeable pour une hauteur supérieure à 7m.

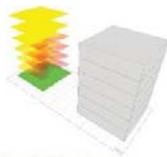
Stratégies architecturales et environnementales

37



Niveaux d'irradiation solaire

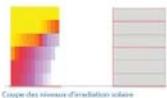
Postérieurement à l'analyse des ombres, l'étude porte sur les niveaux d'irradiation solaire correspondant aux effets d'ombrage. L'objectif est de quantifier les pourcentages d'atténuation en fonction de la hauteur et de la distance par rapport au bâtiment. Des sections en plan et coupe permettent d'évaluer le potentiel passif niveau par niveau.



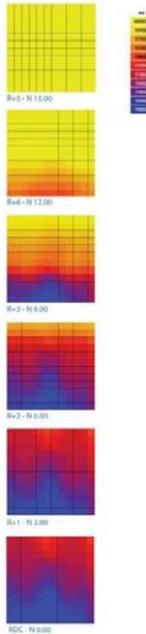
Niveau d'irradiation par étage



Gabarit potentiel des niveaux d'irradiation solaire



Echelle:
Max 1 000 000 Wh
Min 0
Courants 100 000
Géométrie: X=21, Y=11, Z=7



IIA3. Intégration au contexte urbain

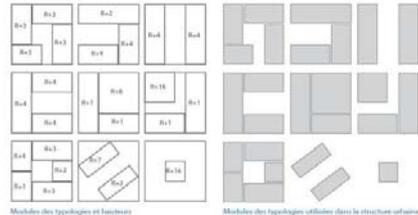
Chaque environnement urbain détermine l'ensoleillement et les effets de masque sur les façades, et la particularité de ces conditions va déterminer les besoins de chauffage et la performance énergétique globale du bâtiment. Il est donc nécessaire de composer avec un environnement urbain constituant à lui seul un facteur environnementale essentiel dans la conception.

L'étude porte sur un environnement urbain modulaire composé de 36 parcelles numérotées. Chacune de ces parcelles à une dimension de 36 X 36 m, et contient différentes typologies de bâtiments. L'équipe a proposé 9 typologies avec des hauteurs différentes, pour simuler des conditions de densité variant entre 15000 et 30000 habitants par kilomètre carré.



Grille de simulation du contexte urbain

Grille des modules d'espaces verts



Modules des typologies et hauteurs

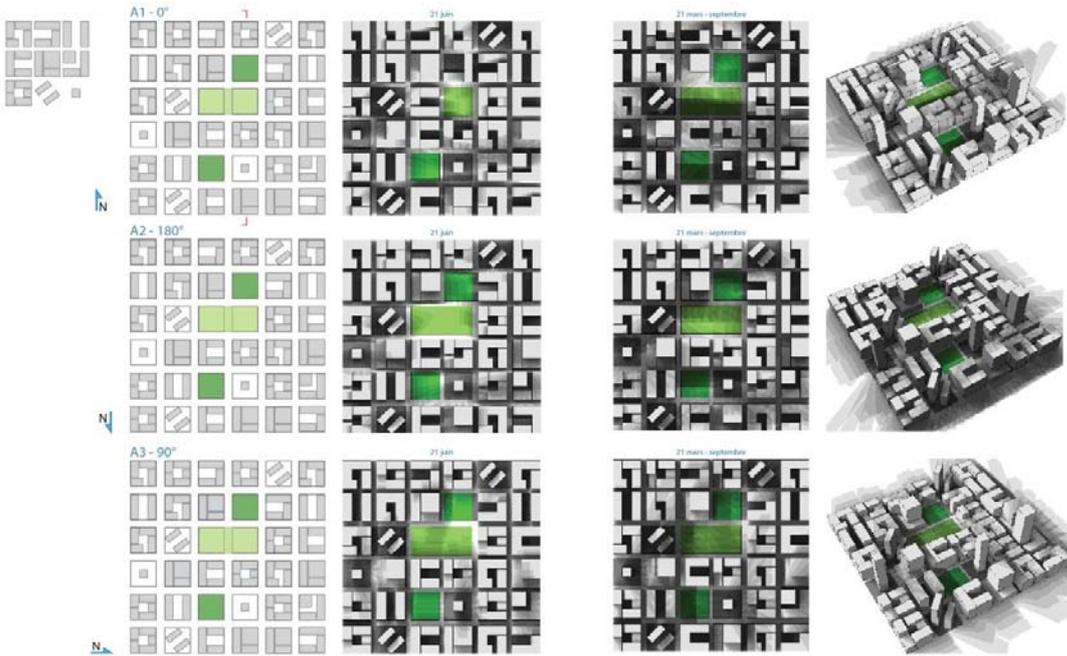
Modules des typologies utilisés dans la structure urbaine

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- ANALYTIQUE
- MORPHOLOGIE
- MATERIALITE
- SPECIALITE
- SYNTHESE

*L'équipe a simulé une trame urbaine de 36 plots, chacun contenant différentes typologies. Une trame d'espaces publics permet de changer la configuration urbaine dans chaque phase.

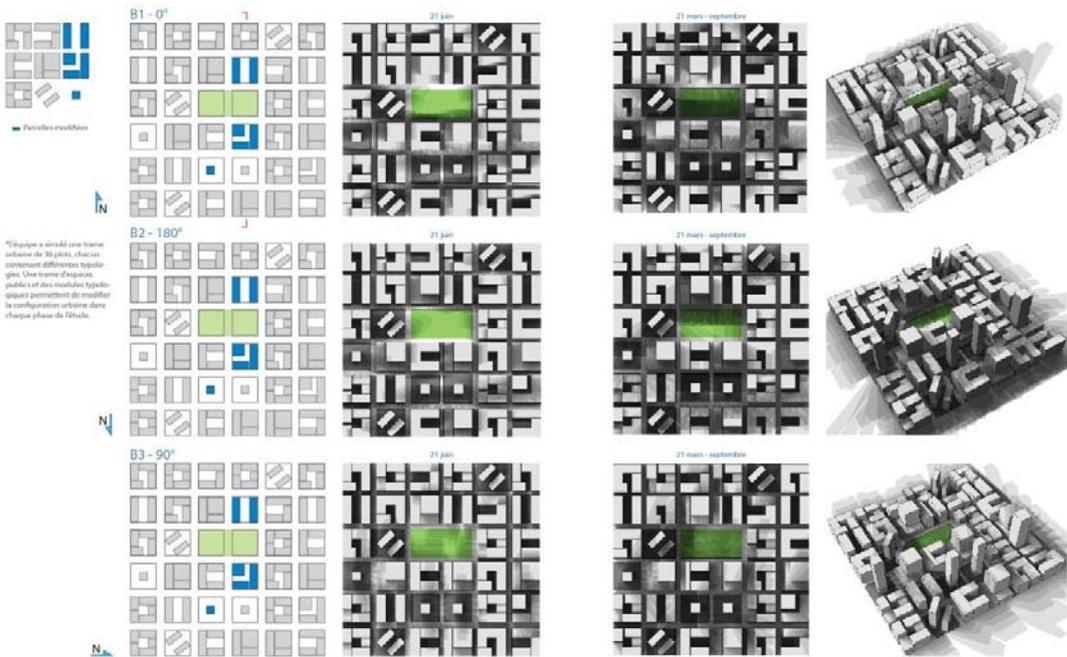
*Plusieurs typologies ont été étudiées pour simuler les conditions d'environnements de haute densité.

Contexte urbain - Analyse d'ensoleillement
Environnement urbain
CAS - A



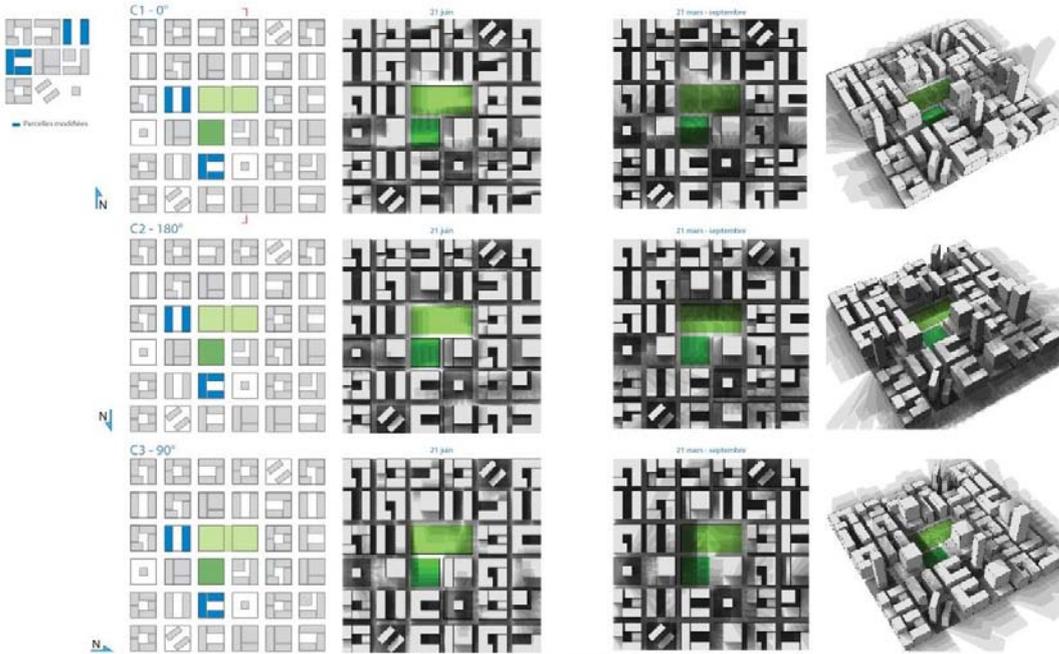
Intégration au contexte urbain

Contexte urbain - Analyse d'ensoleillement
Environnement urbain
CAS - B



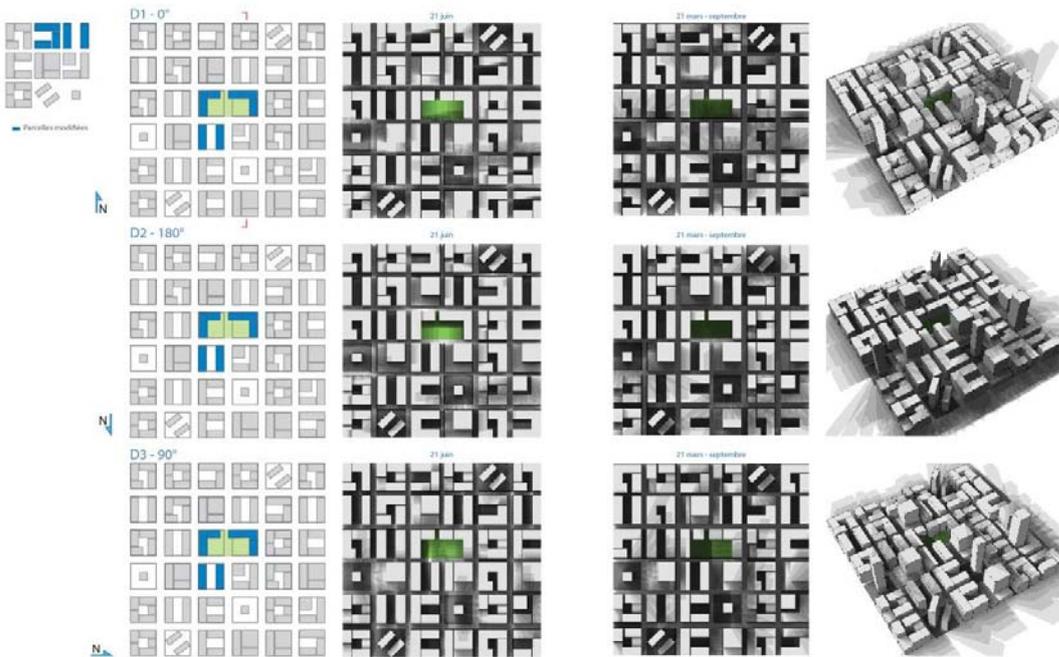
Intégration au contexte urbain

Contexte urbain - Analyse d'ensoleillement
 Environnement urbain
 CAS - C



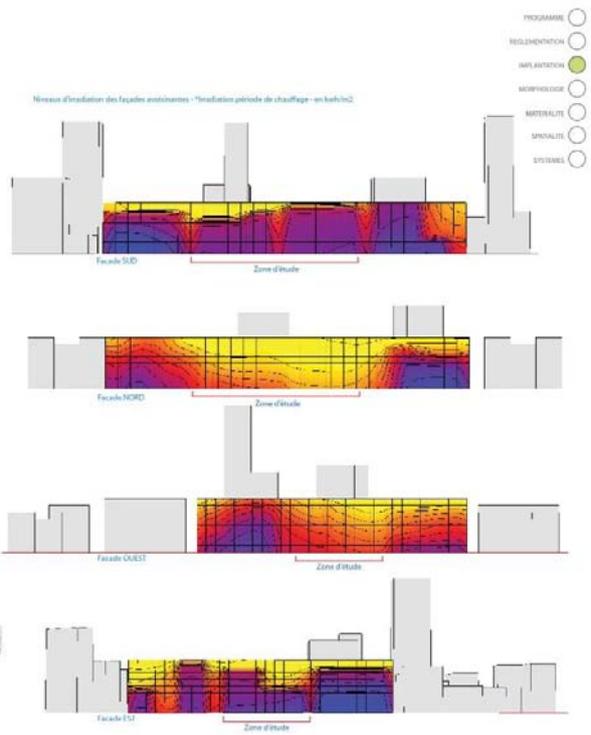
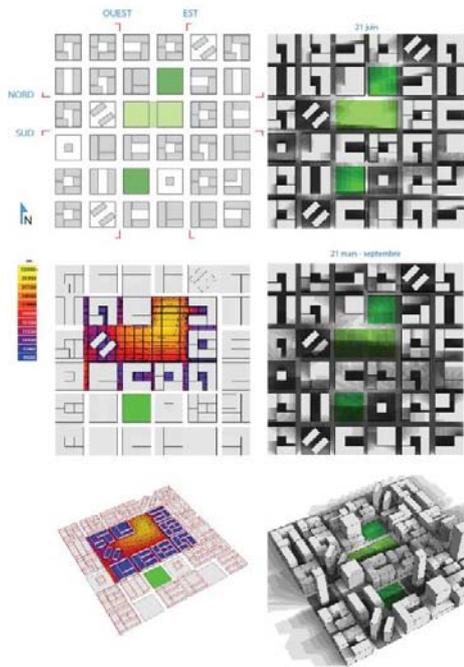
Intégration au contexte urbain

Contexte urbain - Analyse d'ensoleillement
 Environnement urbain
 CAS - D



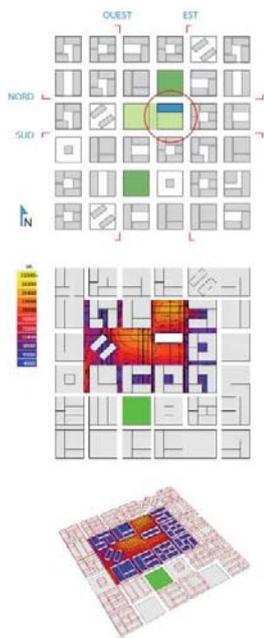
Intégration au contexte urbain

Etude des niveaux d'irradiation solaire sur les façades avoisinantes
Période de chauffage - parcelle vide

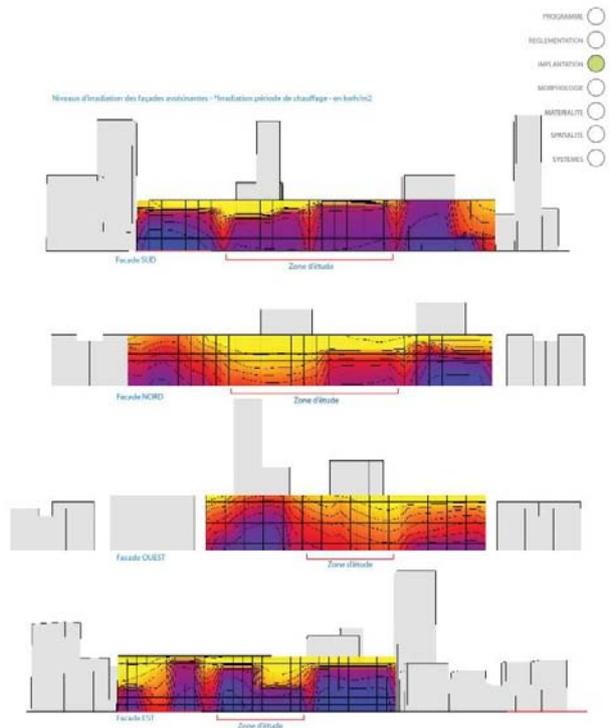


Intégration au contexte urbain

Etude des niveaux d'irradiation solaire sur les façades avoisinantes
Période de chauffage - parcelle occupée



Étude d'irradiation solaire dans le site, en analyse des niveaux d'irradiation en façade. Les composantes d'irradiation seront à déterminer la quantité de vitrage à prévoir en fonction de la hauteur des niveaux.



Intégration au contexte urbain

II.B. Densité, morphologie et compacité

«Buildings deemed to be sustainable in the information age will be located in dense, planted urban environments, where living and working are once again side by side, increasing the quality of life and preventing urban sprawl»

Klaus DANIELS
«Low Tech, light Tech, high Tech»

Les questions de la densité et de la morphologie sont strictement associées quand on parle de bâtiments de logements performants d'un point de vue environnemental. Car la conception des logements semble cohérente dans une logique de densification des villes et d'optimisation des moyens de déplacement.

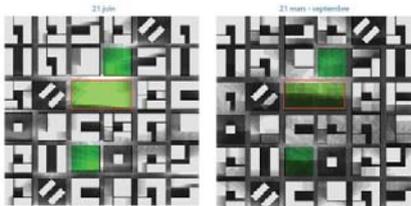
La densité entraîne également la multiplication des formes et des typologies dans la ville, afin de donner une cohérence à la croissance et au développement urbain. Mais souvent, les réglementations constituent un contre-sens par rapport aux objectifs de performance énergétique.

que fixés par les chartes de développement durable. Un bâtiment devant être ouvert au nord -compte tenu des espaces publics- et fermé côté sud par des contraintes d'isolation acoustique, est difficilement réalisable dans les performances de l'habitat passif.

Dans ce sens, le potentiel énergétique des bâtiments doit être étudié au cas par cas, en fonction de l'environnement extérieur et des contraintes réglementaires.

La méthodologie de conception proposée prend en compte ces aspects et fait une réflexion sur la morphologie.

«La quantité d'énergie solaire venue au travers du lamie entre la toiture et une façade sud. L'orientation des façades actives doit tenir compte du potentiel d'énergie en fonction de la saison»



Réflexion sur la densité

II.B1. Réflexion sur la densité

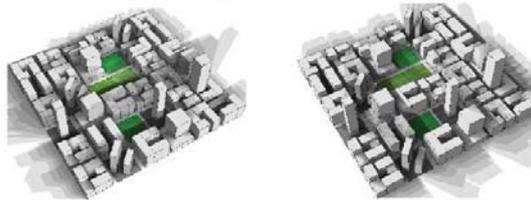
La densité des villes est, d'un point de vue énergétique, une double interrogation.

D'une part, la densification est cohérente d'un point de vue de la diminution des distances de transport; elle permet ainsi la mixité des usages. En effet, dans une agglomération dense, les différents usages trouvent place dans un même environnement, voire un même bâtiment. D'un point de vue énergétique, le partage des usages et des échanges thermiques dans un bâtiment peut être un avantage dans une conception intelligente des systèmes.

D'autre part, la densification génère une diversité de contextes, d'usages et de hauteurs. D'un point de vue énergétique ça entraîne une diversité de masques solaires, de niveaux d'irradiation et par conséquent des différences du point de vue du confort thermique.

Cette particularité constitue une contrainte dans le dimensionnement de bâtiments performants dans une logique industrielle, mais une potentialité dans une logique architecturale. La diversité du paysage urbain donnerait lieu à différentes architectures, à des formes nouvelles qui iraient chercher la lumière et l'énergie solaire comme les organismes vivants le font dans des conditions peu favorables.

L'enjeu est alors d'optimiser la performance énergétique des bâtiments dans des environnements denses, mais aussi d'adapter les objectifs de performance et les réglementations aux nouvelles logiques de conception. Sachant que l'enjeu de «l'énergie zéro» dans un bâtiment se trouve dans son type d'enveloppe et dans sa production d'énergie, la réglementation urbaine ne semble pas adaptée à ce principe. Les exigences de respect de l'alignement, surface d'occupation au sol et composition de façades, semblent une contradiction.



Potentiel passif, consommation énergétique et compacité

II.B2. Réflexion sur la compacité

La compacité est souvent associée à la densité et à la performance énergétique. Il semblerait qu'une des conditions pour optimiser le comportement thermique d'un bâtiment serait de concevoir un volume compact et peu déperditif. Mais il faut observer avec attention cette consigne, car la recherche de la compacité pour la compacité ne garantit pas en soi même la performance. Par exemple, le potentiel d'éclairage naturel dans un volume compact est souvent plus réduit que pour un volume fractionné. La taille des vitrages doit être cohérente avec les apports lumineux et les apports solaires. La compacité n'est pas une qualité absolue, mais ses répercussions doivent être appréhendées dans le processus de conception.

Si en analyse de plus près le comportement thermique d'un bâtiment, on constate que, pour un même surface d'empreinte au sol, la consommation énergétique d'un bâtiment diminue sensiblement en fonction de la hauteur. La diminution de la surface d'enveloppe par rapport à la surface habitable entraîne une augmentation de la performance énergétique pouvant varier de 5 à 30% en fonction de l'orientation et de la nature des vitrages.

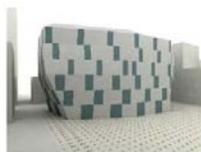
Les projets développés par l'équipe sont assez compacts, dans la mesure où leur enveloppe est optimisée pour capter le maximum d'énergie possible en hiver et de se protéger en été.

La forme du bâtiment est la résultante d'une condition environnementale, dans ce cas définie par le milieu urbain.

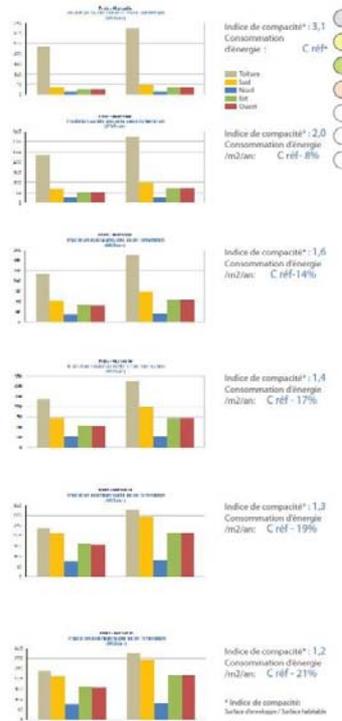
Les projets abordent la question de la compacité, d'un point de vue énergétique et stratégique. Dans un premier temps, c'est une stratégie d'adaptation au milieu extérieur. Dans un deuxième temps, c'est une stratégie de «peau active» génératrice d'énergie. Finalement, c'est une stratégie de diminution des déperditions.

Nous sommes convaincus que l'équilibre de la balance peut être avantageux, en valorisant les apports solaires passifs.

La question de la diminution de l'éclairage naturel, est équilibrée également avec l'adaptation de la taille des vitrages aux besoins en éclairage naturel, en fonction de la hauteur de la pièce dans le bâtiment et par rapport aux masques environnants.



Réflexion sur la compacité



II.C. Réflexion sur l'enveloppe

L'enveloppe constitue l'interface entre l'environnement intérieur et extérieur. Elle joue le rôle d'étanchéité de protection au même temps qu'elle configure l'espacité et la morphologie du bâtiment. Mais c'est à travers l'enveloppe aussi, que sont gérés les différents aspects liés au confort des occupants. Confort thermique, acoustique, lumineux, qualité de l'air. Ainsi la qualité et la configuration de l'enveloppe déterminent la performance énergétique du bâtiment.

Cependant l'enveloppe joue un rôle non seulement d'interface mais aussi de générateur d'énergie, à travers des «surfaces actives». Les nouveaux bâtiments performants produisent de l'énergie, et le feront d'avantage dans l'avenir une fois que la technique permettra d'augmenter le rendement des capteurs pour rendre les bâtiments autonomes uniquement avec l'utilisation de l'énergie solaire. Le comportement de la peau d'un bâtiment, doit être alors «intelligent». L'enveloppe doit être capable de s'adapter, de modifier ses caractéristiques pour optimiser son rapport avec l'extérieur. Pour l'instant, ceci semble une utopie, raison pour laquelle l'équipe de concepteurs a développé une méthodologie dans l'objectif d'optimiser cette peau dès la conception du bâtiment. De toute évidence un bâtiment conçu pour un environnement qui va être postérieurement modifié, devra s'adapter aussi à ces changements dans le futur.

