

MultipliCités

Optimisation énergétique multiscalaire et
modélisation multicritères des formes urbaines

RAPPORT INTERMEDIAIRE 2

Équipe :

Luc ADOLPHE, Marion BONHOMME, Geneviève BRETAGNE, Géraldine CASAUX-GINESTET,
Patrice CONTART, Serge FARAUT, Tathiane MARTINS, Nathalie TORNAY.

N° de contrat : 1517C0030

Projet de recherche coordonné par : Luc Adolphe (LRA-ENSA Toulouse)
Appel à projets de recherche : APR MODEVAL URBA 2015

Coordination technique : Sophie DEBERGUE - Clémence HARLE
Service : Organisation Urbaine

Toulouse, 27 Septembre 2017, V.10 Finale

Table des matières

RESUME	5
ABSTRACT	7
EQUIPE.....	9
1. CONTEXTE ET ENJEUX PRINCIPAUX DU PROJET	11
1.1. Optimisation énergétique de la ville et du bâtiment : deux approches dissociées...	11
1.2. Simulation et modélisation de la ville et du bâtiment : des outils distincts.	13
1.3. Enjeux énergétiques dans le projet urbain et architectural.....	14
2. RAPPEL DES OBJECTIFS.....	15
3. METHODE	16
4. AVANCEMENTS	23
4.1. Introduction.....	23
4.2. Synthèse du rapport intermédiaire de la première année	25
4.3. Evaluation énergétique et solaire des archétypes initiaux	28
4.3.1. Définitions initiales	28
4.3.2. L'archétype BELFORT	28
4.3.3. L'archétype HERS.....	30
4.3.4. L'archétype CASTORS	32
4.3.5. Analyse comparative	34
4.3.6. Conclusion	36
4.4. Premier atelier participatif : « production de projets urbains »	37
4.4.1. Introduction	37
4.4.2. Objectifs	37
4.4.3. Participants	40
4.4.4. Déroulement et résultats de l'atelier	42
4.4.5. Conclusion- Mise en perspective.....	46
4.5. Evaluation énergétique et solaire des archétypes modifiés	48
4.5.1. Définitions initiales	48
4.5.2. L'Archétype BELFORT.....	49
4.5.3. L'Archétype HERS	52
4.5.4. L'Archétype CASTORS	54
4.5.5. Analyse comparative	56
4.5.6. Conclusion	58
4.6. Analyse de sensibilité énergétique des indicateurs typo-morphologiques	59
4.6.1. Le plan d'expériences	59
4.6.2. La méthode factorielle fractionnée	60
4.6.3. Le test d'hypothèse statistique	60
4.6.4. Description du modèle urbain simplifié et vectorisation de la géométrie	61
4.6.5. Premiers résultats obtenus pour l'analyse de sensibilité	62
4.6.6. Conclusion	67
4.7. Deuxième atelier participatif : « évaluation et production de projets urbains »	69
4.7.1. Objectifs	69

4.7.2.	Participants	72
4.7.3.	Déroulement et résultats de l'atelier	73
4.7.4.	Enseignements de l'atelier	82
4.7.5.	Conclusion- Mise en perspective.....	84
4.8.	Analyse de sensibilité énergétique contextualisée	85
4.8.1.	L'archétype BELFORT	85
4.8.2.	L'archétype HERS.....	95
4.8.3.	L'archétype CASTORS	97
4.8.4.	Conclusion et perspectives	99
4.9.	Cahier de charges pour l'optimisation	101
4.9.1.	L'approche de modélisation à base de règles de production.....	101
4.9.2.	L'approche générative paramétrique.....	103
4.9.3.	Conclusion	105
5.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	106
6.	COMMUNICATIONS	108
7.	PILOTAGE DU PROJET / PLANNING.....	109
8.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	111
9.	ANNEXES.....	116
9.1.	Annexe 1 : Transcriptions des synthèses par les rapporteurs des deux ateliers.....	117
9.1.1.	Atelier 1, quartier Belfort	117
9.1.2.	Atelier 1, quartier Castors.....	119
9.1.3.	Atelier 1, quartier Hers	121
9.1.4.	Atelier 2, quartier Belfort	123
9.1.5.	Atelier 2, quartier Castors.....	124
9.1.6.	Atelier 2, quartier Hers	127
9.2.	Annexe 2 : Fiches de restitution des trois groupes de l'atelier 2	129
9.2.1.	Quartier Belfort	129
9.2.2.	Quartier Castors.....	134
9.2.3.	Quartier Hers	140
9.3.	Annexe 3 : Fiches Indicateurs, préparées pour Atelier 1.	145
9.4.	Annexe 4 : Productions graphiques Ateliers 1 et 2	152
9.4.1.	Atelier 1.....	152
9.4.2.	Atelier 2.....	154
9.5.	Annexe 5 : Publication PLEA 2017.....	164
9.6.	Annexe 6 : Comptes rendus des réunions Multiplicités sur l'année 2	174
9.6.1.	CR réunion du 11 Octobre 2016	174
9.6.2.	CR réunion du 14 Novembre 2016	176
9.6.3.	CR réunion du 5 Février 2017	178
9.6.4.	CR réunion du 9 Mars 2017	186
9.6.5.	CR réunion du 31 Mars 2017	188
9.6.6.	CR réunion du 3 Mai 2017	190
9.6.7.	CR réunion du 1 Juin 2017	195
9.6.8.	CR réunion du 12 Juillet 2017	197
9.6.9.	CR réunion du 13 Septembre 2017.....	200