Le principal enjeu de la conception se trouve pour nous dans l'enveloppe et non dans les systèmes. Les installations techniques vieillissent et perdent leur rendement, nécessitent de l'entretien, mais surtout elles sont rapidement remplacées par des nouvelles technologies qui les rendent obsolètes.

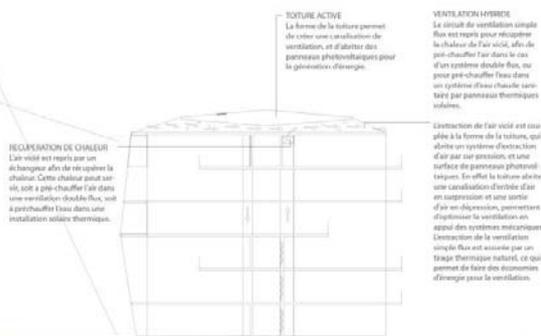
Dans ce sens là, l'équipe a conçu une enveloppe à double peau peu dépenditive pour optimiser la performance des modules développés. Cette option sera développée dans le «dessin des projets» qui seront réalisés comme «modules-exemples» de la méthodologie.

ENVELOPPE - FILTRE
La peau extérieure joue le rôle d'interface - filtre avec l'extérieur. Elle abrite les protections solaires et les surfaces verticales de captage d'énergie.

Une première peau intérieure constitue l'enveloppe primaire du bâtiment, avec des murs en béton ou bois, les baies vitrées et l'isolation. La deuxième enveloppe est extérieure et joue le rôle de «filtre naturel» afin de protéger le bâtiment des apports solaires en période estivale. L'intensité est de rendre cette peau dynamique, afin de profiter des apports solaires passifs en hiver. Cette peau abrite également des surfaces «actives» pour le captage de l'énergie solaire. L'objectif est de produire de l'eau chaude et de l'électricité.

Description de l'enveloppe

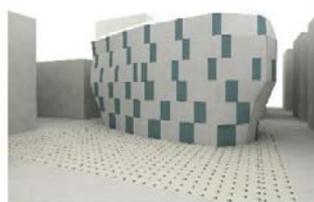
Composition	Performance d'isolation	Etanchéité à l'air	Traitement des points particuliers
Murs extérieurs Béton cellulaire, 16 cm Isolation par l'extérieur Isolant sous vide EVS 4 cm BA13 1,3 cm	U = 0,188 W/m ² ·K U _{ref} RT : 0,36 W/m ² ·K	0,2 vol/h	Protections solaires en période estivale / à définir
Toiture terrasse Asphalte 15cm Laine de roche 13cm Béton cellulaire 10 cm	U = 0,248 W/m ² ·K U _{ref} RT : 0,27 W/m ² ·K		
Plancher bas sur TP Dalle alvéolaire béton 20 cm Polystyrène expansé 5cm Linolesum 2mm	U = 0,261 W/m ² ·K U _{ref} RT : 0,27 W/m ² ·K		
Double vitrage 16mm Generic Clear 3mm Argon 1 3MM Generic Ld, C1E AR 3MM flex Menuiserie bois / alu 4cm	U = 1,324 W/m ² ·K		



Réflexion sur l'enveloppe

48

III - Conception et fonctionnement du projet



«Les méthodes de conception durable offrent à l'architecte la possibilité de ré-intégrer les compétences dans la conception qui ont divergé au cours du siècle dernier avec des conséquences néfastes. Cela attribue à la profession d'architecte un défi et une opportunité»
—A green vitruvius
Principes et pratiques de l'architecture durable

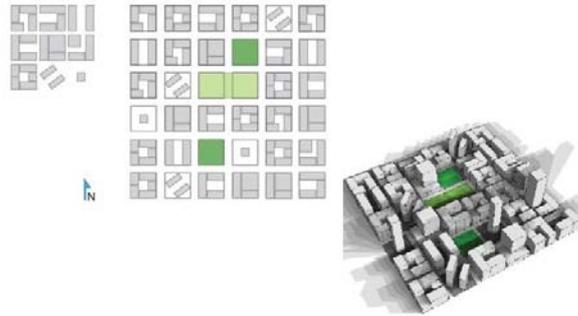
III. CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT DU PROJET

III.A. Orientations architecturales et techniques

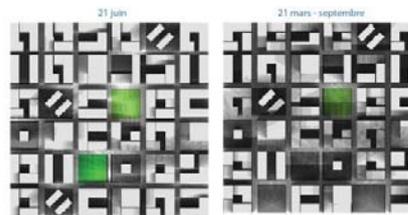
Comme énoncé précédemment, la conception du projet a son origine dans l'analyse du contexte urbain. Chaque environnement urbain détermine l'ensoleillement et les effets de masque sur les façades. La particularité des ces conditions va déterminer les besoins de chauffage et la performance énergétique globale des bâtiments. L'équipe a étudié plus précisément les différentes configurations urbaines qui peuvent se produire dans un environnement dense - similaire aux caractéristiques de densité de Paris - afin de constituer un scénario pour la réalisation des projets «pilotes».

L'équipe a simulé les conditions d'ensoleillement des parcelles dans différentes configurations urbaines. Les analyses portent sur le pourcentage d'ombrage, les niveaux d'ensoleillement de la façade, et les niveaux d'irradiation sur la parcelle. (chapitre III).

Pour la conception du projet, l'équipe a choisi une parcelle soumise à des conditions d'ombrage importantes, afin de mettre en évidence la performance atteinte en suivant la démarche de conception proposée. Ainsi, nous avons développé deux projets comparatifs afin d'évaluer la pertinence de la démarche.



- PROGRAMME ○
- REGLÉMENTATION ○
- IMPLANTATION ●
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIALITÉ ○
- SPATIALITÉ ○
- SYSTÈMES ○



Orientations architecturales et techniques

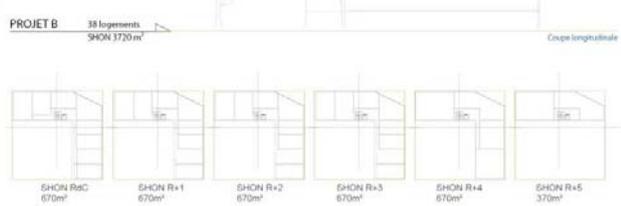
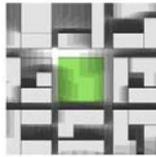
III.A1. Projet A

Le projet A a suivi une démarche de conception classique, en respectant les alignements et les hauteurs maximales. Le pourcentage d'ouvertures étant homogène et quasi identique par orientation.

Le parti pris initial n'a pas tenu compte des considérations environnementales ni de l'information fournie par l'outil de conception.

Le projet est composé de deux bâtiments orientés Nord-Sud et Est-Ouest, laissant une esplanade côté sud pour l'aménagement d'un espace public. L'implantation en L, des côtés Est et Nord de la parcelle bénéficie des apports solaires au Sud, mais pénalise les façades Nord et Est, qui sont particulièrement ombragées. Le volume au nord est plus haut en raison de l'alignement avec les bâtiments avoisinants.

Les façades sont homogènes en termes de pourcentage d'ouverture dans toutes les orientations.



Orientations architecturales et techniques

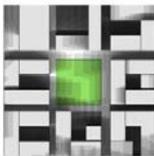
- PROGRAMME ○
- REGLÉMENTATION ○
- IMPLANTATION ●
- MORPHOLOGIE ○
- MATERIALITÉ ○
- SPATIALITÉ ○
- SYSTÈMES ●

III.A2. Projet B

Le projet B a utilisé l'information fournie par l'outil méthodologique concernant l'optimisation de l'orientation, de l'enveloppe et du dimensionnement de la taille et la hauteur des ouvertures.

Le parti architectural et environnemental du projet B prend compte des données d'irradiation solaire et des effets de masque du site. Le plan est compacte, - suivant le «dessin» de l'outil - et la dimension des étages est variable en fonction de la hauteur. Le volume prend la forme optimale et les ouvertures sont dimensionnées en fonction de la quantité de lumière disponible.

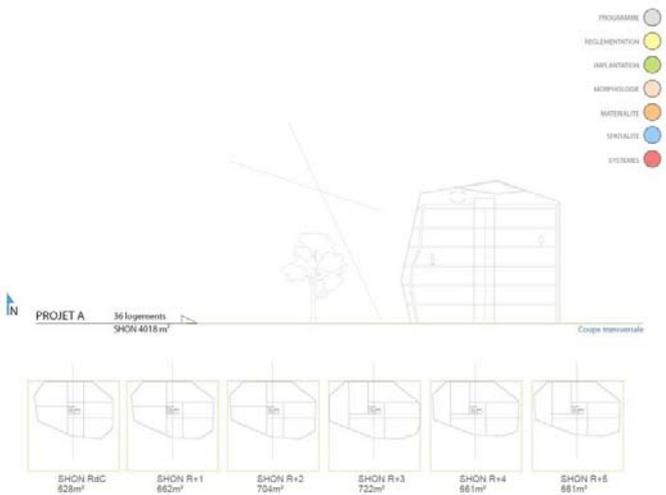
Le pourcentage de vitrages par niveau est adapté en fonction de la hauteur et de l'ensoleillement de chaque façade.



Coupage numéroté dans une journée - 21 juin



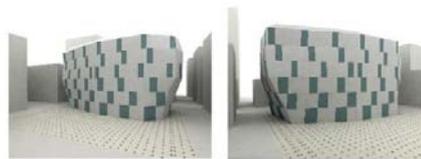
Equipes et «Gabarit» capotées superposés



Plan de masse du projet



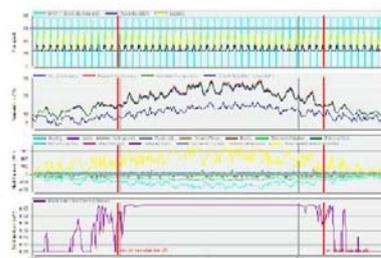
Vue aérienne du projet



Vue en perspective du projet

Orientations architecturales et techniques

IV - Performance énergétique



«Le potentiel des économies d'énergie peut être acquis non seulement par l'activation des technologies spécifiques, mais aussi grâce à la planification des milieux urbains et des bâtiments: l'ensemble des ressources naturelles dans l'environnement doivent être intégrées dans la planification.»

Réa DANIELS
«The technology of ecological building»

IV.A. Etude comparative des performances énergétiques

Projet A
Démarche classique
Surface SHON: 3720 m²
R+5
38 logements



Composition	Performance d'isolation	Surfaces
Murs extérieurs Béton cellulaire, 16 cm Isolation par l'extérieur Isolant sous vide ISV 4 cm BA13 - 1,3 cm	U = 0,188 W/m ² K U ref RT : 0,36 W/m ² K	Murs : 1950 m ² Toiture : 720 m ² Sol : 720 m ² Vitrages : 832 m ²
Double vitrage 16mm Gazéifié Clear 3mm Argon 13MM Gazéifié Lof. CL.EAF. 3000 l/m ² Menuiserie bois / alu 4cm	U = 1,324 W/m ² K Total Déperditions : 3400 W/K U1 isol : 0,42 W/m ² K	Déperditions par surface: Murs : 10% Toiture : 4% Sol sur TP : 4% Vitrages : 30% Renclos. ext : 51% Ponts therm. : 1%
Taux de vitrage : 30% RDC : 30% R+1 : 30% R+2 : 30% R+3 : 30% R+4 : 30% R+5 : 20% % vitrage / SHON : 18%	Total Apports solaires passifs (kWh/ep/m ² SHON/an) RDC : 2,7 R+1 : 2,7 R+2 : 2,7 R+3 : 2,7 R+4 : 2,7 R+5 : 2,7	Bilan énergétique par paroi (kWh/ep/m ² SHON/an) Paroi Nord : -1,2 Paroi Sud : 2,2 Paroi Est : 0,3 Paroi Ouest : 0,3 Total : 2,6 kWh/ep/m ² SHON/an
Ventilation simple flux Hygro B Taux renouv. d'air : 0,5 v/h	Bilan consommation énergie	
Chauffage collectif PAC sur eau COP 3,5 Taux conv. ECS solaire : 50% Appoint ECS Gaz	Chauffage : 9,15 kWh/ep/m ² SHON/an ECS : 11,8 kWh/ep/m ² SHON/an Éclairage : 12,4 kWh/ep/m ² SHON/an TOTAL : 33,3 kWh/ep/m ² SHON/an	

OUTIL DE CONCEPTION
Outil de conception développé par l'équipe ciblant des informations relatives aux données climatiques, à l'implantation, la morphologie, la matérialité et aux systèmes.



Projet B
Méthodologie de l'équipe
Surface SHON: 4018 m²
R+5
36 logements



Composition	Performance d'isolation	Surfaces
Murs extérieurs Béton cellulaire, 16 cm Isolation par l'extérieur Isolant sous vide ISV 4 cm BA13 - 1,3 cm	U = 0,188 W/m ² K U ref RT : 0,36 W/m ² K	Murs : 1950 m ² Toiture : 720 m ² Sol : 720 m ² Vitrages : 832 m ²
Double vitrage 16mm Gazéifié Clear 3mm Argon 13MM Gazéifié Lof. CL.EAF. 3000 l/m ² Menuiserie bois / alu 4cm	U = 1,324 W/m ² K Total Déperditions : 3400 W/K U1 isol : 0,42 W/m ² K	Déperditions par surface: Murs : 10% Toiture : 4% Sol sur TP : 4% Vitrages : 30% Renclos. ext : 51% Ponts therm. : 1%
Taux de vitrage : 30% RDC : 45% R+1 : 30% R+2 : 34 % R+3 : 28% R+4 : 23% R+5 : 18% % vitrage / SHON : 18%	Total Apports solaires passifs (kWh/ep/m ² SHON/an) RDC : 3,8 R+1 : 2,2 R+2 : 2,8 R+3 : 2,4 R+4 : 2,1 R+5 : 1,7	Bilan énergétique par paroi (kWh/ep/m ² SHON/an) Paroi Nord : -1,6 Paroi Sud : 6,8 Paroi Est : 0,1 Paroi Ouest : 0,1 Total : 5,4 kWh/ep/m ² SHON/an
Ventilation simple flux Hygro B Taux renouv. d'air : 0,5 v/h	Bilan consommation énergie	
Chauffage collectif PAC sur eau COP 3,5 Taux conv. ECS solaire : 50% Appoint ECS Gaz	Chauffage : 6,5 kWh/ep/m ² SHON/an ECS : 11,9 kWh/ep/m ² SHON/an Éclairage : 10,9 kWh/ep/m ² SHON/an TOTAL : 29,3 kWh/ep/m ² SHON/an	
	Détermination consommation énergie : 9,15 kWh/ep/m ² SHON/an Gain : 14,3%	



Performance énergétique

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- IMPLANTATION
- MORPHOLOGIE
- MATÉRIALITÉ
- SPATIALITÉ
- SYSTÈMES

V. CONCLUSIONS

Le contexte actuel
Les avancées techniques ont permis aujourd'hui d'optimiser la performance énergétique des bâtiments du point de vue de la qualité des matériaux et du rendement des systèmes. Il est certain que la prolifération des solutions techniques a donné lieu au développement de projets «écologiques» sous forme de maisons individuelles, voire des «quartiers écologiques». La conception des bâtiments performants repose en grande partie sur des techniques innovantes, mais elle laisse parfois de côté une réflexion plus vaste sur l'architecture. Il n'est pas étonnant que la plupart des projets d'habitation écologique ressemblent les uns des autres, au point de devenir quasiment identiques.

Cependant, comme l'a déjà formulé Klaus Daniels dans «The technology of ecological Buildings», il existe aussi un potentiel important d'économie d'énergie dans la planification des milieux urbains. Loin de rester dans la logique «bioclimatique» des 30 dernières années, l'architecture

fait face, aujourd'hui, à un défi majeur : comment construire les nouveaux bâtiments à zéro consommation d'énergie dans un contexte d'intégration de la technologie à la conception architecturale ?

L'objectif de cette recherche est, avant tout, d'étudier le potentiel de valorisation des énergies renouvelables dans la conception, d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie à partir d'une méthodologie spécifique, et de proposer une démarche innovante utilisant l'énergie solaire et l'environnement urbain comme principaux outils de conception.

En effet, la méthodologie de conception proposée part de l'analyse de l'environnement urbain afin d'aider à définir un des premiers choix de l'architecte : la forme et l'orientation du bâtiment. Ces deux aspects vont définir le comportement énergétique du bâtiment, et les caractéristiques générales de spatialité. Mais l'instrument développé est un outil d'aide à la conception. Il n'impose pas des structures ni des partis architecturaux. Il constitue un guide

dans la recherche de la performance énergétique, donnant des informations utiles pour formuler, définir et manipuler les différents choix tout au long du processus de conception.

Cette démarche a permis à l'équipe de faire des expérimentations dans la définition de projets performants à diverses échelles, dans différents contextes, et avec des contraintes variables. Dans le cadre de la commande, l'équipe a développé deux esquisses de projet qui correspondent à une «approche méthodologique» de la performance. Mais l'objectif final sera de dessiner un projet exemplaire en phase APD à partir de cette démarche, qui permettra, dans une phase postérieure, de montrer aux différents partenaires de la construction les résultats pouvant être obtenus en terme de consommation énergétique et ce, dans le cadre d'un concept architectural innovant.

Ce travail pourra probablement constituer une piste dans la réflexion sur l'adaptation de la normative urbaine à la conception de projets énergétiquement performants. Les villes sont engagées dans un processus d'expansion et de transformation de ses structures dans une logique de développement durable. L'architecture jouera alors un rôle essentiel dans cette réflexion dans la mesure où la conception des projets dépassera le stade de l'introduction des systèmes techniques dans des enveloppes traditionnelles, afin de concevoir des ensembles dans une logique urbaine globale. Il faudra re-penser la ville non pas en imposant les modèles d'habitation aux concepteurs, mais en leur laissant la place pour créer des nouvelles architectures qui sachent s'adapter aux changements actuels de l'environnement.



Conclusions

- PROGRAMME
- REGLEMENTATION
- IMPLANTATION
- MORPHOLOGIE
- MATÉRIALITÉ
- SPATIALITÉ
- SYSTÈMES

Photos	Type d'appartement	Nombre étages	Localisation	Année de construction	Surface (m²)	Coût	Matériaux	Fenêtres	Ventilation	Chauffage	Equipements	Enchâssé à l'air	Performances	
	MFH	11	Hannover	2003	1073	Coût de construction: 1600 €/m² surface habitable/utile (groupes 200 à 700)	<p>Murs extérieurs: Murs massifs avec peau extérieure en bois. U-value = 0,12 W/(m²K), murs de construction bois U-value = 0,1 W/(m²K)</p> <p>Murs extérieurs: KS-Osio-20 avec isolation 30 cm (polystyrène) Une isolation supplémentaire est mise en place entre l'appartement et la cage d'escalier, pour minimiser les pertes énergétiques du logement dans des zones de température plus basses U-value = 0,13 W/(m²K)</p>	<p>Plancher: 14 cm respectivement 24 cm isolation avec (sur) béton armé. U-value = 0,24 W/(m²K) bzw. U-value = 0,16 W/(m²K)</p> <p>Tuile: Toiture végétalisée avec au total 40 cm d'isolant (cellulose) U-value = 0,1 W/(m²K)</p>	<p>Fenêtres: Fenêtre 'Supertobering' Böhler Aluminium, Systeme Lenz</p> <p>Fenêtres: Profilé en PVC, avec couche d'isolation supplémentaire, détecteurs solaires extérieurs en bois. U-value = 0,63 W/(m²K) Triple et quadruple avec isolation U-value = 0,5 W/(m²K) g-value = 42 %</p>	<p>Ventilation: Système de ventilation 'comfort' avec récupération de chaleur</p> <p>Ventilation: Ventilation semi-centralisée avec récupération de chaleur sur l'air pur (non-combusteur, chaleur centralisée, ventilateurs décentralisés)</p>	<p>Chauffage: Chaudière bois (pellets)</p> <p>Chauffage: Production de l'ECS centralisée, 500l de stockage dans pièce technique, alimentation en chaleur par chauffage urbain</p>	<p>Equipements: Installation solaire</p> <p>Equipements: Production de l'ECS centralisée, 500l de stockage dans pièce technique, alimentation en chaleur par chauffage urbain</p>	<p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,6/h, kWh/(m²a) surface habitable pour le chauffage, ECS, équipements ménagers et auxiliaires estimés avec PHPP</p> <p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,5/h kWh/(m²a) Besoins, chauffage, 13 kWh/(m²a)</p>	<p>Performances: Besoins annuels de chauffage 14,2 kWh/(m²a) estimés avec PHPP Energie primaire: 74 kWh/(m²a) kWh/(m²a) surface habitable pour le chauffage, ECS, équipements ménagers et auxiliaires estimés avec PHPP</p>
	MFH	23	Kassel	1999	1802	Ø	<p>Murs extérieurs: Opaline bois, 26 cm avec isolant cellulosique, façade solaire extérieure avec alvéoles en cellulose. Sud/Nord: U-value = 0,115 W/(m²K) Ost/West: U-value = 0,146 W/(m²K)</p>	<p>Plancher: 22 cm béton armé avec dessous des logements du milieu, U-value = 0,134 W/(m²K) et 40 cm isolation U-value = 0,124 W/(m²K)</p>	<p>Fenêtres: Internorm Edition, encadrement bois-aluminium, triple vitrage avec gaz argon U-value = 0,71 W/(m²K) U-value = 0,5 W/(m²K) g-value = 51 %</p>	<p>Ventilation: récupération de chaleur, équipement de ventilation décentralisé, échangeur à chaleur en aluminium à plaques à courants croisés</p> <p>Ventilation: Ann. à Red.: Un échangeur à courant croisé ne sera pas conseillé pour cause de faible efficacité (Récupération de chaleur 50-60%) Un échangeur à contre courant croisé avec récupération de chaleur au minimum de 75% est installé.</p>	<p>Chauffage: Chauffage urbain (nécessité de raccordement) 50%, le reste est assuré par le réseau de chauffage urbain</p>	<p>Equipements: Chaudière bois (pellets)</p> <p>Equipements: Chauffage urbain (nécessité de raccordement) 50%, le reste est assuré par le réseau de chauffage urbain</p>	<p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,3/h</p> <p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,3/h</p>	<p>Performances: capteurs solaires pour les besoins en ECS 12 kWh/(m²a) 66,5 kWh/(m²a)</p>
	MFH - 4 étages	24, d'émission 70m²	Linz	2004	1672	Ø	<p>Murs extérieurs: Béton armé avec isolation extérieure, intérieur plancher en ciment flottant U-value = 0,107 W/(m²K)</p>	<p>Plancher: Construction en pierre à chaux / grès avec 30-36 cm isolant polystyrène intérieur et extérieur U-value = 0,113 W/(m²K)</p>	<p>Fenêtres: Kunststofffenster Fa. Rehau, U-value = 0,77 W/(m²K) PS (Glasrand) = 0,035 W/(m²K) U-value = 0,67 W/(m²K) U-value = 0,7 W/(m²K) g-value = 53 %</p>	<p>Ventilation: Ventilation centralisée placée en toiture avec échangeur à chaleur à contre courant et ventilateurs; chaque appartement et radiateur de chauffage pour régulation indépendante</p>	<p>Chauffage: Chaudière gaz condensation</p> <p>Chauffage: Chaudière gaz condensation, ECS décentralisée</p>	<p>Equipements: Chaudière gaz condensation</p> <p>Equipements: Chaudière gaz condensation, ECS décentralisée</p>	<p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,3/h</p> <p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,3/h</p>	<p>Performances: Machines à laver collectives alimentées en gaz 15 kWh/(m²a) 101 kWh/(m²a)</p>
	MFH	19	Hambourg	2003	1461	Construction: 1936 €/m²	<p>Murs extérieurs: Béton/Quartz/S.S. MDP/S U-Wert = 0,126 W/(m²K)</p>	<p>Plancher: Blanc / Gris Béton/Béton/terrocote/Po U-value = 0,152 W/(m²K)</p>	<p>Fenêtres: Fa Rehau U-value = 0,61 W/(m²K) U-value = 0,7 W/(m²K) g-value = 50 %</p>	<p>Ventilation: Climatization par appartement</p>	<p>Chauffage: Contrôle condensation gaz dans les combles</p>	<p>Equipements: Contrôle condensation gaz dans les combles</p> <p>Equipements: Système d'eau douce avec échangeur à chaleur à plaques</p>	<p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,17/h</p> <p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,17/h</p>	<p>Performances: PV: 5,2 kW 14 kWh/(m²a) Puissance chauffage 8 W/(m²) 56 kWh/(m²a) W</p>
	MFH	14	Hambourg	2005	1244	1240 €/m² (Kostengruppe 300-400)	<p>Murs extérieurs: Façade en ciment (constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile) Peau intérieure, mur en béton poreux 240 mm, isolation fibre minérale 200 mm ELG 035, construction mur cinder avec armature (câbles en acier inoxydable) fixés au béton poreux</p>	<p>Plancher: Plafond de la cave Ciment 50 mm Isolation acoustique 20 mm couverture béton 160 mm Isolation 200 mm</p>	<p>Fenêtres: Profil des fenêtres Cima Design PHI certifié, Fa. Rehau Vitrage, Menuis. façade Polysty 50 PHZ PHI certifié Fa. Rehau Vitrage Plus 3c, PHI certifié Fa. Witevasse U-value = 0,84 W/(m²K) U-value = 0,65 W/(m²K) g-value = 52 %</p>	<p>Ventilation: Par bâtiment centrale de ventilation Lufta en sous sol filtre et protection contre le bruit, Récupération de chaleur par échangeur à chaleur contre courant, Ventilateurs DC</p> <p>Ventilation: Dans chaque logement: Régulation de courant volumique, Bouche d'aération avec ouverture dépendant de la vitesse de l'air dans les placés à vide</p>	<p>Chauffage: Réseau de chaleur à partir d'une chaudière alimentée en pellets bois</p> <p>Chauffage: Production d'ECS potable dans chaque logement, 833 l/citriculation, Récupération de l'ECS pour 3 maisons, L. stockage en sous sol, 500l, vaisselle et linge</p>	<p>Equipements: Récupération de chaleur de proximité alimentée en bois, Production d'électricité à partir d'une installation PV 15 kWh/(m²a) 98 kWh/(m²a)</p>	<p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,17/h</p> <p>Enchâssé à l'air: n50 = 0,17/h</p>	<p>Performances: Production de chaleur de proximité alimentée en bois, Production d'électricité à partir d'une installation PV 15 kWh/(m²a) 98 kWh/(m²a)</p>