RESUME

Ces dernières décennies, face à un développement important des aires urbaines, et une maîtrise insuffisante de la gestion des ressources notamment énergétiques dans les projets d'aménagement, il convient de s'interroger sur le devenir morphologique et spatial de la ville : vers quel(s) modèle(s) de ville allons-nous ? Quels sont les liens entre ces formes urbaines et leurs impacts environnementaux et énergétiques ? Comment évaluer et « optimiser » ces performances énergétiques pour produire des îlots ou des quartiers durables ? Etant donné la complexité des enjeux urbains, il est indispensable d'intégrer les différentes disciplines, ainsi que d'emboîter les différentes échelles afin de pouvoir produire des connaissances utiles aux maîtres d'ouvrage urbains, et des modélisations énergétiques intégrées. Ce projet de recherche est une contribution prospective au renouvellement et à l'aide à la conception des zones urbaines à partir d'une approche énergétique, focalisée sur les formes construites et leur matérialité à trois échelles spatiales imbriquées : le quartier urbain, le bâtiment et le matériau. Le travail a pour but de réaliser une étude d'optimisation sur le potentiel d'exploitation raisonnée de l'énergie solaire et de conservation énergétique dans les typologies urbaines de référence des villes européennes traditionnelles et appliquée sur trois archétypes d'opérations de rénovation et/ou de développement en cours dans l'aire urbaine de Toulouse. Nous cherchons à élaborer une base de données présentant l'ensemble de variantes énergétiques « optimales » de ces projets, et permettant de communiquer aux aménageurs urbains et aux architectes sur un large éventail de potentialités. Ce travail permettra de les aider à gérer la complexité et comprendre l'impact de leur choix dans les réponses énergétiques urbaines, à la fois en termes de performance, mais aussi en termes de qualités des ambiances architecturales et urbaines, ainsi qu'en termes d'impacts socio-économiques. A partir d'un jeu d'indicateurs et de paramètres spatiaux de la morphologie urbaine, plusieurs archétypes urbains qui ont été définis dans le cadre des projets de recherche récemment portés par le LRA et ses partenaires (SAGAcités, MUSCADE et ACCLIMAT, MAPUCE) serviront de base à cette étude prospective. Elles seront complétées par les connaissances ainsi associées à leur matérialité élaborées dans le projet MAPUCE. Dans un premier temps ces archétypes seront évalués selon leur performance énergétique. Dans un second temps, les paramètres pertinents les définissant seront soumis à une étude de sensibilité afin d'identifier les facteurs ayant une plus forte influence sur les variables-réponse énergétiques d'intérêt. Ensuite, nous chercherons à utiliser des techniques innovantes d'optimisation basées sur le couplage d'un algorithme issu de la recherche opérationnelle (algorithmes évolutionnaires, génétiques, réseaux de neurones...), avec des modèles de calcul énergétique des bâtiments à des échelles géographiques variables. Ceci permettra, à partir de la comparaison de milliers de variantes morpho-techniques urbaines, de définir un ensemble de solutions optimales du point de vue énergétique et vis à vis d'un ensemble de critères prédéfinis. Ces connaissances nouvelles permettront de développer un prototype d'outil d'aide à la décision permettant une plus-value décisionnelle pour les décideurs, utile, à la fois à un diagnostic des potentialités solaires d'études de cas, et à l'orientation des phases de (pré) programmation des projets urbains. Ce travail aboutira à la production de données et de connaissances sur des variantes énergétiques urbaines « optimales ». L'expérience capitalisée dans d'autres projets sur ce type d'approche innovante a montré que les variantes optimales obtenues ne correspondent pas uniquement à des projets qui font table rase du passé. La grande majorité des variantes obtenues s'appuient sur des modifications typomorphologiques relativement modestes par rapport à une typologie urbaine existante. Un quartier « optimal » du point de vue énergétique peut ainsi perpétuer le « changement dans la continuité » : des modifications typo-morphologiques faibles mais continues dans le temps et l'espace. Dans le cadre d'un projet de renouvellement urbain, ce travail peut ainsi apporter des connaissances opérationnelles inédites.

ABSTRACT

Faced with fast growing urban areas in the last decades, and an insufficient control of natural resources notably the energy management regarding urban planning, it becomes imperative to question about the morphological and space future of the city: toward which model(s) of city are we going to? What are the links between urban forms and their environmental and energy impacts? How to evaluate and "optimize" their energy performance in order to produce sustainable urban neighbourhoods? Given the complexity of urban systems, it becomes essential to integrate the different disciplines, as well as to fit the different spatial and temporal scales of planning in order to produce useful knowledge to planners, and an integrated energy modelling. This research project is a prospective contribution to support urban renewal and new urban designs from an energy point of view and focused on the built urban forms and their materiality at three nested spatial scales: the urban district, the building and the building envelope. The research aims to perform an optimization study on the rational exploitation of solar energy and energy conservation potential of urban form typologies of traditional European cities and applied to three urban archetypes of renovation and/or on-going development operations in the urban area of Toulouse. We seek to develop a database with the set of 'optimal' energy variations of these urban archetypes, and to communicate to urban planners and architects on a wide range of urban form potentialities. This work will allow supporting manage the complexity of planning urban forms and understand the impact of their choice in urban energy responses, both in terms of performance, but also in terms of architectural and urban ambiances as well as in terms of socio-economic impacts. From a set of energy-related indicators and spatial parameters of the urban morphology, several urban archetypes have been defined in the context of recent research projects carried out by the LRA and its partners (SAGAcites, MUSCADE and ACCLIMAT, MApUCE) and will provide the basis to this prospective study. They will be completed by the knowledge related to their materiality developed in the MApUCE project. Initially these archetypes will be evaluated according to their energy performance. In a second methodological step, the relevant parameters defining the urban archetypes (urban form-building-envelope) will be subject to a parametric sensitivity analysis to identify the factors having a major influence on the energy response-variables of interest. Then, innovative optimization techniques will be applied by coupling an operational research based algorithm (evolutionary or genetic algorithms, networks of neurons...), with building energy models at varying spatial scales. This methodology should allow, from the comparison of thousands of typo-morphological variants of urban neighbourhoods, to define a set of optimal solutions from the energy efficiency point of view and regarding a set of predefined criteria. This new knowledge base will bring us to develop a decision support tool to help urban planners in the diagnosis of the case studies solar potential, and to guide them in the early stages of design. Experience obtained with the application of a similar methodology in the context of a previous research project has shown that the optimal variants do not only correspond to designs that make clean slate of the past. The great majority of obtained variants rely on relatively slight typo-morphological changes regarding the existing urban archetypes. An "optimal" neighbourhood from the energy point of view can perpetuate the 'change within continuity': slight but continuous typo-morphological changes in time and space. As part of an urban renewal project, this project can bring new operational knowledge.

EQUIPE



L'équipe est constituée des partenaires suivants :

- le Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), laboratoire de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse (mandataire),

Le LRA participe à la mise en place des fondements de la recherche architecturale et urbaine notamment au travers d'approches transdisciplinaires concernant le développement durable, les processus de transformation de la ville, les jeux d'acteurs du projet et les outils de modélisation numériques. Le LRA organise ses investigations dans six champs thématiques : (1) architectures numériques, (2) nouveaux territoires urbains (3) processus participatifs, (4) art, architecture, conception, (5) patrimoines architecturaux et urbains et (6) environnement et paysage. La position d'interface recherche/profession du LRA l'incite également à la valorisation de cette recherche, en particulier par la production d'outils d'aide à la décision et d'aide à la conception.

L'équipe du LRA a porté ou a participé à de nombreux projets de recherche dont les résultats seront capitalisés à différents degrés dans le projet Multiplicités : Capacités (2014-2017, ADEME), Capes-Cofecub (2010-2013, MAE), Sagacités (2000-2002, PIRVilles), Muscade (2010-2013, ANR), Acclimat (2010-2013, RTRA-STAE), MapUce (2014-2018, ANR), IFU (2013-2014, ADEME), et PIE (2004-2006, ADEME).

- l'Agence d'Urbanisme et d'Aménagement Toulouse Aire urbaine (aua/T)

Depuis 40 ans, l'agence d'urbanisme et d'aménagement accompagne le développement de l'aire urbaine de Toulouse, qui représente aujourd'hui 453 communes et 1,2 million d'habitants, et éclaire les collectivités et les acteurs de la ville dans la connaissance des évolutions urbaines, sociales, économiques et environnementales. Promouvant un développement urbain « soutenable » de l'agglomération dans sa région, l'aua/T est impliquée dans les domaines de la planification territoriale (InterSCoT, SCoT, PLUi, PLU, ...), la programmation urbaine, l'harmonisation et la convergence des politiques publiques sectorielles (PLH, PDU,...), la contractualisation (politique de la ville,...) et la qualité urbaine (renouvellement urbain et espaces publics, ...). La réflexion autour de l'intégration des enjeux énergétiques et climatiques de manière transversale et

multiscale est aujourd'hui au cœur du renouvellement des approches de l'aua/T en matière d'observation et de projet de territoire. Impliquée dans les projets de recherche ACCLIMAT 2010-2013 et MApUCE 2014-2018, l'aua/T investit maintenant, avec une visée plus opérationnelle, dans l'identification, la définition et l'intégration de mesures dans les champs de la réduction et de l'économie des consommations d'énergie, de la valorisation des potentiels d'énergies renouvelables et de récupération, de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique, à travers les démarches de projets urbains et de planification (SCoT, PLU/PLUi, opérations urbaines) dont elle assure la maîtrise d'œuvre. L'aua/T a participé en 2014 à groupe de travail FNAU – ADEME, sur la définition d'une ligne méthodologique commune autour des enjeux posés par les objectifs de Facteur 4 dans la planification et le projet de territoire.

- L'Ecole Européenne de l'Art et des Matières (EEAM),

L'EEAM est le seul établissement en France spécialisé dans l'enseignement des techniques de réhabilitation et de création de décors de murs et de sols contemporains soucieux des enjeux environnementaux. C'est un jeune établissement, créé en 2009 à Albi (81), qui amorce aujourd'hui un département de recherche et développement. L'objectif est d'approfondir les connaissances théoriques et pratiques, développer les collaborations et les échanges de compétences, assurer une veille technologique, stimuler des expériences créatives de nature interdisciplinaire.

- L'Institut de la Ville (IdV).