3. Inventaire de projets



1973	Porto	Portugal	Alvaro Siza	Bouça
1974	Stuttgart	Germany	Schröder	Tapachstrasse
1977	Miami	USA	Arquitectonica	The Babylon
1982	London	UK	Benson, Gordon & Forsyt	Maiden lane
1986	Paris	France	Architecture Studio	Chateau Rentiers
1986	Paris	France	Gaudin	Ménilmontant
1987	Nimes	France	Jean Nouvel	Nemasus
1988	London	UK	Grimshaw	Grand Union Canal
1990	Paris	France	Henri Ciriani	Rue Chevaleret
1991	Paris	France	Renzo Piano	Meaux
1993	Paris	France	Brenac & Gonzales	Etienne Dollet
1993	Paris	France	Chavannes	Av Daumesnil
1993	Paris	France	Dusapin & Leclercq	Bellièvre Studios
1993	Paris	France	Dusapin & Leclercq	Lauriston
1994	Barcelona	Spain	Josep Llinás	El Ravel
1995	Paris	France	Phillipe Madec	Duée Pixérécourt
1996	Paris	France	Diener & Diener	Roquette
1996	Paris	France	Lion & Levitt	Quai de Seine
1997	Paris	France	LLTR Architectes	Bercy gabriel
1997	Paris	France	Schlumberger	Cour St Emilion
1998	Paris	France	Lion & Levitt	Ilôt Schomberg
2000	Paris	France	Herzog & De meuron	Rue des Suisses
2000	Paris	France	Kagan	rue l'Amiral Mouchez
2000	Paris	France	Saadi	Oberkampf
2001	London	UK	Haworth Tompkins	Coin street
2001	London	UK	Proctor and Matthews	Millenium village
2008	Paris	France	LAN Architectes	Frequel fontarabie
2009	Paris	France	LAN Architectes	Ilot V Boulogne
2009	Paris	France	LAN Architectes	Zac Pajol

Porto - Portugal

1973

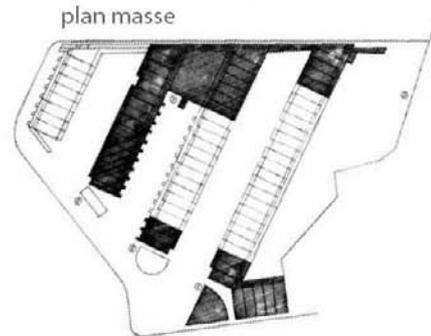
Alvaro Siza

Bouça

Adresse: Rua de Boavista / Rua Marti Liberdade
Typologie: Maisons bande / Accès gallerie

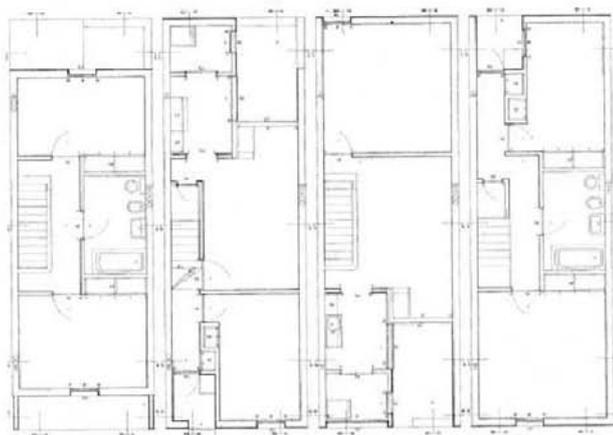
N° d'étages: 4
Type construction: Massonerie
Finition: Plâtre
Menuiserie: Bois
Programme: Low cost housing

Nombre de logements: 36
Surface: 00 m²



While Siza's design fits within the genre of Modernist European housing of the 1920's and there is a similar elementarist architectural vocabulary being applied—white, plaster walls, elementary geometry, a lack of decoration, and simple openings—Siza's work is distinctly different and embraces references to a heritage of building traditions. Siza breaks down the virtual volume of the 4 story block by changing the color of the walls from top to bottom and by letting parts of the wall either extend forward or recess back from the primary wall surface. Complex rhythms are achieved on the facades by alternating the spacing and groups of windows, creating repetitive but concatenated orders.

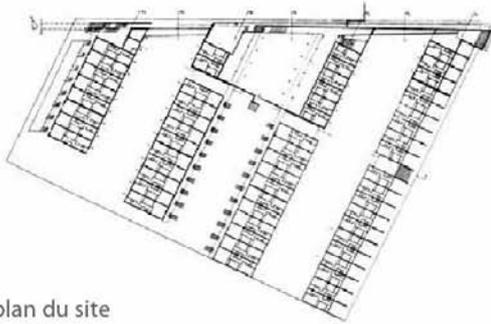
plan type



Porto - Portugal

Alvaro Siza

Bouça



- Siza, Poetic Profession, Rizzoli, 1986, pp. 72-86
- Architecture + Urbanism, Dec. 1980, pp. 58.
- José Paulo dos Santos (ed), Alvaro Siza Works and Projects 1954-1992, Gili, Barcelona, 1993, pp. 104-7.

plan du site

Bouça is a difficult site which backs up to an elevated railway embankment in an area just north of the commercial center of Porto. Siza's idea was to create an exaggerated double wall along the tracks at the north edge of the site to protect the apartments from the sound of the trains and also to order the site.

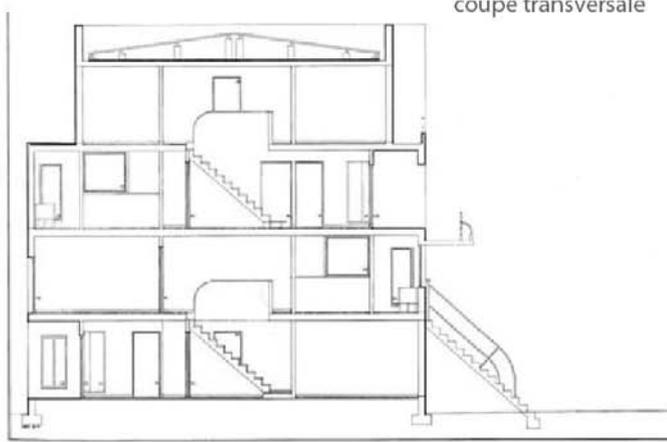
The buildings consist of 2 stacked maisonnettes four floors high. Stairs, which in the original scheme were to have been part of the retaining wall along the tracks, give access to an open gallery at the 3rd floor and the upper maisonnettes. The lower maisonnette has access at grade with individual exterior stairs to the second level or, in the easterly

block, which is on a slope the bottom two floors are flats with access to each at grade. The typical maisonnette has a kitchen, living, and bedroom at the entry level with 2 bedrooms and a bath on the second floor. Each upper level has a small balcony and each entrance a small recessed porch. Windows are limited to two types, a French door type, which is used at the bedrooms, entrances, and living areas.

There is only one window per room but the windows occur in different positions on different floors and this pattern contributes to the very simple but rich facades. Each of the French windows also has a balustrade and so doubles as a

small balcony on the upper floors. The second window occurs at the top of the stairs on the lower maisonnette. This is a double hopper type for that bedroom. As the building has been used, residents have glazed some of the balconies and terraces, taking advantage of an obvious opportunity to increase useable interior space.

coupe transversale



Stuttgart - Germany

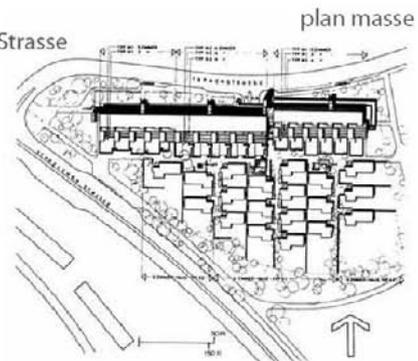
1974

Faller, Peter & Hermann Schröder Tapachstrasse Terrace Apartments

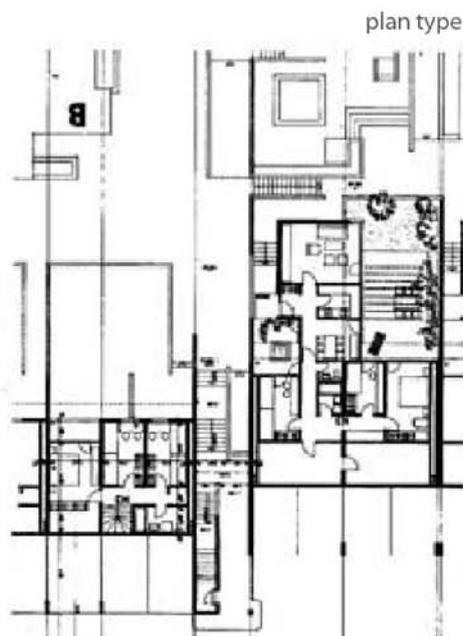
Adresse: Tapachstrasse/Hallschlag/Peter Stich/Schozacher Strasse
Typologie: Maisons bande / Accès galerie

N° d'étages: 6
Type construction: R-C Frame
Finition: Béton
Menuiserie: Métallique
Programme: Low cost housing

Nombre de logements: ?
Surface: 00 m²

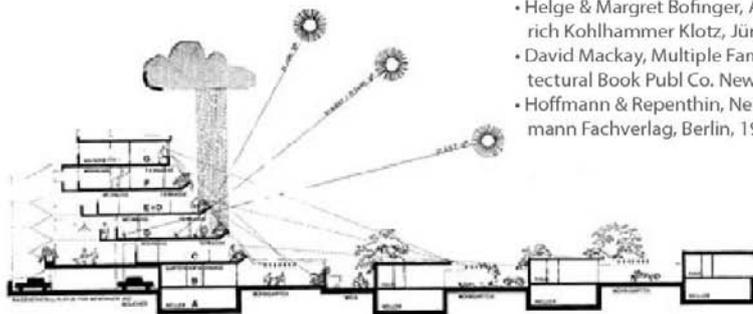


The idea of designing a terraced form of dwellings for flat sites, an idea perhaps first developed by Le Corbusier in the Durand project of 1931, has great potential as a high-density urban housing type. Seen from the south, Tapachstrasse has the appearance and indeed the amenities of hillside housing. The removal of one half of the terraces from the Marl prototype was a logical step, although the north side of the building leaves a rather uninteresting facade along Tapachstrasse. As with most «extruded» slabs of this type, the end elevations are also typically uninteresting. This kind of terraced building became a trademark of Faller and Schröder and they designed other similar buildings after Tapachstrasse.



Stuttgart - Germany

Faller, Peter & Hermann Schröder Tapachstrasse Terrace Apartments



- Helge & Margret Bofinger, Architektur in Deutschland, Heinrich Kohlhammer Klotz, Jürgen Paul, Stuttgart, 1981, pp. 76.
- David Mackay, Multiple Family Housing, David Mackay, Architectural Book Publ Co. New York, 1977, pp. 74-77.
- Hoffmann & Repenthin, Neue Urbane Wohnformen, Bertelsmann Fachverlag, Berlin, 1965, pp. 161-3.

coupe transversale

This terraced project is conceptually indebted to an earlier competition entry for housing in the city of Marl designed by Roland Frey, Hermann Schröder, and Claus Schmidt in 1965-66. In the Marl scheme, two gallery-access slabs were tilted against each other forming a long, 5-story high building that terraced east and west. About 20 of these terraced buildings were loosely arranged in parallel fashion along with scattered single houses, schools, shopping and other community services on a large irregular site. The Marl scheme was not built but the following year the architects applied the idea on a different site in Stuttgart. The Tapachstrasse site is a narrow plot running east and west so the prototypi-

cal Marl north-south arrangement was not possible. However, one half of a Marl terrace was used with the access gallery backing up to the street along the north side of the site allowing the apartments to terrace to the south. The terraced building here is 6 stories high. The long slab is interrupted and shifted slightly at the one third point presumably to both create an entrance point and to relieve the regularity of a long monolithic facade. An open pedestrian promenade is left above the level of parking along the base of the building with the open galleries stepped out and connected to several stair and elevator towers. The individual apartments are treated as parallel slots in the stepped

form and occupy one or more slots depending on the number of bedrooms. Each dwelling has a small terrace overlooking the courtyard houses to the south creating the solid/void look of the south facade. The top two floors are allocated for maisonettes while the lower 4 floors are flats. In addition to this linear block, about 20 large 2-story courtyard houses were organized in a regular grid on the remaining level land to the south. Parking is provided beneath the terraced slab along Tapachstrasse.



Miami - USA

1977

Arquitectonica The babylon

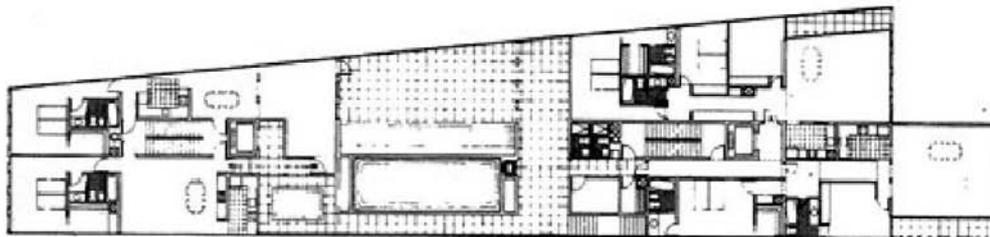
Adresse: 266 Brickel
Typologie: Bâtiment collectif - galerie

N° d'étages: 6
Type construction: R-C Frame
Finition: Enduit
Menuiserie: Métallique - portes coulissantes
Programme: Logements - commerce / bureaux - parking

Nombre de logements: 15
Surface: 00 m²



The earliest of Arquitectonica's housing slabs on Brickell Avenue along the waterfront of Biscayne Bay, the Babylon, is also much smaller than the later tall buildings designed during the 1970's by the same firm. Built on a narrow lot with the short side facing Biscayne Bay, the building was confiscated shortly after it was completed and remained unoccupied for many years.



plan 2^{ème} étage

Miami - USA

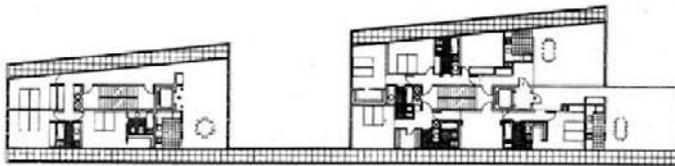
Arquitectura The babylon

- Yukio Futagawa, ed., GA Document 7, A.D.A Edita, Tokyo, 1983, pp. 34-37
- Process Architecture 65,

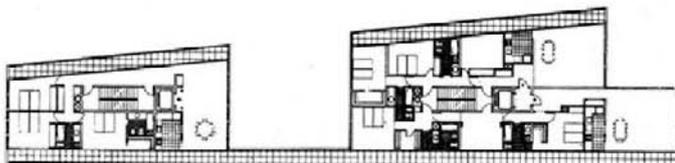
The six-story gallery-access slab has a curious trapezoidal plan and terraces in section from a wider raised platform built over a parking level to a very narrow truncated roof terrace. The ell-shaped wall facing Biscayne Bay is painted stucco and reads as a frontal screen stepping in profile revealing the terraced building behind. This brightly colored, angular facade rises from a white base which screens the parking area beneath the building which expands to a paved, walled courtyard at the rear where another stepped, screen-like, colored facade completes the «bookend» effect of the end walls. Entrance is made via stairs to the first floor gallery level where there was a

small bank. Terraces run the length of the north side of the building connecting to stairs and elevators serving apartments of varying sizes all of which open to continuous balconies along the south side of the building. There is a small pool on the narrow roof terrace. The round concrete columns are painted red while the buildings surfaces between the bookends are white including the distinctive continuous railings. Originally, two buildings were planned for the long site, organized end-to-end around a central pool. The «ziggurat» form is derived from the zoning envelope. The spatial restrictions of the peculiar, long, truncated form combined with multiple egress restrictions result in some very unconventional apartments.

plan 2^{ème} étage



plan 2^{ème} étage



London - UK

1982

Benson, Gordon & Alan Forsyth Maiden Lane Stage 1

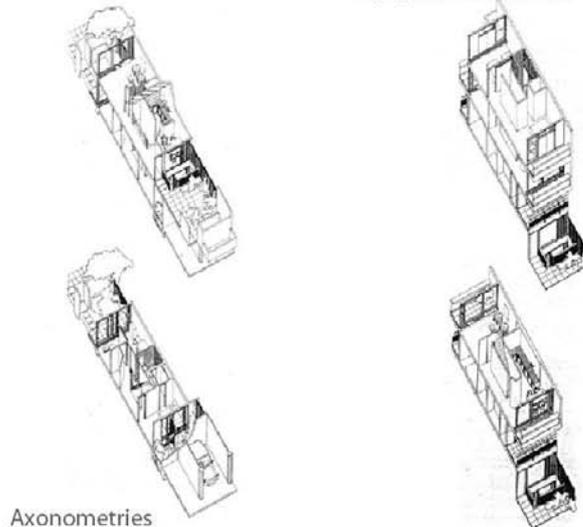
Adresse: Agar Grove/St. Paul's Crescent
Typologie: Maisons bande / Accès galerie

N° d'étages: 2 - 5
Type construction: RC - Blocs béton - préfabrication
Finition: Béton - enduit - verre
Menuiserie: Bois
Programme: Logements collectifs et maisons en bande

Nombre de logements: 225
Surface: 00 m²

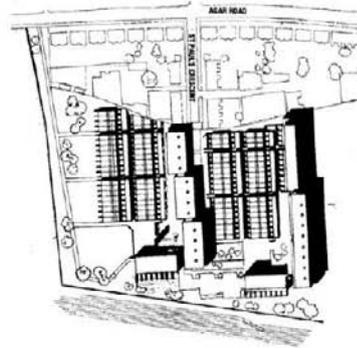


Maiden Lane is the last in a series of remarkable housing projects planned or built between 1965 and 1982 when Sidney Cook was the head of the Department of Architecture for the London Borough of Camden. These projects include the completion of Foundling Estate, Highgate New Town, Fleet Road, Alexandra Road and other housing estates in addition to many schools and other community buildings. While Maiden Lane was designed and built after Cook retired in 1973, it is of the genre of buildings built during Cook's tenure and is reflective of the brief heyday that Modern Architecture enjoyed in Camden before serious economic restrictions encouraged a return to an architecture of popular and vernacular influence.



Axonometries

plan masse



Maiden Lane is a complex of 225 dwellings on a gently sloping site above and north and east of the rail complex north of King's Cross and St. Pancras Station. Agar Road, a street of Victorian houses, defines the site along the north side. Maiden Lane consists of 2-story row houses and 3 and 4-story point and gallery-access apartment buildings arranged around several public open spaces. This group forms the letter "F" with the two groups of row houses between the extended arms of the "F". The taller buildings form a perimeter enclosure along the eastern and southern sides of the site with three elements that extend northward from the community center that contains squash courts and meeting rooms. The central plaza area extends north between two zones of row houses connecting to a row of connected 3-story buildings raised above a public walkway that connects to Agar Road. The terraced, turreted forms, railings and general look of the community complex suggest nautical references.

The program required that 50% of the dwellings were row houses and they take up most of the site. This is a deep type that is arranged into parallel north/south rows. Principle north-south walkways provide access in addition to narrow crosswalks that connect to the community spaces. The row houses, 2 stories high with sky lighted interiors, provide most of the larger family dwellings that were required to have access at grade. This type is organized with bedrooms on the lower floor that open to small gardens that get light from the terraces above.

London - UK

Benson, Gordon & Alan Forsyth Maiden Lane Stage 1



- Colquhoun, Ian, RIBA Book of 20th Century British Housing, Butterfield-Heinemann, Oxford, 1999, pp. 50-52
- Architectural Review, 11/88, pp. 74-78
- Architectural Review, 01/80, p. 34
- Architectural Review, 04/83, pp.22-29
- Architect's Journal, 19/10/88, pp. 83-84
- Techniques & Architecture, May, 1981, pp. 60-61

Parking is also located at the lower level. The living spaces are located on the top level with living and dining areas opening to terrace spaces. The interior kitchen is lighted with a continuous skylight.

The smaller dwellings in the program are located in both point-access and gallery-access building types. All dwellings have either private gardens and terraces or balconies. Some of the maisonettes have double-height living rooms. Parking is provided below grade with auto access at two points from Agar Road. The open spaces were minimally landscaped and provided with planters above the garage levels.

The construction and materials used in Maiden Lane include a mix of poured in place concrete, precast concrete panels that are used for the cross walls, plaster walls, concrete block, black wood window and door frames and balustrade parts, wood fences, several different types of glass including translucent glass for some balustrades. The concrete is painted and was beginning to peel by the end of the first year.

Shortly after it opened in 1982, Maiden Lane was hailed as a model new community by articles in the April 1983 issue of Architectural Review written by Alvin Boyarsky and John Winter. Praise was given to the site design and the quality of the public spaces, the mix of dwelling types and the overall quality of the individual dwellings. References were made to Corbusian housing models and the famous terrace housing by Atelier 5, Siedlung Halen. By the mid 1980's, however, Maiden Lane had been rendered virtually uninhabitable and Hunt Thompson Associates were hired to prepare a report about how to modify and improve living conditions.

The Thompson report was highly critical of the design of Maiden Lane and contained comparisons between statements in the 1983 AR article and those from actual residents. Most dissatisfaction related to the row house dwellings and Hunt Thompson made recommendations to modify these houses that included different access, more secure parking, the installation of pitched roofs over the skylights and the reorganization of the interiors so that the

living spaces were below grade with the bedrooms on top. There were dampness and drainage problems, vandalism and a general lack of security. Walls were covered with graffiti, paint was spalling everywhere, roofs and skylights leaked and there were leaking problems with the heating supply lines. While Hunt Thompson was very critical of the design of Maiden Lane other evidence indicated that tenant complaints were also the result of social problems related to the concentration of an impoverished population in these buildings, poor management; and poor maintenance. Twenty years later, the buildings have a very worn appearance. Painting is still spalling and walls are patched and damaged, cars are parked everywhere and while there are some mature trees, the planters are still a problem. All of the Hunt Thompson proposals do not seem to have been implemented and the skylights, at least have not yet been replaced with pitched roofs and the buildings look pretty much original. Considering the appalling social profile of the Maiden Lane residents described in the Thompson report (Architectural Review, Nov. 1988, pp. 74-78), it is a small miracle that Maiden Lane is still in use.

Paris - France

1986

Architecture Studio

Chateau des Rentiers Apts.

Adresse: 106 Rue de Chateau des Rentiers -13ème
Typologie: Tour

N° d'étages: 13
Type construction: Ossature métallique - béton
Finition: Céramique - béton prefabrique
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs

Nombre de logements: ?
Surface: 00 m²



plan masse



The siting of modernist slabs on irregular sites often resulted in odd-shaped leftover parcels that were either too small for economical development or rendered virtually uninhabitable because of the formidable blank end walls of the typical residential slab. This unusual, 10 story, point-access, triangular slab was built on such an impossible site, complicated further because it was located at the acute angle of a difficult street intersection. Backing up to the blank north wall of the end of a 13 story 1960's slab, the building mass steps down from this wall to the point of the triangle facing the intersection. The three-meter square structural bay is revealed at this corner as a three-dimensional structural matrix of square steel columns and beams.

Paris - France

Architecture Studio

Chateau des Rentiers Apts.

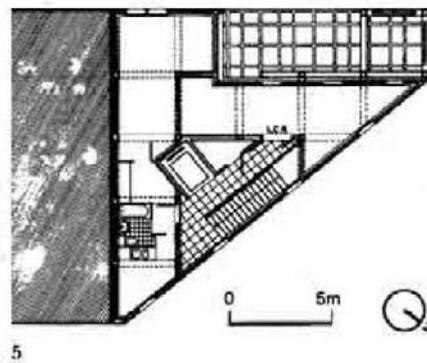
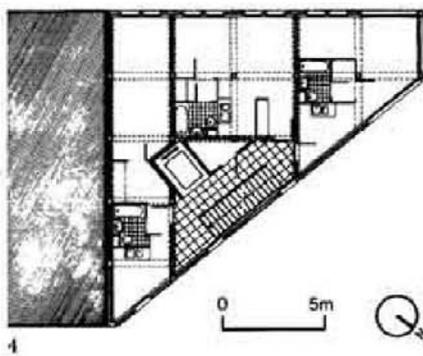
- Jean Michel Hoyet, Contemporary Architecture in Paris, Tech. & Arch., Paris, 1996, p. 83
- Architecture Studio; Selected and Current Works, Images Pub. Group, Victoria (Australia), p. 176-81.

Except for the lobby of the building, the structural grid at the base of the building provides an open two-story high passageway beneath the building. The exposed structure at the top forms small terraces for the upper dwellings. Inspiration for this small structural grid seems to have come from the construction crane that was used in the building construction and the resulting vertical extension at the corner recalls a crane-like structure. The exterior walls are also rendered as gridded modular organizations here with a small module of alternating square and rectangular panels of black ceramic tile bordered with white tile. Windows align with this modular formation. The small size of

both the module of the structure and the exterior tile results in a striking difference in scale between the existing and new facades. The north facade is also rendered in black and white tile and is organized as a large-scale map of this part of the city complete with the location of metro stops and principal landmarks which are lighted at night. The north facade too, shows the scalar dislocation between existing and new, and the repetitive square windows of this facade are curiously at odds with the overpowering zigzag of streets in the tile patterns. The diagonal lobby that aligns with Rue Jean Colly along the north side of the site has small square windows overlooking

king a small park to the north as do the kitchen windows of the apartments. There are twenty-five small apartments. The typical floor contains three small, but intriguing studio apartments, one that extends the full width of the existing building, and two others organized centrally about one of the square columns. The dwellings in the upper floors vary in size as the building form changes and some of these have small terraces in the open structure at the top of the building. While the strategy of building on sites leftover from the inflexible siting of modernist zeilenbau forms has to be seen as a worthy objective, this odd little tower ultimately has to be seen more as an eccentric experiment than as a viable housing prototype.

plan type



Paris - France

1986

Henri Gaudin

Ménilmontant Apartments

Adresse: 44 rue de Ménilmontant - 20ème
Typologie: Block périmétral - patio intérieur

N° d'étages: 5 - 6
Type construction: RC Frame
Finition: Enduit - céramique
Menuiserie: Métallique
Programme: Logement - commerce - parking

Nombre de logements: 36
Surface: 00 m²



plan masse



The Ménilmontant apartments established Henri Gaudin as an important force in the Post Modernist movement in Paris in the early 1980's. Along with an earlier housing project at Maurepas in the new town of Saint-Quentin-en-Yvelines (1981), and a third group of dwellings in the new town of Évry (1982), Ménilmontant offered an alternative image to the type of Modernist buildings that dominated Paris housing in the 1960's and 1970's. Later buildings and projects by Henri and his brother Bruno tend to overshadow these early projects, however, these modest housing projects were widely published and exhibited and reveal the unique sculptural style resulting from Gaudin's very painterly approach to design.

vue du patio



Paris - France

Henri Gaudin

Ménilmontant Apartments

- Techniques et Architecture, Dec, 1987-Jan 1988, pp.69-71.
- Archithese, April, 1988, pp. 53-54.
- Archithese, July-Aug, 1988, no. 4, pp. 45-54
- Henri & Bruno Gaudin, architectes, Éditions du Demi-Cercle, Paris, 1990.
- Henri Gaudin, Éditions Norma, Paris, 2001, pp. 102-109.



plan RDC

Ménilmontant is located on a site in a dilapidated neighborhood in the 20th arrondissement that is undergoing gradual redevelopment. Occupying the corner of a chaotically-organized perimeter block, the difficult sloping site and discontinuous context presented a challenging test condition for the application of Gaudin's new building forms. The «U»-shaped site arrangement is formed by two building elements. The first attaches to the party wall of the adjacent building along rue de Ménilmontant, extending to the corner while the second extends along the side street joining existing buildings fronting that street. The rue de Ménilmontant block is 6 floors high and continues the surface and hori-



zontal zoning of existing buildings along the street. As this building extends back into the block it is expressed as a partially freestanding, stepping element that opens to and benefits from the open spaces on the interior of the block. The rue Delaitre façade is 5 floors in height and also continues the surface and organizational cues of existing buildings along the street. The site is entered at the corner, at the intersection of the two buildings. This idea is conveyed by the very sculptural building mass at the corner. The two elements define a narrow interior courtyard that connects spatially to the random pattern of voids existing on the interior of the block. This diagonal path is expressed as a ramp passing through the courtyard connecting the opening to the interior of the block with the corner entrance to the complex. The irregular building plans combine four discreet point-access buildings and contain a variety of dwelling types and shapes ranging in size from studio flats to 6 room duplexes. An important emphasis of the architect was to avoid the kind of stereotype flats that tended to dominant housing in Paris in the Post WWII era.

The planar walls along the street contrast sharply with the undulating walls and curved elements of the courtyard. This contrast between planar and curvilinear elements forms a critical dialogue in Gaudin's work, here constituting the raison d'être of the building plans and

facades. The voluptuous quality of the plaster forms of the courtyard seems derived from Maurepas; turrets, curved and colonnaded porches and stairs and bay windows. The outer facades, rendered in ceramic tile, basically continue the urban planes of the street and the zone of shops along the sidewalk. But then this primary geometric solid has been subjected to a process of formal manipulation, simultaneously accretive and deductive, that transforms the virtual mass into one seemingly cut from a block of Plasticine clay. The continuation and dominance of the flush planar walls is maintained by an order of repetitive windows. A central zone of curving wall elements, bay windows, cantilevered beams, engaged columns and diagonal planes have been applied to this surface and form an additive layer of elements on both street facades. At the same time, parts of the virtual mass have been cut-away to articulate the intersection with adjacent buildings on each side, to develop the corner intersection, and to express horizontal zoning derived from the organization and details of existing buildings. While the results are highly idiosyncratic and may run the risk of becoming merely a bricolage technique for achieving a more dynamic appearance and good contextual fit, clearly, the results go well beyond Modernist ideas, forms, and details and firmly establish Ménilmontant as an influential paradigm for recent housing design in Paris.

Nîmes - France

1987

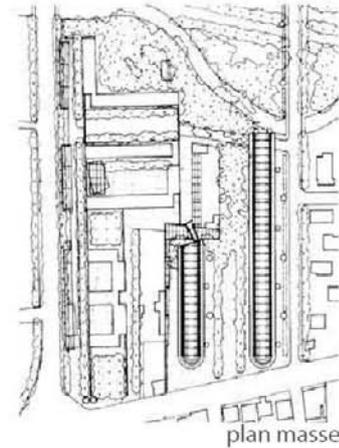
Jean Nouvel

Nemusus I & II

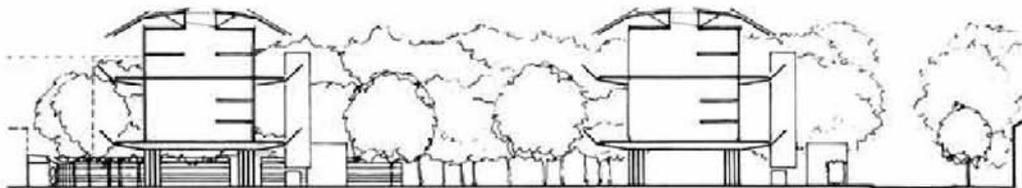
Adresse: rue de Vistre /Ave. du Général Leclerc
Typologie: Collectif / Accès galerie

N° d'étages: 6
Type construction: RC frame
Finition: Métallique - tôle acier
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements - parking

Nombre de logements: ?
Surface: 00 m²



Nemusus was a radical experiment in applying the principles and materials of industrialized building to the construction of social housing. Consistent with other «industrial aesthetic» projects by Nouvel of this period, these two apartment slabs express maritime and aeronautical imagery within the framework of an assemblage of pre-manufactured industrial components. Built in an industrial zone in the southwest part of Nîmes as part of a program to renovate a decrepit district of 1960's public housing, Nemusus was also seen as a radical alternative model for the usual limited, desolate programs of rent-controlled, subsidized housing. In addition to providing a fresh new image for public housing the application of industrialized construction technology sought to reduce construction costs and thereby provide larger, better dwellings.



section transversale

Nîmes - France

Jean Nouvel Nemasus I & II

- Pere Joan Ravel·lilat, Block Housing, , Gilli, Barcelona, 1992, p. 66-71.
- Archithese, Sept-Oct. 1988,
- GA Houses, No. 23, Aug. 1988, p. 50-9.
- Jean Nouvel, Patrice Goulet, Ed. du Regard, Paris, 1994, p. 118-125.
- L'Architecture d'Aujourd'hui, No. 239, June, 1985, pp. 22-27.
- Jean Nouvel, Oliver Boissire, Terrail, Paris, 1996, p. 46-51.

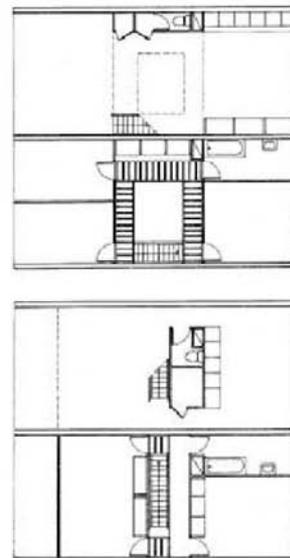
Two seven-story, gallery-access slabs, aligned east and west, occupy each side of an existing alleé of plane trees in a neighborhood of anonymous existing apartment buildings and single family houses. The east ends of the two slabs which face Ave. Général Leclerc along the east side of the site are rounded and both are raised on pilotis providing covered parking at a slightly depressed lower level. The long slab faces Rue de Vistre along the north side of the site while the shorter block has been shortened to allow it to fit into the irregular area defined by existing buildings to the south and west. The grove of plane trees between buildings provides a diaphanous canopy of foliage that reaches almost to the top of the buildings.

The perforated PVC awnings that extend from the top of the buildings and the deflected, perforated metal balustrades of the cantilevered balconies on each side belie the repetitive rational order of the 5m x 12m structural bays. While the elevations are repetitive and continuous, there is a varied mix of flats, duplexes and triplexes packed in the typical skip-stop sections. Access galleries extend along the north side of each block, which connect to elevator stacks built within the frame and open metal stairs that are attached to the edge of the gallery. The cantilevered balcony on the opposite side of the building forms a continuous terrace along the south side of each dwelling. Corrugated aluminum panels, aluminum windows and white-painted bi-fold doors enclose the con-

crete structural frame and separating walls. Perforated galvanized industrial grating is used for the tilted panels of the balustrades and PVC agricultural louvers are used for the roof louvers. Both balustrades and roof louvers are attached but discontinuous elements, extended and deflected upward, giving the appearance of the extended flaps of a commercial jet. The balconies do not extend entirely around the curved ends of the building facing Ave. G. Leclerc where there is a continuous vertical strip of glazing. This flush, curved surface combines with the continuous balustrades, raised pilotis, and roof canopies to suggest maritime metaphors.

The typical apartment is defined by 5x12 meter bay but includes the space of the terrace that is covered by the cantilevered balcony above. The dwelling typology includes 17 different types including several different flats, duplexes and triplexes that range in size from one-bedroom flats to three bedroom triplexes. Most of the flats are on the top floor; however, some of the triplexes extend into this level where the top floor bedrooms have separate entry and exit. Every apartment has bi-fold metal doors opening the full width of the dwelling. Most of the multi-floor dwellings have two story high volumes and some have two-story high doors. The industrial quality extends to the interiors where the concrete is left unfinished and manufactured panels and stairs are also used. In some of the flats the 5m bay has been divided into smaller rooms, but in most

of the apartments, the full width of the structural bay is kept and the impression is of very generous, open loft space. To Nouvel's chagrin, the idea that savings in construction costs resulting from the industrialized building techniques and minimal interior finishes would be passed along to the tenants in the form of much more spacious, generous dwellings was never realized and apparently rentals were determined by floor area instead of building costs.



plan type

London - UK

1988

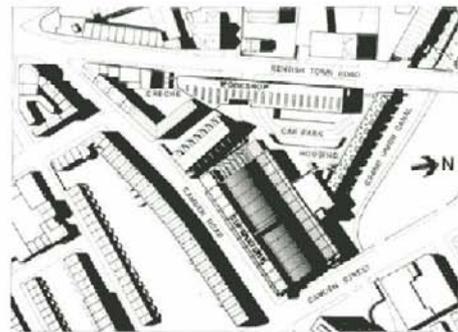
Grimshaw, Nicholas & Partners Grand Union Canal

Adresse: 17 Camden Road NW1
Typologie: Maisons en bande

N° d'étages: 13
Type construction: Ossature métallique - béton
Finition: Céramique - béton préfabriqué
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs

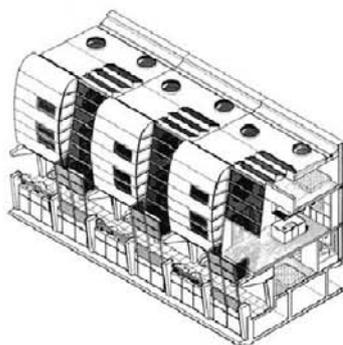
Nombre de logements: ?
Surface: 00 m²

plan masse



This modest group of 10 row houses built along the Grand Union Canal as it winds through this part of London, is part of a larger redevelopment project for a difficult site in the middle of Camden. The triangular site is defined by major roads on three sides and is further complicated by the existence of a church along the southwestern edge and the canal that passes through the north side of the site. The supermarket is the dominant building on the site and is an example of the innovative steel structure typical to the work of Nicholas Grimshaw and Partners. The program that evolved for the project was the result of the complex interaction of several community groups but included the supermarket, a pre-school, 300 parking spaces, 2000

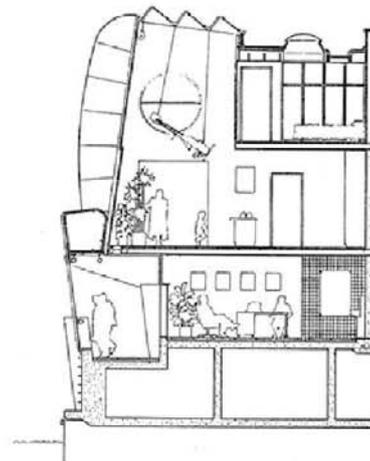
square meters of office/workshop space and the group of row houses. Ostensibly, Grimshaw was selected to do a hi-tech supermarket for Sainsbury and the row houses were included as a gesture to begin to develop housing along the canal. The site strategy developed around the best position for the supermarket along Camden Road. This long-span, exposed steel structure thus backed up to a large service and parking area along Kentish Town Road on the western edge of the site. The school and office/workshops were built over the parking. The only place left for housing was a long narrow strip along the edge of the service and parking areas that fronted the canal. While the canal and its activity and serenity was a valuable amenity, its location



axonométrie



plan et coupe type



London - UK

Grimshaw, Nicholas & Partners Grand Union Canal



- Architects' Journal, Oct. 4, 1989, pp. 40-51; 56-59; 69-71.
- Architectural Record, Sept., 1989, pp. 78-79.
- Architectural Review, Oct. 1989, pp. 36-49.
- Architecture d'aujourd'hui, Feb, 1990, pp. 130-33.
- Colquhoun, Ian, RIBA Book of 20th Century British Housing, Butterfield-Heinemann, Oxford, 1999, pp. 54-57.
- Ravetlat, Pere Joan, Block Housing, Gustavo Gilli, Barcelona, 1992, pp. 166-173.
- RIBA Journal, April, 1990, pp. 52-63.

along the truck turn around and parking area and north-facing exposure was less than ideal. The resulting building form was a logical expression of the site; a row of 3 story town houses, backing up with a blank wall to the noise and pollution of the parking and service area, stepping and opening out to the canal, but designed in such a way that sunlight could be admitted to each dwelling. The canal passes underneath Camden Street at the east corner of the market building, passes along the northern edge of the site and flows beneath Kentish Town Road to the locks just south of this point. Thus, various canal vessels periodically move through this waterway and it defines the foreground scene to a distant landscape on the opposite side of the canal that will eventually be terrace housing.

Ten, 3-story row houses back up to a 3 story high, blank corrugated metal wall at the edge of the parking lot and cantilever out over the edge of the canal. These dwellings are reached from a public walkway along the canal bulkhead the level of which is just a few feet below the bottom floor of the town house. Rooms and balconies in the upper floors cantilever out over the walk and there are ladders leading down to the water so that private boats can be periodically moored along the water. The walkway is reached at the western end with a tower element containing stairs and elevators connecting to the street level. In addition to the vertical circulation, the tower element also contains a flat and a maisonette. The row houses back up

to the parking wall with a zone of baths, the kitchen, and utility rooms so that the living spaces all look directly out on the canal. The section is organized in typical row house fashion with an entry, bedroom and bath on the lowest level and a stair leading to the living spaces on the main floor with a two-story void and stair connecting to the third level where there are two bedrooms and a bath. The two-story high void of the dining room is expressed on the canal façade as a canted glazed wall running the full height of the top two floors. The lower section of this window is a vertically sliding door that tracks up so that whole dining area can be opened to the terrace overlooking the water. The recessed, canted glass walls of the dining area alternate with convex corrugated metal walls of the living/bedroom resulting in a solid void pattern on the canal façade. The two-story glass walls express the extended vertical volume while the two floors of the other half of the plan are expressed as two levels each with Airstream-type gasketed windows punched from the horizontal corrugated metal wall. Skylights at the top of the dining volume are canted to the south so that some direct sunlight comes into this space that is indirectly shared by the upper bedrooms. Skylights in the ceilings of the upper bedroom and bath provide natural light to the interior rooms of the upper floor that don't have windows on the south side because of the parking lot.

Grimshaw's strategy of extending the hi-tech materials and finishes of the supermarket to the parking wall of the row houses and the articulation of the tower entrance as part of the entrance to the service, seem consistent with the overall expression of an industrial architecture. The standard finishes of the interiors, white plaster walls, wood doors, and hardwood floors of the row houses, however, contrast sharply with the high tech materials of the exterior; a traditional row house typology has been adapted to a different condition but then covered with an industrial veneer of materials seemingly intended to impart an ambience of technical ingenuity more than a clear statement about the terraced form and typology. The skylights, rolling windows and two-story volumes of dwellings are very innovative ways of compensating for the problems of a north exposure, but this remains a damp, dark prospect and raises questions about the larger site problem of how to front the canal, how to make entrance to the dwellings from the end tower, and the wisdom of including housing in the program at all. The economic trade-offs between the need for supermarkets and the need for housing typically shortchange the housing. Still, the construction of new housing across the canal and the continued maintenance of the lower level of public walkways along with the movement of the boats should result in a remarkable residential enclave in the midst of this chaotic urban landscape. Defining the edge of the canal behind the market was critical to controlling any future construction here.

Paris - France

1990

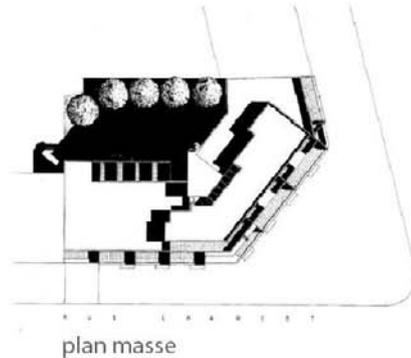
Henri Ciriani

Rue du Chevaleret

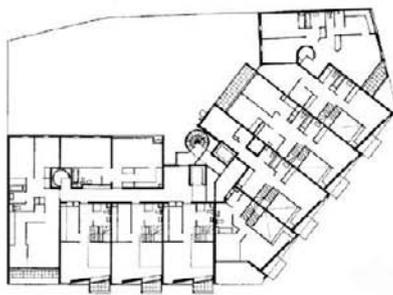
Adresse: Rue du Chevaleret/Rue Charcot, 13^{ème}
Typologie: Block Appartements

N° d'étages: 9
Type construction: RC frame
Finition: Ceramique - pierre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs

Nombre de logements: 46
Surface: 00 m²



Rue du Chevaleret is a meandering street along the bottom of the sloping north edge of the 13th arrondissement, an area that had long been a marginal neighborhood because of its proximity to the industrial zone of the tracks. The city's proposals to build Rive Gauche, however, greatly improved the value of property along Rue Chevaleret and, by the mid 1980's, several new projects were underway along this street. Henri Ciriani's building is located on one such site, the corner of a perimeter block facing Rue du Chevaleret and Rue Charot. Ciriani is well known for earlier social housing in the new towns around Paris, Evry, Marne-La-Vallee, at Saint-Denis, a town just north of Paris, and for other recent apartments in The Netherlands, but this is his first housing in Paris.



plan et coupe type

The 9-story building completes the chamfered corner of the block resulting in three different facades that are organized as four distinct elements. A zone of duplex apartments that wraps the corner, forming two separate facades that share a common entrance at the corner. This central zone of duplexes changes to a zone of flats at each side where they abut adjacent buildings along the street. The zone of duplexes is expressed as a very plastic, reticulated frame of infill panels with projecting balconies while the zones of flats to either side are detailed as flush walls with strip windows and integral balconies. A row of shops occupies the ground floor and forms a raised base for the apartments above. The lobby is raised slightly from the sidewalk and extends to the rear where there is a view of the courtyard. In

Paris - France

Henri Ciriani

Rue du Chevaleret



- Chaslin, Francois (introduction), Henri Ciriani, Rockport Publishers, Rockport, Mass., 1997, pp. 90-97.
- Casabella, July-Aug, 1992, pp. 56-61.
- L'Architecture d'aujourd'hui, Sept., 1992, pp. 122-127.

response to zoning requirements, the building steps back above the cornice at the top of the 7th floor. An additional row of duplex dwellings is located above this on the Rue du Chevaleret façade, set back forming continuous roof terraces.

The plan is organized as two double-loaded, skip-stop corridor buildings that interlock at the corner sharing a common lobby and stair. The corridors do not occur at the same level, however, so each block has its own elevator. This shift in section, the result of a sloping site, is also apparent in the elevations. Each block is organized with a zone of duplex apartments facing the street that have two story high living spaces and stairs connecting to upper levels that wrap over the corridor and have bedrooms facing the interior court. Smaller flats are organized in a narrow zone along the court side of the corridor and at the ends that abut adjacent buildings. The plan idea is also clearly expressed in the facades. The zone of duplexes are articulated as recessed infill panels in a two-story high structural frame on both street surfaces, and while a similar frame and panel system is used in each building, there are enough detail changes that two different buildings are clearly discernible. The reading of the structural frame is reduced in the zone of flats to each side that continues the street surface but have recessed balconies. The development of the infill panel is one of the most striking architectural features of the building, recalling Rationalist traditions of articulated structure, but

rendering the two main facades as very plastic and layered constructions. The columns and floor slabs define a grid 5.6 meters wide and two stories high, each being the two-story end of each maisonnette. A limestone panel, placed slightly obliquely in each recessed bay, provides a rich pallet of materials and colors. While the internal two story volume of the living space does not extend to the exterior, the presence of this extended vertical volume is expressed on the façade as the two-story high bay and a vertical slot of fixed glass with brightly colored operating panels along one side of the opening. A band of clerestory windows at the top of the panel defines the zone of the bedroom and study balcony on the second floor while the projecting balcony below expresses the position of the living spaces on the interior. The combination of modular limestone panels, flush aluminum windows with operating panels, vertical strip fixed glass with operating colored panels and the stucco and metal railings of the balcony results in a rich composition that is further articulated by the shadows cast by the structure and balcony on the oblique recessed panel.