L'Institut de la Ville est un nouvel institut public de recherche et de formation pour une ville économe et socialement durable. Il vise à catalyser des recherches interdisciplinaires sur la ville, au carrefour de compétences en sciences humaines et sociales (sociologie, géographie, droit, urbanisme), en architecture, en sciences et techniques (génie civil, génie urbain, mathématiques), dans le cadre de l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées (communauté d'universités et d'établissements toulousains). L'Institut de la Ville vise aussi à : 1) s'inscrire dans des logiques d'excellence de la recherche et améliorer sa compétitivité nationale et internationale. ; 2) mutualiser les efforts de recherche en complémentarité / synergie avec des actions de type pôle de compétitivité, Instituts Carnot, ou clusters régionaux ; 3) améliorer l'accessibilité de la recherche et participer à son rayonnement et à sa diffusion dans la formation et les milieux professionnels. Ainsi, les actions de l'Institut de la Ville se trouvent aux cœurs des enjeux du projet multipliCités. Par ailleurs, au delà de ses partenaires universitaires, l'Institut de la Ville fédère des acteurs de la ville comme Toulouse Métropole.

1. CONTEXTE ET ENJEUX PRINCIPAUX DU PROJET

Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes (BUREAU, 2009). Bien qu'elles ne couvrent que seulement 2,8% de la surface de la planète, les villes sont responsables de la consommation de plus de 75% des ressources énergétiques globales, 78% des émissions de gaz à effet de serre et de 60% de la consommation d'eau (ROGERS, 2000). Malgré sa forte empreinte écologique, la ville doit être vue aujourd'hui dans une perspective de développement durable comme un nouveau paradigme faisant des « défis » des « opportunités », et visant à faire muter la Ville de consommatrice d'énergie à productrice d'énergie.

1.1. Optimisation énergétique de la ville et du bâtiment : deux approches dissociées

Dans la perspective du développement urbain durable, la morphologie construite joue un rôle crucial sur la demande énergétique globale des villes (Owens 1986) (Droege 2007) (Batty 2008) (Hills 1994) (Williams, Burton, and Jenks 2000). Par morphologie urbaine, nous nous référons ici à la forme, aux dimensions et à la matérialité des bâtiments. A cette échelle, les configurations des villes affectent directement les climats intérieurs et extérieurs des espaces habités et ont une répercussion directe sur la consommation d'énergie grise et d'utilisation des bâtiments (Ratti, Raydan, and Steemers 2003).

Les bâtiments représentent une grande partie de la demande énergétique des villes. En France, ils correspondent à une fraction de 46% (ADEME 2011) (Figure 1). Bien que le secteur de la construction et de l'aménagement soit de loin le plus dynamique des secteurs d'activité en France, créateur d'emplois et véritable vecteur économique et social (INSEE 2010), il souffre depuis de nombreuses années de faiblesses structurelles, en particulier en termes d'impacts énergétiques et environnementaux. Ces trente dernières années, la consommation d'énergie finale des bâtiments a augmenté de plus de 20 %. Aujourd'hui, le secteur résidentiel et tertiaire est responsable de 44 % de l'énergie finale consommée. Il est de fait le secteur le plus énergivore et le plus polluant en France, loin devant les transports et l'industrie (ADEME 2011).

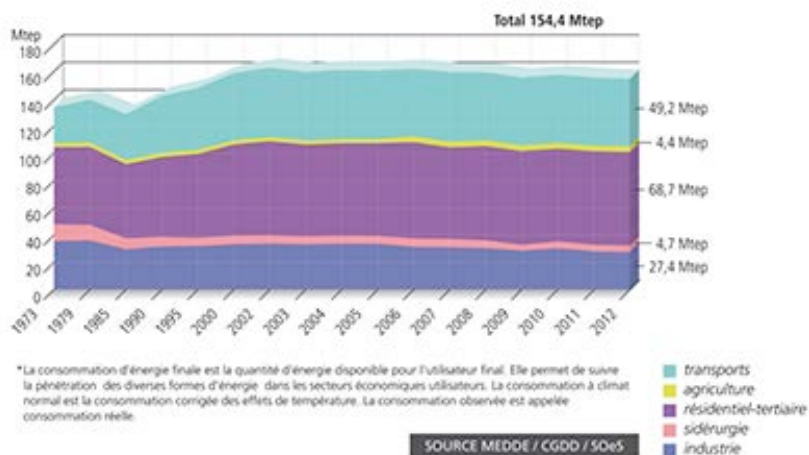


Figure 1: répartition de la consommation finale d'énergie en France (ADEME, 2011).

Des nombreux efforts ont été déployés, depuis quelques décennies, afin de favoriser l'efficacité énergétique des espaces construits, néanmoins cela ne s'applique qu'aux bâtiments isolés et principalement neufs. Un certain nombre de travaux de recherche ont récemment essayé de mesurer et montrer l'effet de la densité et d'une manière plus générale de la morphologie urbaine sur la consommation énergétique des bâtiments (Martins, Bonhomme, and Adolphe 2013) (Bouyer, Inard, and Musy 2011), ainsi que sur leur potentiel de production d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire (Compagnon 2004; Montavon 2011) (Kämpf et al. 2010) dans les pays développés. Pourtant, une analyse de la morphologie urbaine et de sa participation à la réduction de la demande énergétique des bâtiments et à la maximisation de la production locale d'énergie n'a pas encore été mise en œuvre de manière intégrée.