The use of the bridge/mezzanine at the end of the living room recalls a similar spatial scheme used by Sert in the Montaner apartments in Barcelona of 1931, and like this example, avoids high glass walls that were an important architectural feature, albeit a solar problem with both the Immeubles-villas and unité prototypes. The problem of the exaggerated length and narrow width

of the unité type is avoided here by the 5.6-meter width—it allows for two normal bedrooms—and shorter overall length—it allows for normal baths and kitchens. The mix of maisonnettes and flats is also an important concept here. While dominated by the image of the 18 maisonnettes facing the streets, there are actually more flats that vary in size from a studio dwelling at the lobby level to small one and two bedroom dwellings at the upper floors. Access to all these apartments is spatially developed from the entrance and lobby, moving to the rear of the building where there is a view of the interior garden, and passing to the upper levels along two-story high glazed walls that let light into the entrance hallways.

In 1995 an idea competition was held for the landscaping and further development of the west edge of the tracks along Rue du Chevaleret. The difference in elevation between the level of the proposed platform above the tracks and the level of Rue de Chevaleret required significant design efforts to improve the public spaces along the street and to provide access up to the Rive Gauche areas. Although the upper floors of Ciriani's building now have spectacular views of Perrault's library (across the tracks), in the future it will most likely face a landscaped street and wall on top of which will be a row of taller buildings. Rue du Chevaleret thus will have a completely new urbanistic role as a transitional element between the established neighborhoods of the 13th arrondissement and the new city being built at Rive Gauche.

Paris - France

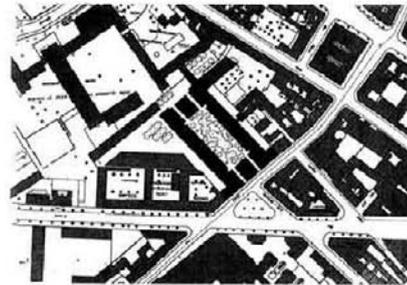
1991

Renzo Piano Building Workshop De Meaux

Adresse: 64, rue de Meaux, 19ème
Typologie: Block Appartements - patio

N° d'étages: 5
Type construction: Béton
Finition: Briques terre - béton préfabriqué
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs

Nombre de logements: 220
Surface: 600 m²



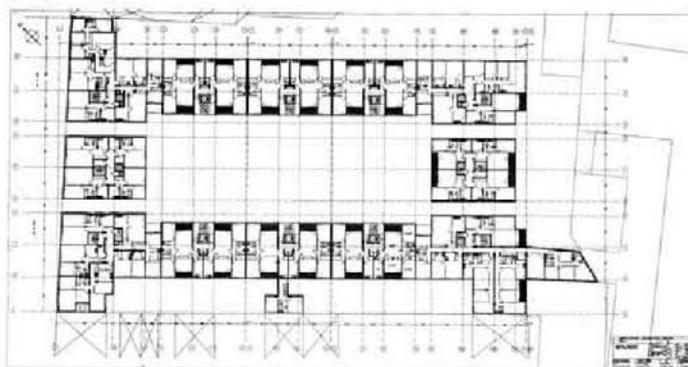
plan masse



This project is an unusual example of an architect who enjoys an international reputation for the application of advanced technology to large institutional buildings, applying this expertise to the design of low cost housing. While the complex is similar to other social housing being constructed in Paris, the application of a prefabricated system of exterior panels made of fiberglass-reinforced concrete and terra cotta cladding is a radical departure from typical habitation bon marche construction. This courtyard group of 220 apartments is an infill project in a district of typically varied blocks in a very dense part of the 19th arrondissement and was designed for Regie Immobilière de la Ville de Paris (RIVP), one the city agencies responsible for the construction of social housing. Although the prefabricated panels used for

exterior cladding are very different from older buildings in the neighborhood, the new buildings are still responsive to the existing context. The height and alignment of the neighboring buildings is respected and the new project is divided into discreet elements that refer the original parcelization of the block and continue the line of storefronts along the street. The creation of an inner landscaped garden court is an idea derived from the typical block typology-solid along the street and open space on the interior of the block-here is defined as a private space for the residents.

The 6-story high street facade continues the height of adjacent buildings except for the tall mansard roofs and attic dormers and is organized as three discreet point-access blocks defining two open portals to the garden. The end blocks are wider than the interior garden and extend beyond the width of the garden walls to connect to adjacent buildings and spaces and to provide space for light and some security for dwellings facing to the sides. The street facade is composed of alternating 3 and 4 bay modules reflecting the very modular plan organization and the system of exterior panels which are attached to the traditional concrete frame. Two 2-story high entrances in the end blocks are the entrance for the parking at one end and a gate for a maintenance area for city vehicles at the other. This two story high zone, alternates between continuous glazed and screened openings with the plane of glass recessed behind the zone of the surface panels, and the



plan type

Paris - France

Renzo Piano Building Workshop De Meaux



- Jean Michel Hoyet, Contemporary Architecture in Paris, Tech. & Arch., Paris, 1996, p. 146.
- Lotus International, 1994, no. 83, pp. 42-55
- Techniques et Architecture, Sept., 1991, p. 39-42.
- Le Moniteur Architecture AMC, May 1991, pp. 55-61.

terra cotta panels which are used on the upper floors. On the four dwelling levels above, narrow windows alternate with wider solid panels so that the pattern of solid used on the bottom floors is reversed on the top thus minimizing the number of windows facing the street. While most of the apartments in the building are designed to have frontage on both sides of the building, in the 6-story wall along the street, is a double-loaded type and dwellings face either the street or the garden.

There are 40 different apartment types in the building including a row of duplexes on the top floors and studio apartments with mezzanines along the first floor. The dwellings in the stepped section range in size and have small terraces on the outside edge of the block as the building steps back, and small «loggias», screened porches off the living areas facing the garden. The modular quality of both the plan organization and the system of prefabricated panels is very apparent on the garden facades and results in a repetitive but varied composition.

While the general fit of the complex to the site and the landscaped garden were important innovations, it is the application of the exterior panel system that draws most attention to this project. The Piano Workshop was experimenting with prefabricated panels for use as an exterior cladding system in the design of the IRCAM building next to Centre Pompidou at about the same time. Using fiber glass reinforced concrete panels (GRC) that were clad with thin terra cotta slabs, the architect was able

to design a panel with very thin proportions that could be applied in several different combinations and that had the flexibility to define windows, terraces and blank walls, using the rich color and texture of terra cotta as the primary exterior material. The panels were applied to a typical concrete framed structure providing a very economical exterior wall system. A similar panel is used at Meaux. The GRC panels are cast on a 90cm x 90cm module which is expressed as a grid of thin fins 3 cm wide and 30cm deep. These panels are applied to the structural frame and thus reflect the plan organization of large and small bays and the expression of a repetitive frame. The GRC panels come in several different types and can be applied as either a single or «double skin». Where there are windows, the 90x90 module is expressed as an open grille. Where the wall is opaque, the 90x90 panel is covered with thin terra cotta panels, 20x40 cm in size which are hung from clips cast into the GRC panel and applied without mortar.

Insulation and finish wall materials are applied to the inside of the panel. In addition to the different grilled panels, several other accessories were designed to improve the functionality and flexibility of the system including several different windows, a separate glazing system for large openings like the shops at the street and the stair windows, balustrades, window blinds and security screens at the ground floor, entrance canopies, and terrace awnings. The panels can be applied either in a single layer where the window and terra cotta panels are applied in the same panel, or in a double layer where the exterior panel forms a combination of open grille (used to cover the «loggias») and stair windows and shop windows) and terra cotta panel and the glazing is a separate layer applied inside the panel. In the single layer, the GRC panel makes a flush exterior surface while in the double layer the GRC panel is articulated as a separate attached element with the little diagonal fins (petit airlerons) along the edges of the panels.



coupe transversale

Paris - France

1993

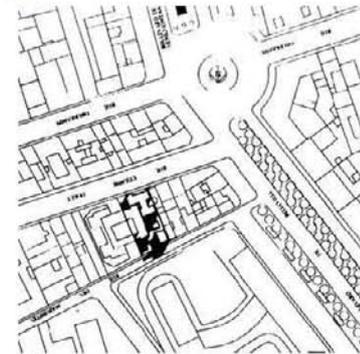
Oliver Brenac & Xavier Gonzales

Etienne-Dolet, Housing for Postal Workers

Adresse: 11, rue Etinne-Dolet, 20ème
Typologie: Block Appartements - patio

N° d'étages: 5
Type construction: RC frame
Finition: pierre - verre - acier
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs et office postale RDC

Nombre de logements: 40
Surface: 00 m²



plan masse

This is a complex infill situation near the church of Notre-Dame-de-a-Croix that was built as part of the 1989 government program to provide better housing for Post Office workers. In keeping with other examples of this program, difficult sites are typical and the emphasis has been to create new housing opportunities in transitional neighborhoods. A further emphasis of the program has been to try to create a new image of housing which is responsive to contextual conditions while providing a more articulated differentiation of the individual apartment. Each of these projects is also the site of a neighborhood Post Office which has been integrated into the building design.



plan appartement type

Paris - France

Oliver Brenac & Xavier Gonzales

Etienne-Dolet, Housing for Postal Workers

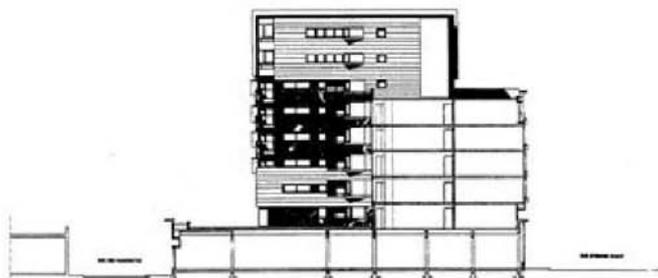
• Gleiniger, Andrea, Gerhard Matzig, Sebastian Redecke, Paris Contemporary Architecture, Verlag Prestel, Munich, 1997, pp. 154-59

The site here was the gap between an older group of 5 story infill buildings at one end of a long narrow perimeter block and a zone of 8 story apartment of the 1960's at the other. The old buildings fronted the sidewalk, but the modernist apartments were stepped back so that the street facade was obviously misaligned. The challenge for the architects was to re-align the mismatched buildings along rue Etienne-Dolet and develop a strategy for changing the building volume from 5 to 8 stories along the street to the north, rue des Maronites. This was accomplished by attaching a 5 story block to the existing party wall along Etienne-Dolet which continues the existing facades in volume and detail. A second element aligns with

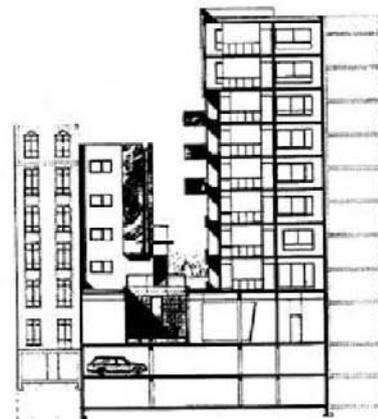
both the setback and height of the 60's block. These two elements share a central stair and elevator. Part of the street surface of the lower element extends to the edge of the 60's party wall thus defining a propylea and a small plaza which marks the entrance to the apartments and the Post Office which occupies the lower two floors of the 5 story block. While the details and materials of the new building are different, the use of both light and dark stone successfully continues the spirit of both old and new existing buildings.

The massing on the north side of the block is also the result of a strategy to realign 5 and 8 story elements. Here a freestanding block 5 stories high

attaches to the party wall of the existing row of buildings along rue des Maronites. This block is entered either from rue Etienne-Dolet or from rue des Maronites via stairs to an upper plaza level. The 8 story block extends through the block to align with the north wall of the 60's slab. The separation between the taller and lower elements forms the upper plaza space which provides a pleasant outlook for the apartments above and is a successful strategy to admit light to the interior of the block. A large skylight on the plaza admits light to the Post Office below and there are also large windows which light the upper part of the volume of the Post Office. The combination of light and dark stone again establishes a formal connection between old and new on the north facade.



coupe longitudinale



coupe transversale

Paris - France

1993

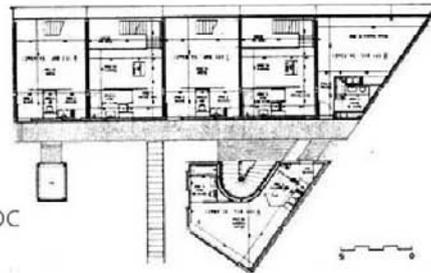
Patrick Chavannes

Ave. Daumesnil Apartments for Postal Workers

Adresse: 168 Ave. Daumesnil, 12ème
Typologie: Block Appartements - Galerie d'accès

N° d'étages: 10
Type construction: RC frame
Finition: Panneaux métalliques - parois vitrées
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs et office postale RDC

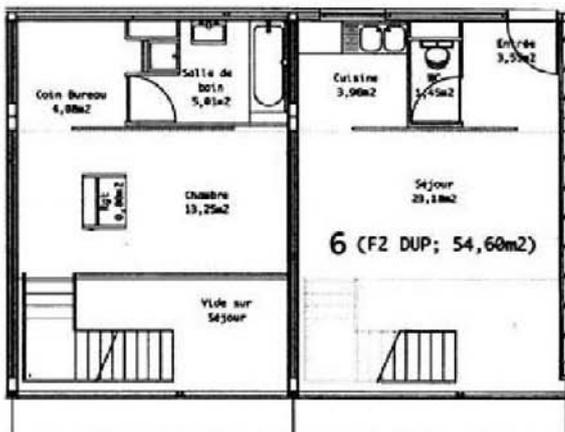
Nombre de logements: 29
Surface: 00 m²



plan masse



This infill project on Ave. Daumesnil near the landscaped promenade created on the abandoned railroad viaduct which meanders through the 12th arrondissement in the Reuilly district, is one of about thirty similar small sites scattered in different neighborhoods of the city, part of a program by the Post Office, to provide housing for postal trainees (see Oberkampf). The narrow 9 story slab contains 28 apartments built above a new post office along the street that open to a raised wooden deck in the angular-shaped space on the interior of the block. Apartments are organized in a narrow slab facing the street with access via continuous open galleries along the opposite side facing the interior of the block. Attached to the rear of the gallery



plan appartement type

Paris - France

Oliver Brenac & Xavier Gonzales

Etienne-Dolet, Housing for Postal Workers

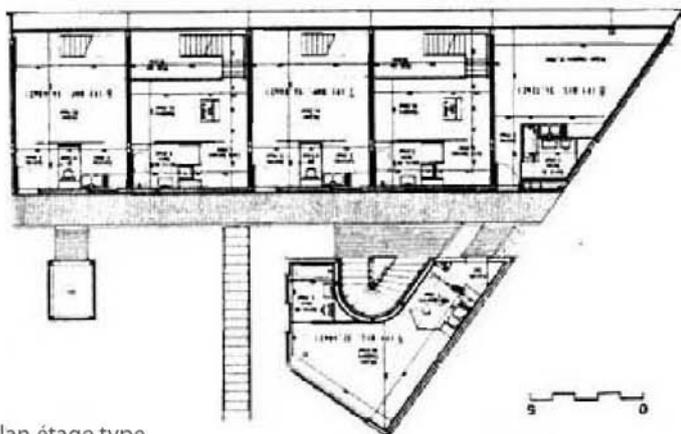
- Jean-Michel Hoyet, Ed., Contemporary Architecture in Paris, Tech. & Arch., Paris, 1966, p.110
- Le Moniteur Architecture - AMC, no. 41, May, 1993, p. 36.
- Techniques et Architecture, Nov. 1993, pp. 58-67.
- Bauwelt, Mar 4, vol 85, 1994, p. 474-5.

is a separate, vertical elevator block, a long, narrow stair connecting the deck to the first floor gallery, and a separate angular block containing one flat per floor wrapped around the access stair. The slab block is divided into 12' bays with a flat in the angular space at the end. It contains a mix of flats and maisonnettes. The slab is organized with the entry, baths and kitchens in a zone along the gallery and the open space of the dwelling facing the street. The maisonnettes, which provide the two room dwellings required in the program, are rendered in the the Parisian tradition as artists' studios with modest two-story high spaces and an open stair connecting to the mezzanine where there is a bedroom and bath, and a separate small space which can be closed off with

a sliding panel. The continuous glass facade along the south side of Daumesnil is the same height but contrasts sharply with the masonry buildings to either side giving the progressive imagery sought by the Post Office in this new building program. The projecting edge of the floor slab provides a strong horizontal emphasis to the aluminum and glass curtain wall, which is divided into large fixed and smaller operating panels. In contrast to the layered glass north facade, the south facade consists of a composition of several distinct elements and the dominant material is metal with small horizontal strip windows. The cantilevered galleries are continuous at every floor even though there is no access at the upper level of the maisonnettes. The Post office functions on the

ground floor extend into the courtyard beneath the wood deck and there is a separate lobby for the apartments.

The gallery access building type is quite unusual in recent French housing where point access circulation systems dominate in the absence of fire laws requiring multiple exits. Chavannes designed a similar slab building about the same time on rue Léon-Maurice Nordman (see Léon-Maurice Nordman). While a point-access system is used at Nordman, a similar strategy of attaching solid forms the side of a sheer glass slab is used. Here, however, the glass wall faces west and while a similar horizontal emphasis is evident, the layered concept is much more developed as a balcony/solarium device.



plan étage type

Paris - France

1993

Fabrice Dusapin & Francois Leclercq
Bellière Studios

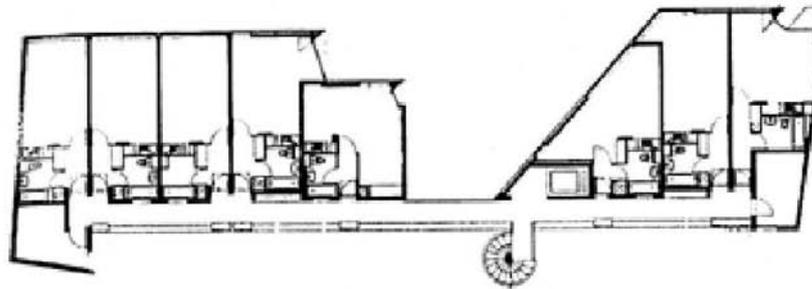
Adresse: 5 rue de Bellière, 13ème
Typologie: Block Appartements - Galerie d'accès

N° d'étages: 6 - 8
Type construction: RC frame - maçonnerie
Finition: Pierre - métal - enduit
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs et office postale RDC

Nombre de logements: 44
Surface: 00 m²



Built at the same time as the Ministry of Finance headquarters just across the Seine at Pont de Bercy, these apartments were designed to house unmarried Ministry staff. At that time, the site was a very dilapidated lot at the edge of the warehouse and industrial areas that serviced Gare d'Austerlitz and port facilities along the river. The site was part of a narrow perimeter block that included some dilapidated older apartment buildings on one side, a 6-story youth hostel on the other, and a 1930's HLM housing project across the street. The design received the Moniteur Grand Prix for the first building by a young firm when it was finished in 1987; a prize-winning pristine gem albeit built in a very marginal setting. Two years later



plan étage type

Paris - France

Fabrice Dusapin & Francois Leclercq Bellivière Studios



- Matzig, Gehard, Andrea Gleiniger & Sebastian Redecke, Paris Contemporary Architecture, Verlag Prestel, Munich, 1997, pp. 144-7.
- Querrien, Gwenael,

Dominique Perrault won the design for the new Bibliothèque de France, and the city's Rive Gauche plan for the 13th arrondissement along this side of the river was adopted in 1991. The library was finished in 1997 and Rive Gauche construction continues between the Pont de Tolbiac and Gare d'Austerlitz, a vibrant new community being built above the tracks that will completely transform the original desolate conditions of rue Bellivière. The apartment building north of the site has already been renovated, and a new office complex is being built at the end of rue Bellivière, part of the new commercial development along Boulevard de France that will connect to Gare d'Austerlitz.

The building is articulated as two, unequal blocks that are connected by open rear access galleries, but are separated by a small entry courtyard. The northern block aligns with the 8-story height of the adjacent apartment building while the southern block picks up the height of a lower existing building along the street. Both blocks contain small studio and one bedroom flats that face the street. This organization is expressed in the street facades and both buildings share similar details: flush strip windows and a regular grid of stone facing panels. The connected but disconnected quality of the two blocks is further developed with subtle details. The street surface of the taller element is deflected in toward the courtyard as though to receive the stepped end of the lower element. The partial terrace and vertical zone of recessed balconies and vertical

glass where the new building abuts the existing building to the north, make critical references to the context. The stepped massing of the lower building is further developed by stepping the façade at the 4th floor creating a narrow terrace for the top apartments as well as two narrow vertical strips of glass facing the courtyard affording views of the river. A marble wall along the sidewalk defines a common visual plinth uniting both slabs that are detached slightly from the top of the wall. The concierge apartment and parking for several cars are located in this service plinth as well as an entry gate that leads to a tiny triangular courtyard. Here a walk aligned with the oblique surface of the building connects with the elevator lobby and a diagonal stair leads up to the first level gallery. The south-facing zone of galleries at the back looks upon a narrow landscaped courtyard on the interior of the block and the roofs of adjacent buildings. A single spiral stair and partial canopy on the lower building

and the open balustrades of the gallery reinforce the idea of the gallery as a connecting element. The very plastic quality of the rear facades contrasts sharply with the flush, planer quality of the street facades. A typical floor contains 8 flats with tiny studios along the gallery and a one bedroom dwelling at each end.

The site and architectural themes developed here, detached but connected, orthogonal versus oblique, the creation of a common courtyard, and the idea of an articulated base are all themes that the architects applied again in the postal housing project on rue Lauriston in 1993. While the rue Bellivière apartments seem to have suffered from detail and maintenance problems with the stone and concrete and the small minimally equipped apartments have not been fully occupied, this is an interesting model of alternative housing and is an ingenious solution to building in a difficult infill condition.



Plan de façade

Paris - France

1993

Fabrice Dusapin & Francois Leclercq

Lauriston Postal Housing

Adresse: 71-75 rue Lauriston, 16ème
Typologie: Block Appartements - Galerie d'accès

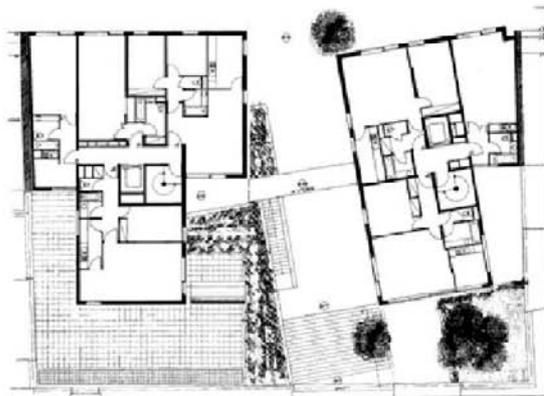
N° d'étages: 7
Type construction: RC frame
Finition: RC - granite - acier - bois - verre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - office postale - parking

Nombre de logements: 41
Surface: 00 m²

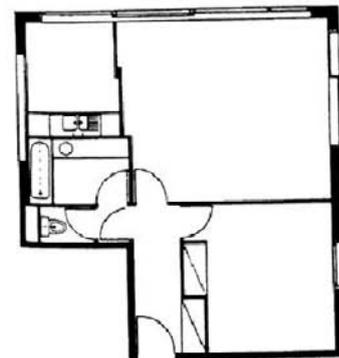


plan masse

This pair of small buildings were built as part of the French Postal Service program to provide housing for postal trainees in Paris (see Oberkampf Postal Workers for a description). Since 1990, over 1500 small flats have been built under this program on small sites in different arrondissements in the city. Neighborhood post offices were often included in the planning of these facilities. Typically, young firms were commissioned to design these buildings which were usually located on infill sites in run-down areas of the city, but were intended to provide interesting and innovative apartments for young postal workers.



plan étage type



plan appartement

Paris - France

Fabrice Dusapin & Francois Leclercq Lauriston Postal Housing



- Techniques et Architecture, Nov. 1993, pp. 61,66.
- Le Moniteur Architecture, AMC, Dec. 1993, pp. 66-67.
- Le Moniteur Architecture, AMC, May, 1993, pp. 32-33.

The new buildings follow the basic zoning of other buildings along the street: a commercial base, several floors of apartments that more-or-less align with a common cornice height with roofs and terraces stepping back above this level. This upper and lower division of the facades is a highly developed architectural theme at Lauriston that is related to the plaza notion and the spatial development of the section. While light colored smooth finished limestone, rendered as a thick wall with small openings, is used in the residential floors, a much more elaborate choice of materials and details is used to express the plaza datum. Post office functions occupy the ground floor of each building and this is expressed with a continuous, exposed steel beam at the base of the limestone wall, black granite paving, rough cut dark gray slate walls, frameless, floor to ceiling glazing, that turns in at the corners creating small recessed porches at the post office entrances, exposed structure that is expressed as round plaster columns, black metal framing, the bright yellow elements of the postal service, the signs, ATM, and mail drop devices, and varnished wood in the ceilings of the plaza spaces. This generally dark base contrasts sharply with the upper walls, but includes as well, an additional set of architectonic elements: the building mail boxes and entry, a stair to the upper terrace of the western block the bridge between buildings at the second floor and the open pilotis space beneath the eastern block (again rendered with round plaster columns) where the ramp connects to the parking area beneath the plaza.

Each block is a small point-access tower with three dwellings per floor, a combination of small studio and one bedroom flats. The mail boxes and entrance lobby for both buildings is in the eastern block along the side of the plaza. The lobby has connection to the parking level and connects to the western block above grade via the bridge. Thus the terraced garden on the south side of the western building is accessibly by residents from both buildings. A key-access exterior stair also connects from the plaza to the terrace level. The plan organization of the towers is clearly expressed on the exterior by the use of three different types of windows. Bedrooms and kitchens typically have a tall narrow recessed window with an integrated exterior balustrade. This type which can function as a small balcony, is also used in the living spaces in conjunction with a large square window that is glazed flush to the exterior but with the same balustrade railing inserted inside the glass. This window functions as a small solarium and is often filled with plants. A third window, a horizontal strip type, installed as a flush exterior type, is used in south-facing rooms as a clerestory. The combination of recessed and flush exterior glass emphasizes the thickness and surface qualities of the limestone wall and results in a varied and dynamic, layered composition.

The apartment building designed by Dusapin and Leclercq for the Ministry of Finance in 1988 on rue Bellièvre is an important precedent for the rue Lauriston buildings and the two projects share

many architectural concepts, detail features, and materials. The notion of two separate prismatic elements used to complete the infill gap in a perimeter block, one with a deflected surface suggesting entrance and creating a vibrant tension between elements and the implied plane of the street surface and the depth of the public court formed between buildings is similar quality of each project. Other shared features include the idea of the stone plinth, a stair to the second level, and the use of an elementary kit of window types applied so that the wall is dominantly stone. The commercial use, missing at Bellièvre is a much more developed feature of Lauriston, but both projects are examples of an intriguing variation of the infill building type.

Barcelona - Espagne

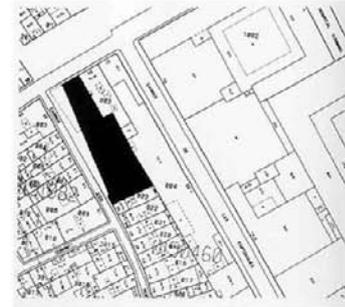
1994

Josep Antoni Llinás
El ravel

Adresse: c. del Carme, 55-57/c. d'en Roig
Typologie: Block Appartements, coin

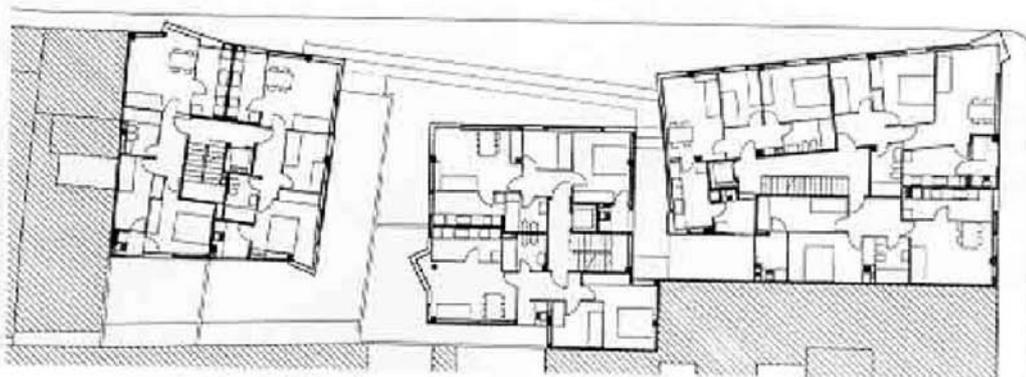
N° d'étages: 4
Type construction: RC frame
Finition: Enduit - ceramique - acier - verre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - commerce

Nombre de logements: 26
Surface: 00 m²



plan masse

El Ravel, like many of the older dilapidated districts around the periphery of the medieval core of Barcelona, has been the focus of intensive redevelopment in recent years. In addition to the Museo de Arte Contemporáneo, by Richard Meier, finished in 1995, the new building for the Faculty of Communications Sciences of the Universitat Ramon Llull by Daniel Freixes, Vicente Miranda and Vicenç Bou, in the courtyard of the Casa de la Caridad, also completed in 1995, and urban design proposals by Cristian Cirici and others for the area south of Plaça Universitat, plans were made to upgrade the housing stock. Following the pattern of rebuilding in the historic sections of Barcelona, new housing in El Ravel is planned as incremental, parceled development responsive to the existing urban texture of these neighborhoods.



plan étage type

Barcelona - Espagne

Josep Antoni Llinás El ravel



- Carlos Flores, Xavier Güell, *Architecture of Spain, 1929-1996*, Fundación Caja de Arquitectos, Barcelona, 1996, p. 132.
- El Croquis,
- Alejandro de la Sota, Josep Llinás, Tanais Ediciones, S.A., 1997, pp. 110-117.

This corner site, just south of the Museo occurs where there is a widening in the street which forms a small, elongated plaza which has been refurbished and landscaped. The del Carme facade is seen as a prominent element from this space and continues the enclosing surfaces along the street. By comparison, the side street, Carrer d'en Roig, like most of the streets in El Ravel, is very narrow and dimly lighted because of the 4 and 5 story buildings which line the street. To improve the lighting conditions, relieve the confined space of the street, and improve the quality of the individual apartments, Llinás proposed adapting the zoning envelope from a solid infill to an organization of three separate blocks rising from a two story high plinth which aligns with the street. The corner block aligns with both streets, however, the two blocks along C. d'en Roig set back from the street so that sunlight penetrates more to the interior of the block. Because these blocks are partially freestanding, this stra-

tegy admits light to windows at the sides of these elements, a move that also provides more privacy and more rooms away from the street. The plinth is used for commercial space and provides a partial portico along the street that creates entrances to the apartment lobbies while extending the commercial activity along C. del Carme and down C. d'en Roig. The corner is articulated with a canted cantilevered bay window and a recessed shop entry at grade, following a long-standing typology of special corner emphasis in Barcelona. The three blocks have regular structural bays, but some of the exterior surfaces are inflected, a response to site nuances that imparts the sense of a vernacular juxtaposition of independent elements while providing some relief to the customary regularity of most social housing. The exterior walls are stucco, with structure rendered as freestanding elements at entrances and shop interiors. Full-height openings with hinged wooden shutters

and integral balustrades are used for most openings so that they also function as balconies. The horizontal striations of the stucco joints and the disposition of the windows is a commentary on the existing pattern of vernacular materials, walls, and punched openings. While each block has a separate stair and elevator, the two northern buildings share a common lobby along the street. The southern block has a separate lobby at the southern end of the complex where there is also an entrance for the garage. The small, two bedroom flats are well planned and quite typical of public housing in Barcelona. Unfortunately, the exposed roof of the commercial plinth is not used as terrace or garden for the residents and there is little effort to plan the individual blocks--either in plan or section--to capitalize on the presence of an outdoor space removed from the street.

Paris - France

1995

Philippe Madec

Duée/Pixérécourt Low Cost Housing

Adresse: 11/13/15 rue de la Duée/22 rue Pixérécourt/3,
passage de la Duée, 20ème
Typologie: Block Appartements, patio
N° d'étages: 5 - 6
Type construction: RC frame
Finition: béton - brique - ceramique - metal - bois
Menuiserie: Metallique - bois
Programme: Logements sociaux

Nombre de logements: 21
Surface: 00 m²



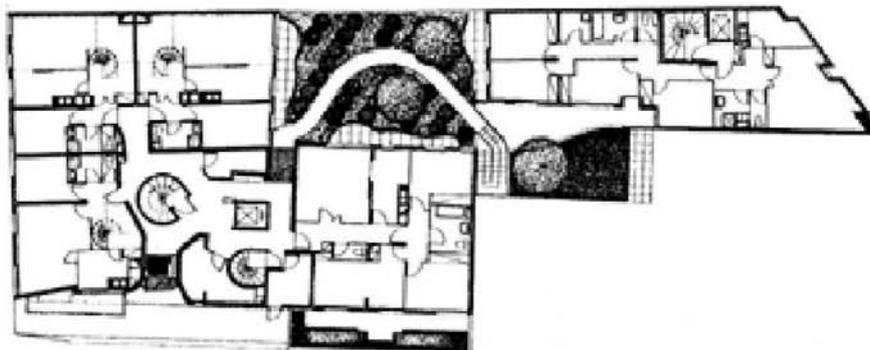
plan masse



This very complex site is located in a run-down working class district of the 20th arrondissement, in a diverse setting of disorderly streets and buildings from different periods. The lack of a coherent urban landscape is matched by an almost impossible site condition; a deep narrow sloping hillside with frontage on two streets, and abutting a chaotic assortment of buildings of different styles, heights, and alignments. The upper part of the site, along rue de la Duée is wider and bordered by a narrow passage on east side that is not perpendicular to rue de la Duée, several low buildings with different setbacks on the west, and faces a new public park across the street. The lower end of the site along rue Pixérécourt—a drop of about 10 meters—is a narrow infill condition between a newer 4-story

apartment building and an older 5-story block of flats. This row of buildings facing Pixérécourt occurs at widening in the street formed by the intersection of two other diagonal streets. The program called for 21 dwellings of different sizes and types as well as on site parking for 25 cars.

Madec's site strategy is been to design two different 5-story buildings that are separate but partially interlock around two small landscaped gardens on the interior of the block. The upper building is ell-shaped in plan and has a wide planer surface facing south to rue de la Duée and the park across the street. The other leg of the ell extends along the passage on the east side of the site where the entrance lobby is located. The adjacent building sets back from the street and is only one story tall, so that the new



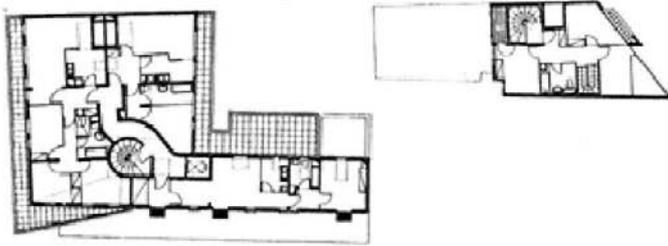
plan étage type

Paris - France

Philippe Madec

Duée/Pixérécourt Low Cost Housing

• Techniques et Architecture, May, 1996, pp. 34-38.



façade facing rue de la Duée appears to be a freestanding rectangular block. The organization, materials, and details used in this façade dictate the stylistic parameters for this building as well as the surfaces of both buildings where they face the interior courts. The exposed edges of the concrete slabs form a dominant horizontal order in the bottom 4 floors. Here, floor to ceiling framed glass panels alternate with panels of horizontal red cedar siding and a regular grid of red cedar sliding louvers. This combination of exposed concrete, black framed glass windows, and the warm quality of the red cedar results in a dense, layered composition of mixed constructivist/vernacular origins. The building steps back above the 4th floor creating a terrace. This level is finished in vertical metal panels and windows and the dwellings have higher, shaped ceilings. The east wall along the passage is concrete except for a two-story high oblique zone of cedar blinds that is cantilevered outward creating a covered entrance area to the building. The setback at the 5th floor continues along this side. Mural figures by the artist Jérôme Mesnager create movement from rue Duée along the alley to the entrance.

Reflecting the complex site plan and section, the two buildings contain a surprising range of dwelling types and sizes, including both flats and maisonettes. Although the rue de la Duée façade suggests four floors of flats, the bottom four floors on rue de la Duée façade are actually maisonettes that share a common circulation core with four floors of flats in the leg of the building that extends

along passage de la Duée. The stepped back upper part of this building, is a zone of flats that have higher pitched or vaulted ceilings, and skylights in addition to small terraces and balconies along the east side. In the Pixérécourt building there are two large four bedroom flats on the two lower floors, changing to a two bedroom flat in the middle floor and the maisonette mentioned earlier on the top two floors.

The deep infill site has become an important housing typology in Paris in recent years. With the change in housing policies from a strategy of removal in the 1960's to one of gradual renovation in the last couple of decades, the extremely deep blocks of Paris have been a virtual quarry of challenging sites for creative architects. Programs like the Ministry of Post and Telecommunications program, for example, that combine new neighborhood post offices with housing for postal

trainees (see Frédéric Borel, Oberkampf Postal Workers' Housing) are important models about building in ameliorative fashion on small infill sites. The scale of these projects does not compare with the huge social housing projects of previous years and the spirit of Existenzminimum that dominated earlier public housing programs has given way to a more flexible and tolerant attitude about the individual dwelling. Buildings with odd-shaped plans, apartments with unconventional rooms and windows, two story-high spaces, vaulted ceilings, skylights, and other similar unconventional spatial features were simply not part of the Existenzminimum lexicon of housing priorities. The atelier concept of the individual dwelling, however, still has an important tradition as a dwelling type in Paris, and projects such as this help provide a broader inventory of housing that, like the atelier type, is different and spatially interesting.



Paris - France

1996

Roger Diener & Diener Roquette

Adresse: 117-119, rue de la Roquette, 11ème
Typologie: Block Appartements, patio

N° d'étages: 5 - 7
Type construction: RC frame
Finition: pierre - aluminium
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs - commerce

Nombre de logements: 37
Surface: 00 m²

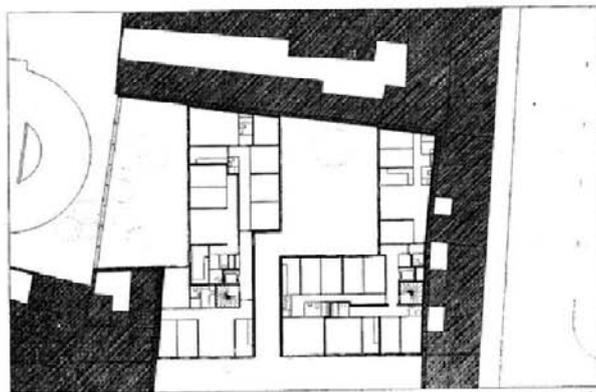


plan masse



Roger Diener is well known for his buildings and urban proposals for geometric minimalist housing and mixed development blocks in Basel, Berlin, Amsterdam, and, most recently, this project in the 11th arrondissement in Paris. This site, along the processional street that connected the Bastille area to the old Père Lachaise cemetery a few steps away across Boulevard Ménémon-tant, continues the firm's emphasis on strategies for additive building within the context of existing streets, blocks, and buildings. The building elements used in this rebuilding process are typically extremely simple, prismatic blocks, logically and volumetrically organized to complement existing site conditions and clearly organized in plan, section, and elevation. Rue de la Roquette was

the street of funeral processions to Père Lachaise Cemetery. It was also the site of guillotining that took place fairly regularly in front of the two 19th century prisons that stood further down the street, one for men, La Grande-Roquette, removed in 1900, and the other for women, La Petite-Roquette, not torn down until the 1970's. Built in a district of dilapidated buildings, the Diener project is one of the first new buildings to be built at the north end of the street that aligns with the widths required under the new zoning. The site is organized around two, separated ell-shaped blocks that face the street and define two courtyards, one paved and one landscaped, on the interior of the block. A row of shops face the street, however, ground floor apartments and the building lobbies open to the inner courtyards.



plan étage type



Paris - France

Roger Diener & Diener Roquette

- L'Architecture d'aujourd'hui, June, 1997, pp. 35
- AV Monographs, No. 65, V-VI, 1997.

The elementarist/modernist pallet is an obvious quality of the street façade. In each building, four floors of flats, positioned on top of a raised plinth that will be used for shops, define a cornice that more-or-less continues the height of the block. Above this, both buildings set back and extend up one more floor on the eastern side and two more floors on the west, a total of six and seven floors. These blocks are not part of Haussmann's Paris and this variation in heights reflects the random nature of the existing block massing. The two buildings are separated by a narrow coulisse leading through a tall narrow open passage to the courtyard. The subtle differences in building height is also a quality of the façades where windows are of equal widths and are equally spaced, but change from windows to doors with built-in balustrades on the west block and the courtyard façade of the eastern block. The building

massing and windows mirror the street façade where the limited selection of window sizes is again applied. The building lobbies are entered from a very serene, minimalist courtyard and ground floor flats have windows directly on this court. The west block also has a small garden on the west side of the building where the ground floor flats have more privacy. The building plans and flats are extremely well organized and redundant. The corner position of vertical circulation defines several different-sized dwellings on each floor that have windows facing either the street or the courtyards. The equal size and spacing of the windows is an indication of the very systematic plan. The limestone facades are devoid of any extraneous detail without except for the repetitive windows, sills and balustrades, and the schematic articulation of the structural frame in the plinth of shops along the street.

The stripped-down, geometric quality of Diener designs is quite uncommon in most recent examples of social housing in Paris where a much more layered, effusive--and probably expensive--style prevails. In the huge ZAC projects where several blocks are being redeveloped at a time involving thousands of new apartments, shopping, schools and infrastructure, a completely new architecture reflecting current trends and construction technology might be appropriate. But for many other areas that are redeveloped parcel by parcel, building by building, a more stylistically neutral, contextual, kind of architecture that responds to basic zoning, existing building massing and detail, and the definition of private courtyards, is probably a much less intrusive process of more enduring value.



Paris - France

1996

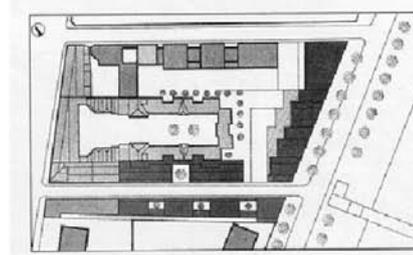
Yves Lion

Quai de Seine

Adresse: 47, Quai de Seine/7 Passage de Flandre, 19^{ème}
Typologie: Block Appartements, galerie d'accès

N° d'étages: 4 - 8
Type construction: RC frame
Finition: plâtre - pierre - metal - verre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - commerce

Nombre de logements: 130
Surface: 00 m²



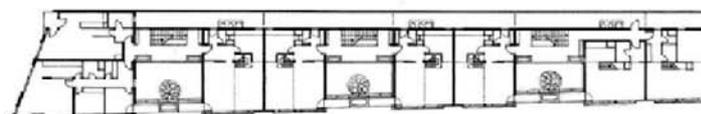
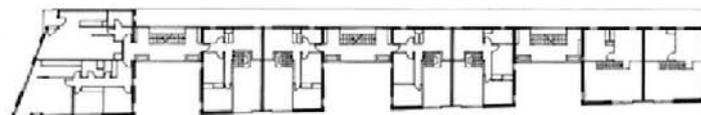
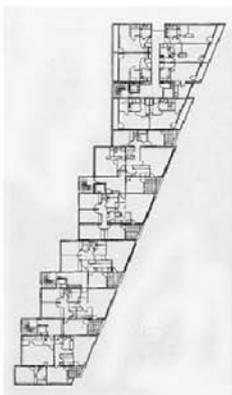
plan masse



This group of apartments, the main block of which faces east along the Quai de Seine, is the first of a group of similar waterfront residential projects designed by Lion in the 1990's. Within the overall context of the architect's work, these three form a definite sub-set: Quai de Seine, 1991 in the La Villette quarter, Les Hautes-Bruyères at Villejuif on the southern periphery of Paris built in 1995, and the blocks built along the Seine at l'îlot Schömberg, the site of old army barracks a short distance upstream from Pont de Sully, built in 1998. All three of these sites are seen principally from the water and all have a similar organization of articulated vertical blocks that alternate with zones of recessed balconies forming a linear, concatenated, solid and void structure. Although varied in their height, and program (Les Hautes-Bruyères has neither roof terraces nor ground floor

commercial space), the use of an alternating banded horizontal organization of strip windows, corner windows, balconies, developed ends, cornices and bases, metal railings, and the flush detailing of the windows and blinds are all similar features of these buildings. Les Hautes-Bruyères is a free-standing building in a park-like setting along a restored canal, while Quai de Seine and îlot Schömberg are built in the context of existing perimeter blocks. In each complex, the superimposed order of vertical towers and layered horizontal zones is derived from the point-access type of plan organization and dwelling layout.

The Quai de Seine site includes 3 different parcels and three different program elements. The dominant site along the Bassin de Villette contains a center for the elderly and two and four bedroom dwellings most of which have living spaces facing the Bassin. The other two parcels



plan étage type

Paris - France

Yves Lion

Quai de Seine



- Hoyet, Jean-Michel, *L'Architecture Contemporaine à Paris*, Editions Techniques & Architecture Groupe Altada, Paris, 1996, p. 135.
- Lion, Yves, Yves Lion, Gili, S.A., Barcelona, 1992, pp. 33-41.
- Lion Yves, Yves Lion, études, réalisations, projects, 1974-1985, Electra Moniteur, Milan/Paris, 1985, pp. 100.103.

are along Passage de Flandres, a narrow street perpendicular to Quai de Seine. These long, narrow sites that back up to existing buildings on the interior of the blocks, are organized in repetitive fashion along the street and include several small courtyards. The southern block, the end of which faces the Basin, contains artist's studios while the two blocks on the opposite side of the street contain one and two bedroom flats. These three parcels have thus been inserted into a complex site situation that required the completion of two different blocks with existing buildings of different styles and heights, the resolution of difficult corners, and the maintenance of a principal façade along the canal.

The waterfront façade is essentially organized as a series of connected point-access towers that transform in height and materials from one end to the other. This concatenated row of repeating elements is set on a continuous horizontal base of shops and steps from 8 floors at the north end to 5 floors at the south end, a response to the different heights of existing buildings to either side. This forms a continuous white plinth, two stories in height that is slightly recessed from the stone facing of the tower elements. This plinth is detailed with a lower zone of black ceramic tile, a zone of shop windows above which is a continuous marquee and the continuous horizontal zone of windows of the first floor of flats. The different heights are expressed in different materials that form interpenetrating layers on the façade. The northern corner block, 8 floors tall, is expressed

as a glass curtain wall organized with alternating horizontal bands of clear and colored glass spandrels and an articulated base and cornice. This block is used for the elderly center and contains small flats, each with a glazed solarium. The divisions of the façade reflect the plan organization. The 8th story height extends south in an organization of four narrow 8 story towers are faced in gray stone and separated by narrow balconies with open balustrades that reveal a deep slot between towers. The deep cornice of the glass building is continued in the stone towers, now expressed as a blank panel with a single, offset, square opening. The southern end of the ensemble, which begins south of the intersection with Passage de Flandres, is 5 stories high, a reference to the lower buildings along this narrow street. This 5-story height is continued on the north side of the side street and then steps up to a 7-story height that is continued as an interpenetrating plane of white plaster in the recessed zone between stone towers.

The lower buildings along both sides of Passage de Flandres are five stories high. The artists' studios on the south side of the street are organized into four blocks of paired studio maisonettes that alternate with the small courtyards that open to the street. A zone of commercial space along the street is defined by the shop windows and a narrow balcony connecting the two flanking buildings across the space of the courtyard defining an entrance gate while continuing the street surface past the space of court.

The resulting solid/void massing and layering is similar to the Quai de Seine façade, however now the relationship between the void of the courtyard and the two story high spaces of the apartments results in a much more complex and interesting spatial ensemble. The buildings are entered through the courtyards to stairs and circulation galleries along the backside of the building. The upper studios share deeper terrace spaces between dwellings overlooking the courtyards below. The two story high interiors of the studios are clearly expressed on the facades with blank zones of gray panels alternating with glazed panels at the ends of the double-height studio spaces and use a similar pallet of materials; black ceramic tile, white windows and glazed panels, white plaster walls, open balustrades and dark gray facing panels. On the opposite side of the street there are two identical narrow slabs that face the street and have access from open galleries that back up to existing buildings on the interior of the block. A small courtyard between slabs provides access to the rear gallery that has light wells for natural lighting. These blocks have commercial space along the sidewalk, continuous horizontal strip windows, corner balconies and step back at the top floor where there is a covered terrace. Less developed architecturally, these two blocks each contain three small one and two bedroom dwellings per floor and effectively continue the alignment and general appearance of the other modest buildings along this street.