L'énergie solaire offre un énorme potentiel qui peut contribuer à différentes applications. En plus de l'éclairage naturel et l'apport solaire en hiver, l'énergie solaire peut être convertie pour la production locale d'énergie thermique et électrique. Toutefois, dans des régions très ensoleillées en période estivale, les apports solaires sur l'enveloppe du bâtiment peuvent induire une surchauffe en générant des conditions de confort thermique intérieur extrêmement hostiles qui peuvent, par voie de conséquence, augmenter le besoin énergétique pour le conditionnement des espaces : un compromis qui n'est pas facile à gérer par les aménageurs au moment de la conception des bâtiments

A l'échelle urbaine, on peut également parler de la question complexe de la densité urbaine. La grande majorité des études s'accordent sur le fait qu'une ville économe en énergie est une ville dense avec un bâti compact. Maïzia (2007) et Steemers (2003) défendent le fait que des formes urbaines plus compactes réduiraient significativement les consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment et des transports. Cependant, la prise en compte de nouvelles problématiques - comme l'effet d'îlot de chaleur urbain et la production d'énergies renouvelables, tel que l'énergie solaire - vient questionner ce paradigme de la densité (Laëtitia et al. 2011; Steemers 2003). Par exemple, compte tenu du bilan radiatif des surfaces bâties (induisant un potentiel solaire de production d'énergie locale), les obstructions ou ombres

portées peuvent partiellement ou totalement bloquer la lumière du jour et l'irradiation solaire de par les effets d'ombrage. L'ensemble de ces stratégies conflictuelles peut être représenté dans le « paradoxe énergétique urbain » (Bonhomme 2013). Quel choix entreprendre ? Quel critère privilégier ? Quel est le poids énergétique, environnemental et socio-économique de telles décisions ?

En outre, étant donné que le processus de densification urbaine a un impact fort sur le bilan énergétique de la ville, en particulier sur les surfaces urbaines et les enveloppes de bâtiments, il est important de caractériser la variation de ces impacts selon les principaux paramètres climatiques et morphologiques.

En répondant aux effets de la morphologie urbaine sur le potentiel de production d'énergie solaire et de contrôle des besoins énergétique à de multiples échelles, cette étude explore donc un nouveau paradigme énergétique s'appuyant sur la production décentralisée d'énergie renouvelable dans les villes. Nous nous intéressons ainsi particulièrement à l'adaptation et à l'évolution du parc immobilier existant dans des quartiers à « énergie positive », en ajustant les éléments de la morphologie urbaine, tels que la densité bâtie, la géométrie, l'implantation des bâtiments, en allant jusqu'à la matérialité des éléments construits, tout en précisant leurs usages.

Néanmoins, la définition de la morphologie des bâtiments, à l'échelle urbaine locale, s'appuie sur plusieurs paramètres du projet ainsi que sur plusieurs contraintes environnementales, ceux-ci augmentant avec la complexité de la conception. Par conséquent, le nombre de configurations possibles augmente avec le nombre de paramètres du projet. Dans une modélisation multicritères adaptée à la conception des bâtiments, cette complexité induite est aussi directement liée au temps et au coût de calcul. Pour ces différentes raisons, une méthodologie axée sur l'analyse globale et la conception optimale des typologies urbaines peut devenir très pertinente.

1.2. Simulation et modélisation de la ville et du bâtiment : des outils distincts.

Face à cette absence de solutions évidentes et pour tenter d'apporter des connaissances nouvelles dans le cadre de ces problématiques, les outils de modélisation informatiques sont devenus essentiels à la recherche comme aux projets de conception urbaine et architecturale. Les outils de modélisation des bâtiments, du microclimat urbain, de l'énergie urbaine, du confort des usagers etc. sont aujourd'hui nombreux mais présentent deux limites principales :

- D'une part, rares sont les outils qui convoquent suffisamment de disciplines pour rendre compte des interactions complexes entre systèmes urbains, et qui intègrent l'imbrication des échelles.

- D'autre part, les données produites par ces modèles sont souvent peu compatibles avec les attentes et les besoins des praticiens.

En effet, l'utilisation de la maquette numérique à l'échelle du bâtiment se développe principalement à partir du BIM (Building Information Modeling), qui représente un atout pour évaluer la qualité architecturale et environnementale d'un projet à partir des performances énergétiques quantifiées (Ferries 2013). Ces maquettes numériques, considèrent les enveloppes des bâtiments, les équipements, l'environnement proche (masques bâtis et végétaux), etc. Mais quand est-il à l'échelle de l'îlot ? Comment intégrer les questionnements sur les qualités architecturales, urbaines et environnementales lors d'une opération d'un éco-quartier, par exemple. L'échelle urbaine se développe, quant à elle, à partir d'un CIM (City Information Model) dont les informations sont exploitées par de nombreux outils de calcul, de simulation et d'aide à la décision, en particulier dans le domaine émergent du microclimat urbain (Khemlani 2005).

Par conséquent, les simulations énergétiques à l'échelle de la ville et à celle du bâti sont dissociées dans les outils d'aide à la conception, et dans les pratiques des équipes de concepteurs.