Paris - France

1997

LLTR Architectes (Le Boursicot, Loth, Testas, Robert)
Bercy-Gabriel Apartments

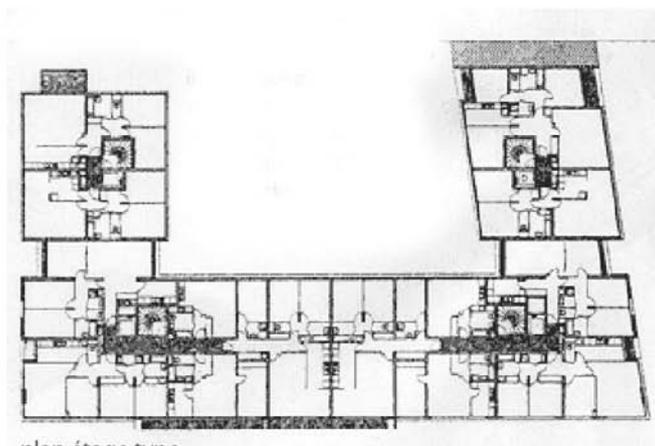
Adresse: 14-16 Rue l'Aubrac/51 rue Francois Truffanu, 2ème
Typologie: Block Appartements,

N° d'étages: 7 - 9
Type construction: RC frame
Finition: plâtre - pierre - béton - metal - verre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - commerce

Nombre de logements: 187
Surface: 00 m²



The line of apartments facing the new Parc Bercy created a zone of rectangular residential courtyards along the north edge of the park. These buildings are based on a concept by the coordinating architect Jean-Pierre Buffi to develop a building type that combined notions of typical perimeter blocks with a type of semi-attached pavilion that was designed as a response to the enormous visual amenity that the new park offered. The Bercy blocks, each designed by a different architect, were highly publicized. The Bercy site, however, also included a parallel row of less-well-known perimeter blocks behind the park frontage in a zone between street and the tracks and warehouses serving Gare d'Lyon. Part of the idea behind the conversion of the

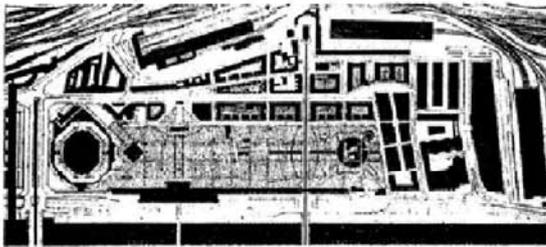


plan étage type

Paris - France

LLTR Architectes (Le Boursicot, Loth, Testas, Robert) Bercy-Gabriel Apartments

• Techniques et Architecture, Feb, 1999, p. 80.



plan masse bercy

Bercy wine storage yards and buildings, in addition to the creation of a major new public park, was to transform the eastern end of the site into a new commercial center, Bercy Expo, and to provide a new métro station, at this end of the park. The row of blocks behind the original Bercy frontage were planned to provide a pedestrian connection to Bercy Expo, involving the renovation of part of the old wine warehouse district, an oblique double row of brick sheds at the east end of the park. While Buffi's open courtyard system made sense for the sites facing the park, a typology of closed blocks was more suitable for the blocks connecting past the wine warehouses to Bercy Expo. Here, the blocks have been rotated 180 degrees so that the interior

courtyards face north and the buildings form a continuous façade on the south that effectively defines a pedestrian walk and a new plaza at the north end of the street of remodeled wine sheds.

The 9-story, u-shaped building, that occupies the block immediately north of the most eastern of the original Bercy blocks, is formed by three discreet elements; a long east-west slab and two tower elements that attach to the ends forming a rectangular courtyard that opens to the north and the sloping site below the railroad tracks. The building elements are articulated where they connect and each has individual circulation cores. Similar to the original blocks facing Parc Bercy, the interior of these

blocks are designed as a landscaped courtyards with parking below. The east-west slab defines a long paved walkway past a school and playground that connects to a public plaza at the ends of the zone of old warehouses. Like the earlier buildings, the ground floor space on the public side is commercial, there is a zone of two-story high penthouses and terraces on the top, and a similar continuous zone of strip windows, white concrete and gray sandstone panels, black blinds, and cantilevered balconies results in a layered horizontal appearance on the street façade. The courtyard blocks are only 7-stories tall but have similar, but less elaborate, facades with alternating bands of glass and either white or gray panels.



Paris - France

1997

Jacques Audren & Robert Schlumberger
Cour St. Emilion Apartments

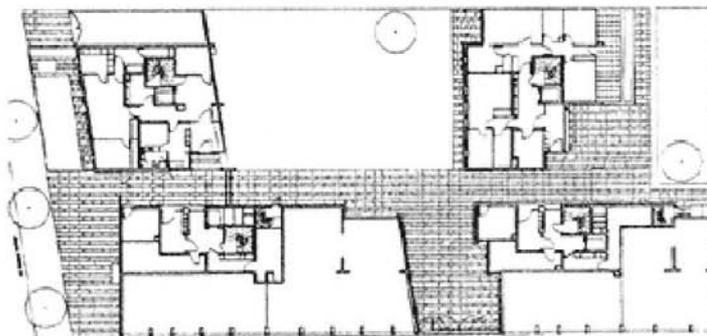
Adresse: Rue Gabriel Lamé/Rue Francois Truffaut, 12ème
Typologie: Block Appartements

N° d'étages: 8
Type construction: RD frame
Finition: pierre - metal - verre - panneaux bois
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - commerce

Nombre de logements: 73
Surface: 00 m²



In addition to the quite famous new row of apartments built along the northern edge of Parc Bercy, other residential buildings were part of the overall planning of ZAC Bercy. The conversion of the zone of entrepôts, at the eastern end of the park into a renovated district of old warehouses and other commercial spaces including a new commercial center, Bercy Expo and the new Cour Saint-Emilion Métro Station were also part of the plan. This included the eastern extension of the system of perimeter block housing along the north edge of the complex. This extension eastward helps define a continuous pedestrian path between the park and Bercy Expo. These block are reversed from the typical block facing the park and, instead, are organized with

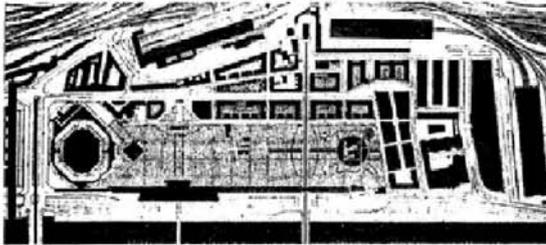


plan étage type

Paris - France

Jacques Audren & Robert Schlumberger Cour St. Emilion Apartments

• Techniques et Architecture, Dec, 1997, p. 83.



plan masse bercy

commercial edges along the new public spaces at the north edge of the rows of warehouses and have small interior courtyards that open to the north.

This building is a version of a perimeter block typology, however, the plan organization suggests four separate buildings with articulated junctions and cantilevered balconies that imply a continuous building form. Each of the four elements has a vertical stair and elevator core. The long, linear, south façade defines a long public plaza and marks the end of the Cours St. Emilion, the line of old warehouses now converted into a pedestrian street lined with shops and restaurants. The entrance to the apartment complex is a spatial extension of the axis

of the Cours. The shops at the bottom of the new building help extend the zone of commercial activity into the new plaza. The 8-story block is organized with 7 floors of dwellings above the commercial base and steps back at the top floor creating a zone of penthouse apartments and terraces. The south façade is organized in horizontal zones of continuous cantilevered balconies and flush walls with floor-to-ceiling glass doors and windows with full-height rolling shutters that alternate with gray stone panels. The use of glass balustrades and the extension of some of the balconies across the gap between blocks implies that the façade extends across the entrance to the interior court and results in a very sheer, layered, horizontally organized

façade rising from the double-height zone of casement windows of the shops. The cantilevered balconies also function as shading devices on this south-facing façade. The courtyard blocks in the are white and planer with white marble surfaces, strip windows, and recessed panels, balconies and balustrades that are finished in wood. These crisp, white blocks contrast sharply with the gray stone of the southern buildings and reinforce the concept of articulated blocks as opposed to a continuous perimeter block type. The courtyard is minimally landscaped and covers basement parking. The recessed connections between building elements create secondary entrances and a paved walkway through the middle of the block.



Paris - France

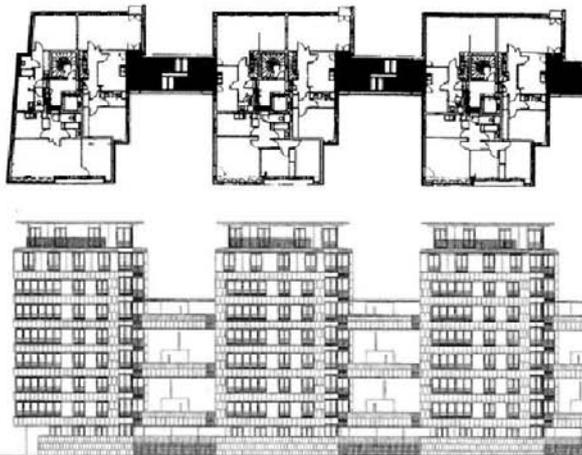
1998

Yves Lion & Alan Levitt

Ilôt Schöenberg

Adresse: Quai Henri IV/rue Agrippa de Aubignel/
Boulevard Morland, 4ème
Typologie: Block Appartements
N° d'étages: 8
Type construction: RC frame
Finition: pierre
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - parking

Nombre de logements: 195
Surface: 00 m²



plan type et facade



plan localisation

This group of buildings occupies a very prominent site along Quai Henri IV, on the right bank of the Seine near the eastern tip of Ile St. Louis. Several of the 19th century barracks that housed a regiment of the National Guard still remained on the site at this critical intersection at the edge of the Marais, near the Porte de l'Arsenal and the Canal Saint Martin that connects to Ledoux's Rotonda and Parc Villette, and close to other important landmarks, Place des Vosages, Place de la Bastille, and the new Opera House. Yves Lion won a 1998 competition to redevelop the site and provide 128 new dwellings for the Republican Guard including some sports and office facilities. The brief was later revised to add 67 more dwellings that were to be put in three of



plan masse

Paris - France

Yves Lion & Alan Levitt

Ilôt Schömberg



• Techniques et Architecture, Dec, 1997, p. 83.

the remodeled barracks. Several other buildings on the site were removed including one of the 4 remaining barracks that was damaged beyond repair.

Lion's site strategy was to place a row of three 8-story connected towers along Quai Henri IV and add a long 6 story slab in a north/south alignment along the eastern edge of the site. This included a new access road and pedestrian walk connecting Boulevard Morland with the waterfront. This slab actually consists of a long element and a separate detached 8-story tower at the north end that make frontage along Boulevard Morland. These 5 buildings created a new boundary on the southern and eastern sides of the site, enclosing the group of remaining barracks and defining several interior garden areas and walkways connecting the buildings together. The barracks are beautiful examples of 19th century cast iron structures. These three buildings form a quadrangular group that was originally defined by a 4th building but now opens to the tree-lined street along the west side of the site. The original 3-story barracks were converted to apartments by substantially reorganizing the interiors including the addition of two floors to the tops of two of them.

The 3 towers are expressed as a row of identical limestone blocks that are spaced to form small garden areas between towers and are connected along the back edge by a continuous veranda. The towers have very similar point-access plans that step back along

one edge of these garden areas so that rooms along the sides enjoy a modest space that is separate from the street. Windows are organized as horizontal strip types detailed to emphasize the corners and the step-back. A very sophisticated combination of sliding, folding, roller blinds, and awnings protects the glass. The overhanging eaves mime the roofs on the existing barracks. The verandas that occur on alternating levels provide an ample outdoor terrace with an unobstructed view of the Seine between towers as well as views to the landscaped areas on the interior of the site. The flush limestone details of the street surfaces give way to wood finishes in the veranda areas. A pedestrian walk connects the building lobbies at grade and the entrances to small ground floor apartments which are set back a few feet from the street façade. The upper floors combine studios and 1, 2, & 3 bedroom flats and maisonettes and the penthouse maisonettes are larger dwellings with terraces front and rear. While the stone wall and mature trees along the sidewalk provide some protection as a landscaped edge, there is an obvious problem with noise and security for rooms facing the street and especially for the ground floor apartments.

The last element in the row of thin towers along the street is actually the end of the 8-story north/south slab that terraces to a 6-story height along the east side. Detailed as an extension of the street façade, the end is stepped to make height alignment with existing buildings along Quai Henry IV. A private

access drive and parallel parking zone extends through the site from the river to the Boulevard Morland. An open loggia toward the north end of the N/S slab connects to the internal walk of the street towers and a small plaza area separates the slab from the north tower, providing access from the access road to the group of remodeled barracks. The tower on Morland uses a slightly less robust version of the riverfront façade: stepped back at the ground floor, overhanging eaves, flush limestone walls with strip and corner windows with blinds.

Schömberg is a good example of the design of a combination of new building design and the adaptive reuse of historic monuments on a prominent infill site. While it does not compare in size with other major city projects such as Bercy and Rive Gauche, and is the product of housing designed for a particular group (the Republican Guards) and as such is hard to compare with the program of social housing in the ZAC sites, Schömberg is an important addition to the evolving urban concern in Paris with building in an ameliorative manner in the historic districts of the city. Schömberg combines historic and modern building precedents as well as garden and court typologies. The concept of combining slab and tower results in the spatial qualities of the urban villa type but in a taller denser configuration. Quai Henri IV is not a typical Paris boulevard, however, and while the river view is a highly desirable amenity, heavy traffic noise will always be a problem.

Paris - France

2000

Jacques Herzog & Pierre de Meuron Rue des Suisses

Adresse: 17/19 Rue des Suisses/Rue Jonquoy, 14ème
Typologie: Block Appartements, patio

N° d'étages: 3 - 7
Type construction: RC frame
Finition: metal - béton - verre - bois
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs - parking

Nombre de logements: 57
Surface: 00 m²



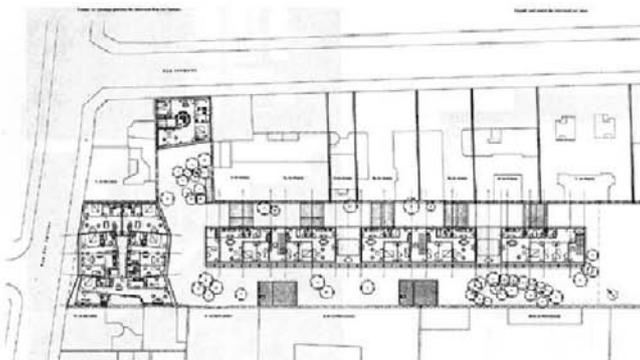
plan masse



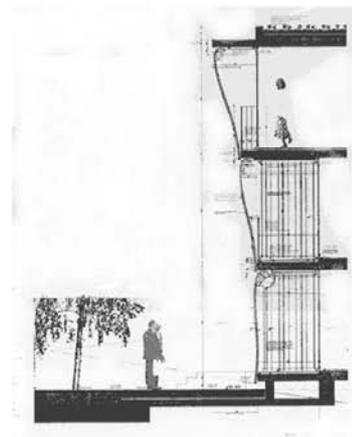
This is the first project in Paris by the Herzog/De Meuron team on an unusual site in the 14th Arrondissement not far from Gare Montparnasse. The result of a 1966 competition sponsored by the Paris public housing agency Régie Immobilière de la Paris (RVIP), the project is built on three interconnected parcels that include infill sites on two sides of a long perimeter block that face a long narrow plot on the interior of the block. The infill buildings are built to the neighborhood height of 7 floors, while the interior slab is only 3 floors in height. Entry to the interior of the block is made beneath the infill buildings. In addition to the 4 story difference in building height, the long narrow block designed

as a free-standing element in a long narrow garden and is protected with curving rolling wooden blinds that are in sharp contrast to the folding metal blinds that cover the facades of the street buildings. The three buildings contain about 60 flats and basement parking for about 50 cars is provided beneath the infill block on Rue des Suisses and extends into the courtyard beneath the interior building.

The street buildings are both point-access types. The larger block facing Rue des Suisses has several apartments per floor that face either the street or garden while the narrow block on Rue Jonquoy has only one flat per floor with frontage on both the street and the garden. The



plan RDC



détail coupe

Paris - France

Jacques Herzog & Pierre de Meuron Rue des Suisses



- Monteur architecture AMC, June-July, 2001, pp. 50-61.
- Aventures Architecturales à Paris, Editions du Pavillon de l'Arsenal, Picard, Paris, 2000, pp. 174-79.
- Jackson, Sarah, «Elevating The Everyday», Architectural Review, July 2002, pp. 42-49.

long narrow building is also a point access type that has several entrances that serve three floors of larger flats. The ground floor apartments are organized with the living spaces and bedrooms facing a narrow porch along the public walkway through the garden and a narrow one story high zone that contains the baths and kitchens that attaches to the back side of the long block forming small interior courtyards. Baths, kitchens and circulation are organized along the rear side of the flats on the two upper floors. Living spaces here also open to the continuous balconies that face southwest. Two, two story high gable-roofed small houses are placed in the garden opposite the two main entrances to the long block. These tiny cottages also form several court areas in the garden and help maintain a residential scale to the arrangement on the interior of the block. Vines grow on a system of metal wires fastened to the blank walls of the garden buildings, help to create an overgrown, unkempt ambience to the landscape areas. The garden block sets up slightly from the ground on an articulated base suggesting a porch or veranda along the walkway through the garden area. The roll-down blinds completely cover the porch areas. While there is an obvious loss of privacy along the ground floor apartments, the slightly raised setback condition gives some separation from the garden walkway. The upper balconies cantilever out slightly forming an undulating, slightly overhanging quality that further softens the garden spaces.

The 7 story, point-access block facing Rue des Suisses has undulating facades facing both the street and the interior garden. The curved facade, which is seen at the end of a long narrow street, makes an easy transition between existing buildings to either side but also emphasizes the system of metal shutters covering windows between floor slabs creating a continuous screened surface. This system of folding grilles is used on both street and garden facades and is the latest version of similar shuttering systems that have become a leitmotif of Herzog & De Meuron designs. When closed the shutters form a continuous grille between the narrow horizontal bands of the edge of the floor slabs that are the same color as the shutters. The full-height, hinged shutters are made of perforated, corrugated aluminum panels that are supported by steel rods connecting between floor slabs. These panels, 412 mm in width (16») and 28 mm (1 1/8») thick, are secured to the vertical support rods with stainless steel hinges and are finished in a durable dark gray, polyester powder coating. A narrow balcony and steel balustrade separate the plane of shutters from the floor to ceiling glass wall of the apartment interiors. In the fully open position, the shutters hinge into groups of 6 panels that extend forward of the surface of the façade creating discontinuous vertical bands that give a highly structural albeit chaotic appearance to the façade and help create the impression of several compressed layers of materials: shutter, balustrade, the space of the balcony and the dark aluminum glass wall of the

dwelling. This shutter system extends from the sidewalk through the 6th floor. The top floor sets back from the plane of the façade and has roll-down metal blinds of the same color that reinforce the reading of a distinct attic condition.

Rue des Suisses is a good example of recent projects in Paris that focus on rebuilding the typical perimeter blocks in different areas of the city while upgrading the quality of the housing stock. While the apartments themselves are typical small flats, the strategy to put the smaller flats in the infill buildings and organize the family dwellings together in the garden area and the high detail finish of all three buildings attest to the high standards of RVIP. The sophisticated shuttering system used here combines the traditional use of the window shutter as a means to control light and provide security and privacy with the need to adapt the modernist concept of the glass curtain wall with the contextual need to fit comfortably with an existing stock of different buildings. While the street facades undulate in plan and have a vertical, folding shutter system made of metal, the garden block has a south façade that undulates in section and has a horizontal, roll-down wooden shutter system. Finally, a sheer glass façade might have been a harsh intrusion, but the undulating, layered, shuttered system maintains the wall surface while creating a changing pattern of distinct, repetitive openings like the neighboring buildings.

Paris - France

2000

Michel Kagan

rue l'Amiral Mouchez PLI Housing

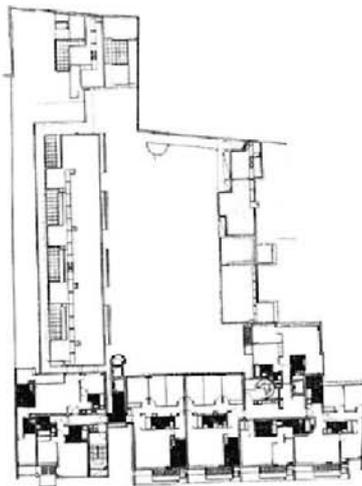
Adresse: 62-68, rue de l'Amiral Mouchez/rue Gazan, 14ème
Typologie: Block Appartements, patio
N° d'étages: 9 - 10
Type construction: RC frame
Finition: béton préfabriqué - blocs verre - panneaux
verre et métalliques
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements collectifs - parking

Nombre de logements: 70
Surface: 00 m²



plan masse

Michel Kagan is perhaps best known for a series of free-standing pure Modernist designs that include a technical and administrative complex in the périphérique zone of the 13th arrondissement, built in 1991, a group of artists' studios that were built as part of the Parc Citroën plan in 1992, and a new university building at the new town of Cergy-Pontoise, built in 1998. The Parc Citroën housing, a modest complex of 42 dwellings included 38 artists' ateliers and occupies a very prominent site at the corner of the black garden at the end of the diagonal path that stretches across the park. These buildings are stylistically similar and share an architectural pallet of white materials, a developed dialog



plan RDC



Paris - France

Michel Kagan

rue l'Amiral Mouchez PLI Housing



• Moniteur-architecture AMC, Dec-Jan, 2000-2001, pp. 174-77.

between articulated frame and planar concepts, the use of extended planar elements to define space and delineate circulation and the use of a set of modernist materials and details including horizontal strip windows, glass block, metal pipe railings, the use of brise-soleil, pilotis, toit jardins and other terrace elements, an interior spatial programme of prismatic cubic volumes, and the application of the concept of spatial transparency in the overall organization.

This very compact and dense complex of 70 dwellings continues the stylistic approach of the architect, but is here applied not to the design of a freestanding building, but to the design of a difficult infill site in an existing Paris block. Just off the east slope of Parc Montsouris, rue de l'Amiral Mouchez falls within the limits of the Haussmann zoning, but the site is dominated by 1960's and 70's buildings to each side that vary in height from 9 to 10 floors. The site is further complicated by the railroad tracks that pass through the block in an excavated ditch along the south edge. The idea of the site concept is to complete the surface of the perimeter block long the street, matching existing heights and horizontal spatial zones and create an landscaped courtyard on the interior of the block. Two lower wings define a narrow landscaped courtyard that extends into the block engaging retaining walls and backs of existing buildings that face rue Gazan above. The two side wings on the courtyard are detailed to achieve a degree of closure at the hillside end one of the extended

wings ends in a 4-story terraced building that steps up to the level of rue Gazan at an elevation about 20' above the level of the court.

The street façade consists of two distinct elements that clearly reflect the zoning of the street heights and the plan organization. The first element, a 9-story slab, continues the height of the building to the north to an alignment with the south edge of the court. The second element aligns with the 10-story height of the existing building to the south. This block which continues the zone of the lower block along the courtyard, is detailed as a narrow tower that is separated from the lower 9-story slab by a deep slot that is the same width as the elevator core. The horizontal zoning of the buildings to either side are continued in the new facades as a very developed brise-soleil that is treated as an applied element to the glass curtain wall between the 2 and 7th floors. While the tower element does not have a brise-soleil, the face of the curtain wall is continued in the street façade of the tower and there is a zone of cantilevered balconies whose balustrades align with the brise-soleil. The top floors vary in height from 2 to 3 levels. These levels step back from the face of the street facade creating a zone of terraces and maisonettes with rounded stairs and taller spaces with large windows that corresponds to the roof zone of the typical Haussmann block. This zone at the top of both buildings is designed so that the different levels and zones in both overlap and interpenetrate resulting in a very layered and dynamic

effect. A two story high zone at the bottom of the building responds to a zone of shops and building entrances along the street. The structure is expressed as a pilotis in this zone. Solid panels enclose part of the entrance lobby, but the courtyard beyond can be seen through the freestanding columns. An open gallery along the courtyard side of the building services a mezzanine level in the two-story high space of the pilotis. The brise-soleil is designed as a partially open structure so that parts of the horizontal surface of the slab are either cut away leaving an articulated frame or have horizontal panels of glass block in the surface of the terraces. This allows light to penetrate down through the brise-soleil from the top and results in a very light, transparent, architectonic structure that provides balcony space, but has very little solar value because of its orientation.

The usual critique of Modernist building has focused on its failure to adapt well to typical infill conditions. Although the context here was hardly old Haussmann and included buildings of the 60's and 70's, Mouchez, is a good example of the adaptive potential of the Modernist program, that it could perfectly well be used as the instrument of ameliorative change in a contextual situation.