1.3. Enjeux énergétiques dans le projet urbain et architectural

Actuellement, les enjeux de la forme urbaine et les enjeux de la matérialité des enveloppes des bâtiments sont traités indépendamment. En effet, les enjeux énergétiques à l'échelle du bâtiment se concentrent sur les performances des dispositifs constructifs associés à des solutions techniques (performances des matériaux ou des systèmes). Or, si une démarche plus globale tend à optimiser la forme urbaine en intégrant les enjeux énergétiques de l'enveloppe, cela permettrait d'intégrer des données comme le confort lumineux, ou encore l'autonomie lumineuse (paramètre important de la consommation d'énergie).

2. RAPPEL DES OBJECTIFS

Le projet MultipliCités a pour ambition de développer des connaissances nouvelles, intégrables dans les projets de renouvellement urbain, facilement exploitables, avec la volonté de s'inscrire dans une modélisation énergétique intégrée : multiscalaire, multidisciplinaire, multicritères, multi-acteurs (Figure 2).

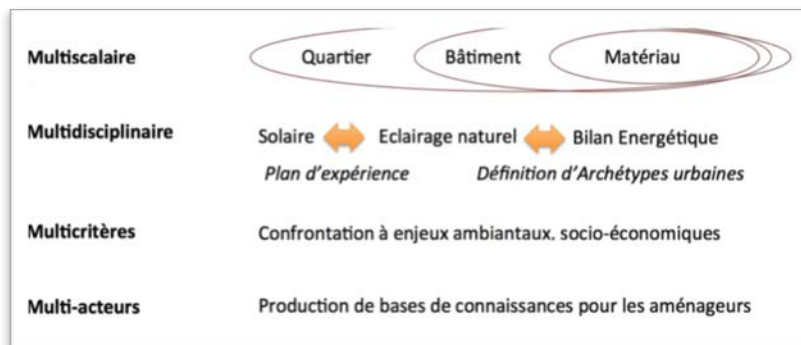


Figure 2 : approche sur la modélisation énergétique intégrée envisagée dans le projet multipliCités.

Ces connaissances sont axées sur une **approche multiscalaire**, focalisée sur les formes construites et leur matérialité à trois échelles spatiales imbriquées: le quartier, le bâtiment et le matériau ; sur une **approche multidisciplinaire**, qui croise l'étude de la morphologie urbaine, l'énergétique du bâtiment et la statistique appliquée ; sur une **approche multicritères** qui permettra de confronter les divers scénarios énergétiques à des paramètres qualitatifs (souvent non-mesurables) en termes d'ambiances, de confort multi-sensoriel ainsi qu'en termes d'enjeux socio-économiques des variantes ; et sur une **approche multi-acteurs** qui croise les expériences de la recherche et de la pratique professionnelle dans la production de bases de connaissances pour les aménageurs.

L'étude cherche à répondre à six objectifs principaux :

- a) Identifier et caractériser des archétypes de quartiers représentatifs de la ville européenne traditionnelle,
- b) Etablir le bilan énergétique de ces archétypes urbains,
- c) Evaluer l'impact relatif de leurs attributs typo-morphologiques dans les réponses énergétiques,
- d) Générer des archétypes énergétiques urbains « optimaux »,
- e) Mettre en œuvre une analyse multicritères de scénarios énergétiques,
- f) Développer une base de données et de connaissances sur les variantes « optimales ».

3. METHODE

Afin de répondre à ces objectifs, six tâches principales avaient été définies lors de la soumission du projet, dans une approche multiscale et multicritères.

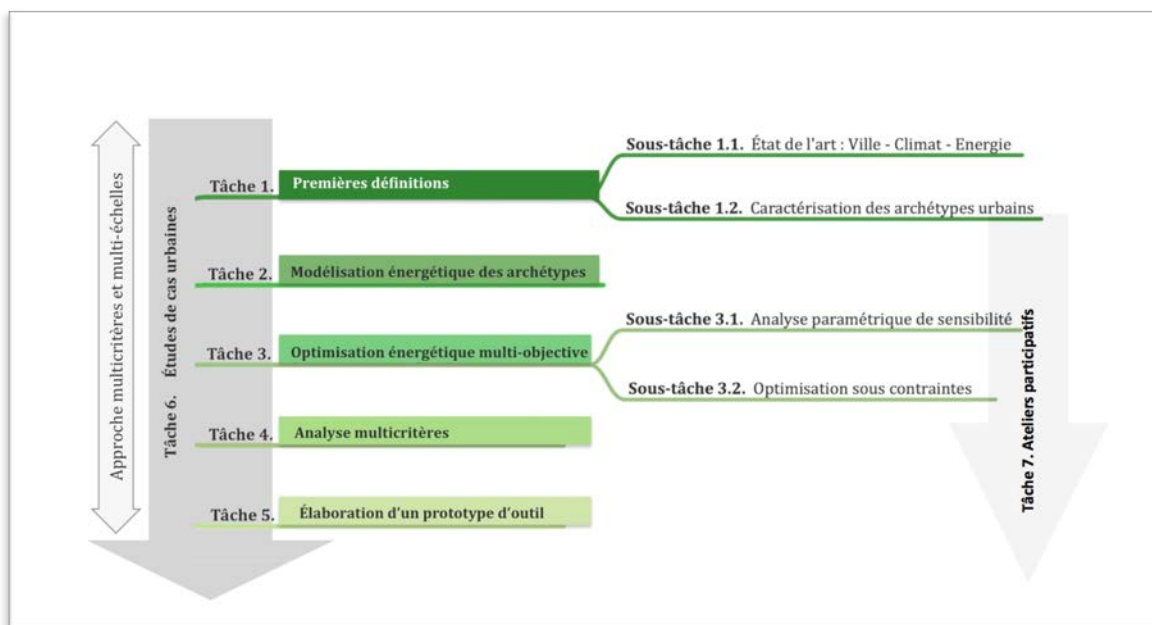


Figure 3 : Schéma présentant la méthode du projet multipliCités.