Paris - France

2000

Emmanuel Saadi,
Oberkampf/Saadi

Adresse: 155 rue Oberkampf, 11ème
Typologie: Block Appartements, patio

N° d'étages: 4 - 7
Type construction: RC frame
Finition: ceramique - tôle aluminium - metal
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs

Nombre de logements: 11
Surface: 00 m²



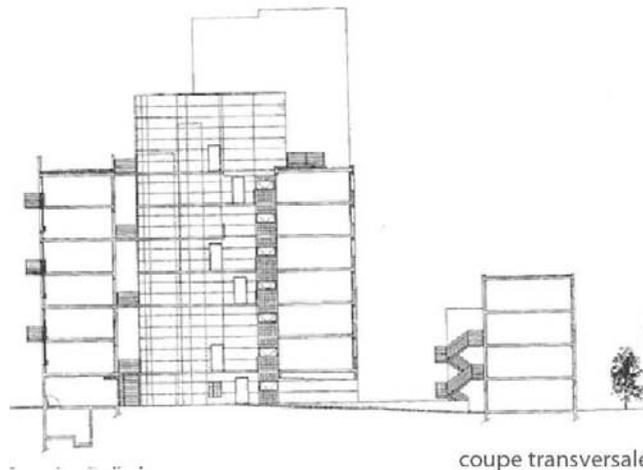
façade



In contrast to the many large new housing sites in Paris that were part of the Zones d'Aménagement Concerté (ZAC) program of the 1990's, projects containing thousands of new apartments, shopping, schools, and public institutions, this modest complex contains only eleven small dwellings. Built on an impossibly small site, 7 meters wide and 50 meters deep, this infill situation between a Haussmann era building that aligns with the street and a 1960's apartment slab that is setback to a different zoning has the added complication of building between misaligned buildings. This narrow, left-over site, while of extreme proportions here, is typical of many building sites along this part of rue Oberkampf

and the Belleville district in general. Other difficult infill projects in this area include Frederick Borel's apartments and Post Office also on rue Oberkampf, other Borel buildings on Boulevard de Belleville and rue de Belleville, another of the Post Office projects by Brenac and Gonzales on rue Etienne-Dolet, Henri Gaudin's famous corner block on rue de Ménilmontant of 1986, and the several sites on the hill along rue des Cascades designed by Antoine Grumbach in the early 1980's.

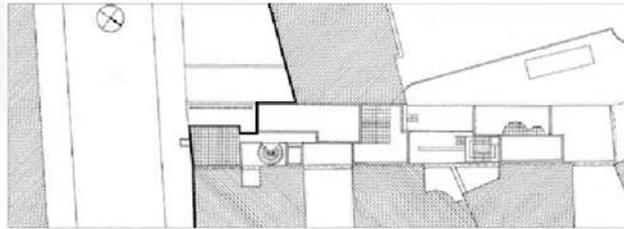
In addition to the extreme proportions and difficult alignment and the extreme difference in height (11 floors on one side, 6 on the other), Saadi also had to



coupe transversale

Paris - France

Emmanuel Saadi,
Oberkampff/Saadi



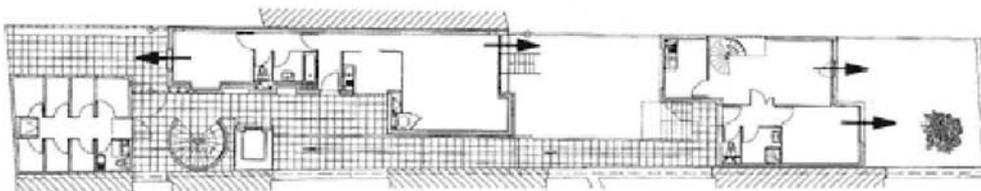
plan masse

• Adventures Architecturales à Paris; L'art dan les regles, Éditions du Pavillon de l'Arsenal, Picard Éditeur, Paris, 2000, pp. 216-22.

make setbacks to provide light access for existing courtyards on the interior of the block. The resulting pattern of solid and void is achieved with three separate buildings that define a small entrance court, a second narrow light well, and a narrow passageway to the rear of the site where there are two small garden courts on either side of a 4 story block of maisonnettes. In the overall massing schema, a seven-story block of small maisonnettes fronts the street and makes alignment with the façade of the existing apartment building. This element, finished in gray ceramic tile, consists of 3 maisonnettes above a common storage area at the street level. Each of these dwellings has a large flush window and projecting balcony facing the street. The side facing the setback space in front of the adjacent 1960's apartment slab is punctuated with glass block squares that light the stair to the second level of this small apartment. A second ell-shaped building that rises to a height of 7 floors has a flat at the ground floor and large masonettes on the upper floors. This building slips past the front block of maisonnettes defining an entrance

gate and a tall narrow light well on the interior of the block. The program required that 50% of the apartments were larger and all of these dwellings are located in this building. A zone of service spaces around the inside edge of the light well are lighted with glass block with the living spaces and bedrooms opening front and rear. A round stair and elevator rise in the narrow court as freestanding elements that connecting to each building with a narrow bridge at every other floor. The ell block is covered with corrugated aluminum panels that form a flush-machined surface that is interrupted by a single window facing the street. Windows at the rear of this element look upon a small, walled rear courtyard garden. The lower building at the rear of the site backs up to this courtyard and is connected by a ramp to the entry courtyard. The two stacked maisonnettes here are organized as two rooms that are slipped slightly in play to make room for the open steel stair that services the upper maisonette. These two apartments have windows to a walled courtyard garden at the rear of the plot.

This very compact ensemble of buildings and courts forms a rich group of tower-like objects along the street that compliments the varied heights and styles of the existing buildings while responding to the zoning setbacks at the front, the side courtyards and the rear. A rich variety of apartments are packed into this complex envelop that includes tiny maisonnettes facing the street, long, narrow flats with small windows at the ends, and a pair of town house-styled small maisonnettes rendered as a separate building in the open space at the rear of the site. The very restrained pallet of materials, aluminum panels, grey ceramic tile, flush aluminum windows with exterior fabric blinds, and bridge, and balcony elements with open balustrades, reinforces the minimalist imagery and elementary geometry of the site planning and individual dwellings.



Plan type

London - UK

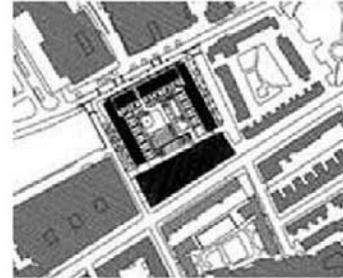
2001

Haworth Tompkins Architects Coin Street

Adresse: Stamford/Coin Street/Cornwell Road/Upper Ground
Typologie: Block Appartements, maisons en bande

N° d'étages: 4 - 5
Type construction: RC frame
Finition: brique - metal - verre - bois - béton
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements collectifs - parking

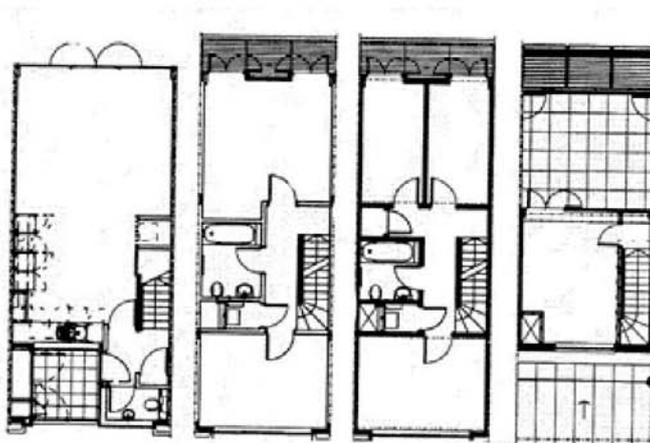
Nombre de logements: 59
Surface: 00 m²



plan masse



This public housing project, located in a very busy district in Southwark, close to the national theaters, the hi-rise IBM headquarters, the London Television Center and Waterloo Station, is a modern interpretation of the traditional Georgian residential square. The site had been a used for a parking lot and was sold to a community group, the Coin Street Community Builders by the Greater London Council just before the GLC was disbanded in the 1980's. A group of young architects were invited to participate in a limited competition for the design of a group of about 40 dwellings including a large parking garage. During the competition, a community social center was added to the program to be built on one side of the square in a 2nd phase of construction. In the final design there are 59 dwellings organized on three sides of the site around a garden built on top of the garage. The community center will be built along the remaining side thus completely enclosing the garden area.

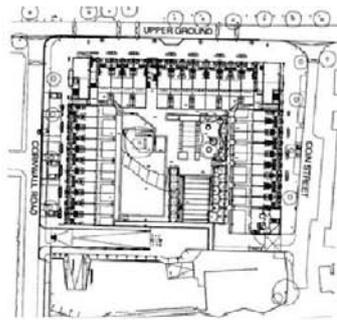


plan logements type

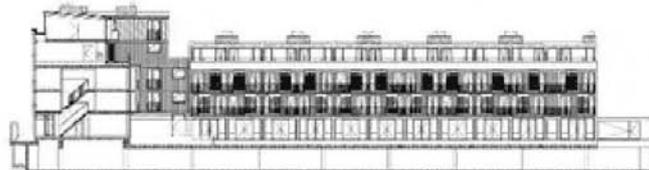
The site concept is striking in its clarity and simplicity. The dwellings form residential walls on three sides of the central garden. On the street side, this perimeter wall is defined as a simple brick wall 3-stories high with recessed openings and a revealed metal cornice. On the interior of the block dwellings open to fenced private gardens and have extensive glazing, balconies, terraces and trellises. Along the east and west sides, the perimeter is made up of 4-story high houses that step back above the 3rd floor forming terraces

London - UK

Haworth Tompkins Architects Coin Street



plan étage type



coupe longitudinale

- Architects' Journal, 31 July/7Aug., 1997, pp. 8-9.
- Hardingham, Samantha, London: A Guide To Recent Architecture, B.T. Batsford, London, 2002, pp. 116-18.
- RIBA Journal, Aug, 1997, pp. 20-21.

on both sides of the building. The north side of the block is 5 floors high and extends to each corner of the block. Along the north side 3-story dwellings correspond to the height of the brick datum, but on top of this is a row of 2-story maisonnettes that open to terraces and have access from an open gallery on the inside of the block at the 3rd floor. Shops replace the 3-story houses at the corners of the block where there are lobbies that access the flats and maisonnettes above. Another entrance midway along the north façade provides an entrance to the garden. The increased building height here responds to the more urban edge along this side of the site and renders the top maisonnettes as south-facing garden villas.

The street facades are rendered as a veneer of brick behind which the recessed windows and upper wall form a secondary layer in metal that seems to pass up behind the brick cladding to the metal and wood clad walls of the top structures. The recessed layer of metal cladding is also expressed at the house entrances along the street and at the building entrances. The materials change on the garden side to continuous floor to ceiling glazing, vertical wood siding, concrete walls, and fences that define each private garden, the wood slated balconies, and cantilevered sunscreens.

Careful detailing along the sidewalk eliminates many of the security and privacy issues that plague ground floor dwellings. The entrance ensemble for

each house consists of a gated recessed vestibule that is clad in metal and glass and provides a protected area off the sidewalk. Entrance here is through the gate, toward a wall with a raised window that allows a view of the entrance, a translucent glass door, and clerestory windows on the two sides of the entry hall and small toilet. There is also a small storage closet to one side for bikes and prams. Other careful detailing of the sidewalk area along the building includes a wide sidewalk, separate structures for the garbage cans, the planting of trees, and clusters of perpendicular parking. In contrast to the closed, dense quality of the street facades, the garden facades are articulated as a zone of balconies, trellises and sunscreens to the garden façade. The detailing of trellises and balconies is carried up to the rooms and maisonnettes on the roof level where the solar panels for domestic hot water are mounted. Each dwelling has a 7-meter deep fenced garden that is the spatial extension of the living spaces.

Of the 59 apartments at Coin Street, 32 of them are either 3 or 4-story houses. There are very few examples of family dwellings of this size and quality in the public sector. The London terrace house is an important reference for these row houses and, although the split-level entrance typical to the terrace type is different, the 4-story height, opportunity for extended families and work-at-home activities, and private garden are features both types share. The top floor of the 4-story type is virtually a separate penthouse with ample terraces front

and rear. The maisonnettes on top of the north block are also rendered as a similar penthouse condition.

Larger buildings surround Coin Street and the argument could be made that even at 4 and 5-story heights, the project is under-scaled for this urban context. Along the street, the building seems even lower because of the step-back at the top of the brick. But the room density is still about 50% higher than the Lambeth Borough standard. While great pains have been taken to make a sustainable landscape on the garage, the long-term health of the scheme depends greatly on the maintenance of this area. The future of the courtyard is also dependent on how successfully the 2nd phase of construction for the Coin Street Center completes and sustains the private realm of the courtyard. Urbanistically, there is a critical difference between the model of the London residential square and that of the perimeter block. The landscape of the square, even though fenced off for the exclusive use of the residents, was part of the public realm and provided critical spatial relief to the space of the street. The courtyard interior of the perimeter block, however, is entirely privatized and thus is totally removed from the public realm. This is to reverse the traditional relationship between residence and street and a critical quality of perimeter block projects like Coin Street will be how successfully the street is landscaped, energized with commercial activity, and maintained as a public space.

London - UK

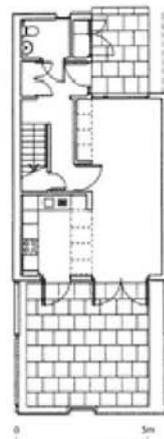
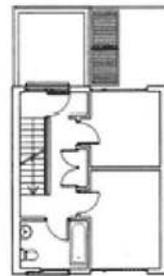
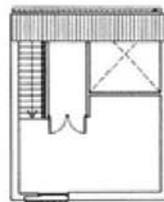
2001

Stephen Proctor & Andrew Matthews Millennium Village Phase 2

Adresse: Greenwich Peninsula, SE 10
Typologie: Block Appartements, maisons bande

N° d'étages: 2 - 8
Type construction: RC frame - timber frame
Finition: metal - béton - verre - bois
Menuiserie: Metallique
Programme: Logements - commerce - école - parking

Nombre de logements: 189
Surface: 00 m²



plan masse

This project is the most recent addition to the new community planned for the Greenwich Peninsula. Part of the general Docklands development extending along the Thames east of Central London that has been under construction for the past 20 years, the peninsula was a polluted "brownfield" site left from the removal of a gas works. A huge exhibition hall, the Millennium Dome was built on the tip of the peninsula in 1999 and following this a master plan was proposed for a sustainable community of about 3000 dwellings, 50 acres of park land, an ecology park, commercial areas, schools and transportation links. A second competition for the first stage of building called the Millennium Village including 1400 dwellings, shopping, parking, a school and health center was won by Ralph Erskine and Hunt Thompson in 1998. The concept for this plan was a system of small perimeter blocks and meandering roads built around a central ecological park area along the northeast edge of the peninsula. The village was to be built in stages, each designed by different architects. Erskine Tovatt built the first stage of 450 apartments on a site along the river (see Millennium Village). The current stage by Proctor and Matthews includes 189 dwellings built on three adjacent blocks. A school, health center, shopping square and parking garage are also part of this stage of construction. The main street that runs down the spine of the peninsula is also a bus route that passes through the middle of the Village site separating Erskine's buildings and the adjacent park and ecology areas along the river with the blocks of the 2nd

London - UK

Stephen Proctor & Andrew Matthews Millennium Village Phase 2



- Powell, Kenneth, *New London Architecture*, Merrell, London, 2001, pp. 176-7
- *Architects Journal*, Feb. 1, 2001, pp. 26-35
- *RIBA Journal*, July, 2003, pp. 30-36; 62-64.
- The Housing Design Awards, 1997-2003, RIBA

phase in the southwest quadrant of the site to the south. Following Erskine's concept of a protective perimeter wall of apartments along the river, the blocks in the 2nd phase also present a taller perimeter surface along the access road. Within the group of 3 blocks, lower buildings, 2-4 stories high, define the semi-private landscaped courtyards required in Erskine's master plan. These buildings consist of 3-4 story point-access blocks and 2 and 3 story townhouses, organized along landscaped pedestrian streets that have limited vehicular access. A new school and health center (designed by Edward Cullinan) has been built in the SW corner of the site and a new parking garage has been built along the south edge of the 2 southern blocks. A variation of the 3-story townhouse backs up to the north side of the garage.

The 8-story, point access block along the northeast side of one of the three blocks steps down to 4 stories along the side streets. This taller wall of apartments along the road simultaneously encloses the landscaped interior of the block, but also forms a defined edge to the open space from which there are fine views of the park and ecology areas to the north and east. These buildings are organized around repeating vertical cores and have complex facades that provide clues to the modular nature of the flats within and the prefabricated technology used in their construction.

The two southern blocks have some taller point access apartments along the north edge but mostly consist of 2 and 3 story townhouses of a similar plan type. These dwellings are entered from the pedestrian/access streets via small covered entrance courts and open to fenced patios on the interior of the block. Living spaces occupy the ground floor with bedrooms above. The third floor has another bedroom under the steeply pitched metal roof that can also be used as a work area. These two house types have differently pitched metal roofs and green ventilation stacks that alternate to form a concatenated, terraced massing. Another version of the 3-story type is used as a live/work unit that is built along the north side of the parking garage. Here the top floor doubles as a south-facing studio space that potentially opens to terrace spaces on the garage. Like the taller slabs, the townhouse types have a highly industrialized, articulated exterior quality.

Ralph Erskine long championed the application of vernacular detail to buildings to diminish the stark barren quality typical of much modernist housing. This attitude of decorated facades, perhaps derived from a more general "townscape" aesthetic, is expressed as the bricolage application of a combination of functional devices, balconies, galleries, sun screens and so on, and an assortment of purely decorative elements, colors, and different materials, textures and patterns. This process results in the distinctive layered, articulated, chiaroscuro facades of buildings like the Byker Wall.

A watered down version of these principles was used in Erskine's first phase of construction at Millennium Village and the principle seems to be more-or-less imbedded in the design criteria for subsequent phases. In the Proctor and Matthews buildings, the bricolage technique has deeper meaning because it is, at least partially, generated by the new technology available to the architects. This new technology includes the use of prefabricated panels that are finished in a variety of materials, and a new CAD-automated system of on-site fabrication of light gauge, cold-rolled steel frames and panels.

Standard timber framing was used for the structure of the townhouses and typical reinforced column and flat slabs for the high-rise, 8 story buildings. The townhouses were sheathed with a system of prefabricated wood wall panels that were then covered with a second lightweight fiberglass covered aluminum honey-combed panel that is finished in variety of materials, corrugated aluminum on the upper walls, plaster or wood on the lower. Similar panels were used in the larger buildings, however, here the sub wall is made of cold-rolled steel sections that are fabricated on site and assembled into both interior and exterior walls. In some of the 3-story buildings, the entire structure is made of cold-rolled sections that are automatically cut, folded, crimped and drilled and assembled on site, a process developed in New Zealand by Scottsdale Construction Systems.

Paris - France

2008

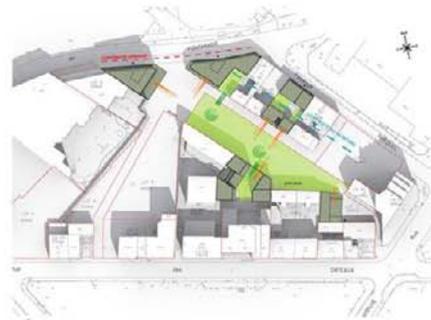
LAN architectures

Frequel Fontarabie

Adresse: Quartier Frequel Fontarabie
Typologie: Block Appartements

N° d'étages: 6
Type construction: RC frame
Finition: metal - béton - bois
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements - commerce

Nombre de logements: 35
Surface: 2450 m²



plan masse

L'idée motrice de la composition de notre projet relève le défi de répondre avec un seul geste à la fois à la nécessité d'intégration urbaine, et à la conception d'un ensemble pionnier d'une démarche de développement durable à l'échelle du secteur d'aménagement.



Paris - France

LAN architectures

Frequel Fontarabie

• www.lan-paris.com



En effet profitant de l'orientation favorable des façades : Sud sur le parc et Nord sur la rue, notre proposition se décline suivant une double logique :

- 1 - Orienter le plus grand nombre de logement sur le parc, afin de faire participer au maximum ce cœur végétal à la vie des riverains et vice-versa. / Ouvrir au maximum au sud afin de capturer le maximum d'énergie
- 2 - Minimiser l'impact sur rue, par la mise en place d'un système de façade constituée d'un minimum d'ouvertures et répondant à une composition classique, régulière et sobre. / Créer une forte inertie au nord pour éviter toute dispersion de l'énergie capturée.



Paris - France

2009

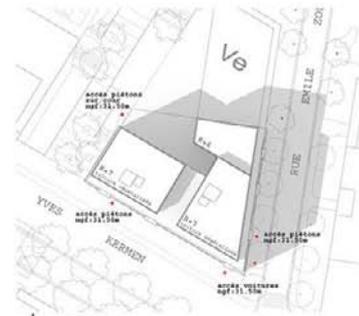
LAN architectures

Ilot V Boulogne Billancourt

Adresse: Boulogne Billancourt
Typologie: Block Appartements

N° d'étages: 6
Type construction: RC frame
Finition: metal - béton - bois
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements - commerce

Nombre de logements: ?
Surface: 4660 m²



plan masse

L'enjeu majeur de la conception des logements de l'Ilot V a été de pouvoir répondre en un seul geste aux divers enjeux :

- créer un bâtiment d'angle
 - s'installer sur une parcelle clôturant le dessin du trapèze et de la grande traversée
 - s'insérer dans un îlot dont la morphologie et l'orientation sont très contraignantes
 - maintenir un souci d'intégration dans un contexte très riche architecturalement, et pourvu de divers matériaux
- Nous avons donc imaginé une architecture ayant un double caractère en créant un bâtiment pouvant intégrer à la



Paris - France

LAN architectures

Ilot V Boulogne Billancourt

• www.lan-paris.com

fois la vocation urbaine des rues Yves Kermen et Emile Zola, et le paysage de la Grande Traversée.

Le langage souhaité pour les façades des rues Yves Kermen et Emile Zola est de dessiner un immeuble d'angle, affirmer une « élégance discrète », créer une animation, rythmer la façade par des épisodes, rendre la masse légère.

Le projet propose un bâtiment sur rue au dessin simple et lisible.

Les façades exposées respectivement au sud et à l'est sont pourvues de nombreuses et larges ouvertures, prolongeant l'intérieur des logements vers les coursives filantes le long du bâtiment. De larges balcons viennent s'intercaler

dans ce linéaire, en saillie par rapport aux coursives.

Les éléments sortants et les bandes filantes entre les étages donnent à la construction un effet de bloc effilé sur les rues Kermen et Zola. Le bâtiment remplit son rôle « d'angle » d'ilot et crée ainsi une séparation nette avec les bâtiments environnants.

Le langage choisi pour la cour et la Grande Traversée traduit l'intention de réverbérer la lumière, amplifier par la réflexion la présence du végétal, et favoriser une ambiance calme et sereine.



Paris - France

2009

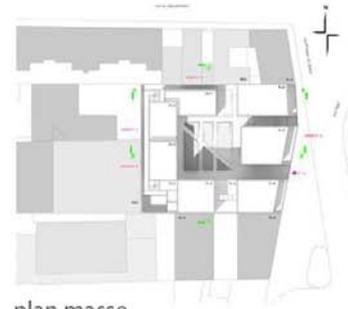
LAN architectures

ZAC Pajol

Adresse: ZAC Pajol, 18ème
Typologie: Block Appartements, patio

N° d'étages: 6
Type construction: RC frame
Finition: béton - brique
Menuiserie: Métallique
Programme: Logements étudiants - commerce

Nombre de logements: 150
Surface: 400 m²



plan masse



L'étude attentive des divers figures des gabarits du PLU nous a permis de mettre en place un projet à double échelle : l'échelle de la rue et celle du coeur d'îlot, respectivement sous forme de système volumétrique vertical et horizontal. Cette dualité est à l'image de notre stratégie : contextualiser au maximum le projet, prolonger les vides du tissu faubourien afin que la nouvelle construction n'interfère jamais sur l'apport lumineux pour le voisinage.



Paris - France

LAN architectures

• www.lan-paris.com



La rue

La position stratégique située au carrefour des différentes rues, et le caractère vivant du quartier ont orientés nos recherches vers le dessin d'une façade animée, riche, permettant des pénétrations visuelles vers le cœur de l'îlot et invitant à l'appréciation de cette espace. Ainsi la création des deux failles et la transparence du rez-de-chaussée, due au parking des 2 roues, assurent cet effet d'aspiration, définissant un projet à l'image des bâtiments des faubourgs parisiens.

Parisiens sont aussi les couleurs et

les matériaux, ainsi la brique couleur ardoise et le sol de la cour rappellent la pierre de taille et annoncent la qualité de l'espace intérieur par l'habillage d'un pignon en revêtement bois venant contaminer le passage d'entrée.

Une des failles est occupée par une circulation verticale, l'autre (la plus large, environ 4 m.) devient le passage pour pénétrer au cœur d'îlot. Le visiteur y retrouve successivement les espaces d'accueil, tels que la loge du gardien (située à l'angle de la rue et du passage), les locaux administratifs et enfin les services communs de la résidence.

La cour

Le projet se développe suivant les héberges périphériques qui définissent les différentes hauteurs des bâtiments. Ce mouvement dégage une cour carrée centrale (17 m. x 17 m), élément clé du projet.