Nous avons décidé d'adjoindre à la proposition initiale une nouvelle tâche, la tâche « Ateliers participatifs ». Cette septième tâche du projet (Figure 3) est basée sur une stratégie à triple détente, sous la forme de deux ateliers successifs de co-construction *chercheurs- acteurs*, suivis d'une présentation publique de la restitution des deux ateliers.

Dans le projet initial, nous souhaitions en effet présenter, lors de la dernière année du projet, notre étude d'optimisation à un panel de professionnels pour information et intégration de leurs points de vue, ceci après coup. Or, après discussions entre les membres de l'équipe de projet et des professionnels partenaires, cette approche nous a paru limitante, notamment quant à la prise en compte du champ des évolutions possibles à partir des archétypes urbains existants.

Nous avons donc décidé de co-construire avec un panel large de professionnels et de chercheurs, les stratégies d'optimisation de ces archétypes, dès cette seconde année du projet. Cette approche permet de croiser directement des approches « top-down » issues de notre approche théorique, avec des approches « bottom-up » issues des

propositions émanant des ateliers participatifs. Ceci améliore la pertinence du champ d'exploration des variantes urbaines. Ceci facilitera aussi grandement la production de la maquette finale et sa contextualisation.

Présentation des divers tâches et état d'avancement

Tâche 1. Définition d'archétypes urbains de référence des villes françaises :

Etat d'avancement 100 %

Nous cherchons dans cette tâche à identifier des « modèles » ou « archétypes » les plus représentatifs des tissus urbains et des typologies architecturales en France, par une double approche :

- Une approche descendante (top-down) visant à proposer des typologies architecturales et urbaines qui permettent de caractériser les opérations, de les classer en archétypes, à partir de la définition d'un panel d'indicateurs urbains adaptés. Pour ce faire, cette approche intègre les avancées de recherches récentes ou en cours, tel le projet Mapuce analysant la matérialité des projets urbains, mais aussi d'autres approches complémentaires travaillant sur des enjeux énergétiques à l'échelle urbaine, comme par exemple l'orientation des bâtiments, les masques bâtis, végétaux, du contexte environnant.
- Une approche montante (bottom-up) partant d'études de cas réelles, des opérations déjà réalisées dans l'Aire Urbaine de Toulouse, afin d'une part d'identifier les indicateurs urbains, d'autre part d'intégrer les données du projet propres aux modes opératoires des équipes de concepteurs (nombre d'habitants, surface de plancher, efficacité énergétique etc.). Ces études de cas correspondent à des opérations connues, caractérisées, bien renseignées, dans l'agglomération Toulousaine, en ZAC et hors ZAC, en pavillonnaire et en collectif.

Les questionnements liés à notre projet ont permis de réinvestir les dix typologies extraites du projet Mapuce et de proposer huit archétypes ou « superblocs » en adéquation avec les questionnements morpho-énergétiques urbains.

Parallèlement, l'ensemble des études de cas toulousaines a été classé selon ces archétypes, et quatorze études de cas ont été, in fine, sélectionnées.

Tâche 2. Modélisation énergétique des archétypes à plusieurs échelles spatiales imbriquées :

Etat d'avancement 100 %

Nous cherchons à établir le bilan énergétique d'archétypes urbains identifiés dans l'étape préalable (tâche 1). Ceci permet d'estimer le potentiel solaire (thermique et photovoltaïque) des formes urbaines, le potentiel d'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments et la performance des enveloppes quant aux apports solaires et les déperditions thermiques liées également aux caractéristiques de leur matérialité. La performance énergétique (besoins énergétiques + potentiel solaire de production d'énergie) de ces typologies de référence sera évaluée à l'aide d'un ou plusieurs outils dédiés qui seront mis au point afin de répondre à l'imbrication scalaire souhaitée. Dans un premier temps, nous mettons en place des études comparatives entre différents modèles existants, tels que *Citysim* (évaluation énergétique à l'échelle du quartier) et *EnergyPlus* (échelle du bâtiment).

Tâche 3. Analyse de sensibilité des facteurs typo-morphologiques (forme et matérialité) :

Etat d'avancement 100%

Nous cherchons ensuite à évaluer l'impact relatif des attributs typo-morphologiques définissant les archétypes urbains dans les réponses énergétiques. Pour ce faire, nous allons mettre en œuvre un plan d'expérience par une méthode factorielle, ce qui nous permettra d'identifier la magnitude d'effet de chaque facteur typo-morphologique influençant différents niveaux de rayonnement solaire (potentiel solaire) et d'éclairage sur les façades et les toitures des bâtiments, sur les apports solaires à l'intérieur de bâtiments et sur les déperditions énergétiques. Ces variables-« réponses » seront ensuite intégrées dans un processus d'optimisation. Cette méthode est indispensable dans le but de comprendre l'influence des facteurs considérés, à plusieurs échelles (de l'échelle urbaine à l'échelle des propriétés des matériaux composant un bâtiment) dans les réponses énergétiques, permettant d'une part de mettre en place une hiérarchisation des facteurs influents et d'autre

part, de conserver seulement les paramètres ayant un effet significatif dans l'étude d'optimisation.

Tâche 4. Paramétrisation et optimisation multicritères des archétypes :

Etat d'avancement : initié

Nous cherchons à générer des archétypes urbains « optimaux », vis-à-vis du potentiel solaire des formes urbaines et de la réduction des besoins énergétiques des bâtiments, définis à partir de tissus urbains de référence. Les archétypes urbains seront paramétrés et soumis à un processus d'optimisation. Ce paramétrage des archétypes est effectué au regard de leur évolutivité et pas de manière aléatoire. Nous nous appuyons sur une base d'informations "avant / après" (issues de la documentation), au regard des potentialités (déjà avérées ou pas encore) en termes de réhabilitation ou de renouvellement - examen d'un seuil potentiel en termes de surface de parcelle (notamment par rapport au renouvellement). Nous définissons des règles d'évolution variées, physiques (e.g. seuil d'éclairage), urbanistiques (e.g. COS, CES, etc.) qui peuvent prendre la forme d'intervalles ou des valeurs discrètes de variation des paramètres typo-morpho issues d'un dialogue avec des professionnels / acteurs urbains (aménageurs – promoteurs) par le biais d'ateliers participatifs. Ensuite, cet ensemble d'informations est automatisé en couplant l'outil d'évaluation énergétique multicritères (solaire, besoin énergétique, etc.) à des algorithmes d'optimisation mathématique (e.g. algorithmes évolutionnaires) à l'aide d'une plateforme multidisciplinaire d'optimisation (e.g. modeFRONTIER et/ou Grasshopper). Dans cette approche multicritères, nous cherchons à aboutir simultanément au potentiel énergétique solaire maximum pour un ensemble de bâtiments, et des besoins énergétiques minimum, en tenant compte des variations de variables contraintes par les règlements d'urbanisme locaux.

Tâche 5. Elaboration d'un prototype d'outil :

Etat d'avancement : initié

Cette tâche consiste à développer une base de données et de connaissances présentant l'ensemble de variantes « optimales » pour permettre de

communiquer aux aménageurs urbains et aux architectes un large éventail de potentialités pour lesquels l'impact du choix sur les réponses énergétiques et environnementales sera analysé. Une architecture logicielle adaptée est présentée dans ce rapport

L'approche méthodologique proposée dans les tâches 1 à 5 est adaptée à plusieurs contextes géographiques, climatiques ou morphologiques urbains, etc. Néanmoins, dans le cadre de ce travail de recherche, nous cherchons à la mettre au point et l'appliquer dans le cadre d'un certain nombre de projet urbain en cours sur Toulouse.

Durant chacune de ces tâches « horizontales », des échanges avec les équipes de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage permettent :

- d'identifier les objectifs environnementaux et les champs de connaissances concernés,
- d'identifier les besoins spécifiques des acteurs,
- d'obtenir des retours expériences sur les versions successives de la base de connaissances produite en conception,
- d'explorer exhaustivement et de valider l'outil sur les cas d'études.

Parallèlement, les tâches 6 et 7 « verticales » permettent une médiation entre les résultats de notre recherche, et les questionnements actuels en matière d'architecture et d'urbanisme, et les pratiques des acteurs de l'urbaine en conception.

Tâche 6 Etudes de cas urbaines : du matériau au quartier

Etat d'avancement 80 %

Cette tâche « verticale » de notre projet propose d'appuyer chacune des autres tâches « horizontales » sur des projets urbains en cours de réflexion ou de construction sur le territoire de Toulouse Métropole, suivis spécifiquement par l'aua/T.

Cette approche permet d'ancrer les travaux de recherche sur des questionnements architecturaux et urbains actuels. Elle permet d'appréhender et d'évaluer le potentiel d'évolution des processus de conception des opérations d'aménagement urbain sur le territoire toulousain vis-à-vis de l'optimisation du potentiel énergétique solaire.

Cette approche constitue une opportunité pour échanger avec les acteurs locaux du projet urbain. La mise en exemple des résultats successifs du projet de recherche à travers ces projets architecturaux et urbains doit permettre de les soumettre à la

discussion avec les acteurs locaux et de vérifier leur faisabilité pour une applicabilité "pratique".

L'aua/T et l'IdV jouent un rôle fondamental dans cette tâche, car ces partenaires peuvent mettre à profit leur réseau de partenaires afin de sensibiliser et mobiliser les acteurs urbains locaux. Deux canaux seront privilégiés dans notre projet : une communication vers la sphère professionnelle et le grand public, et l'animation du réseau d'acteurs locaux. Une réflexion fine sur les modalités de cette médiation a été menée par l'équipe.

Tâche 7 Ateliers participatifs

Etat d'avancement 80 %

Les trois phases de cette tâche sont les suivantes : deux ateliers successifs de co-construction *chercheurs- acteurs*, baptisés ateliers participatifs de « production de projets urbains » et d'« évaluation et de production de projets urbains », suivis par une présentation de la restitution des deux ateliers à un public élargi.

Un premier atelier, ouvert à des chercheurs et des praticiens, a permis d'aboutir à la co-construction d'une évolutivité possible et consensuelle des archétypes urbains. Il a été organisé en trois groupes mixtes travaillant chacun sur un des trois archétypes retenus dans la tâche 1.

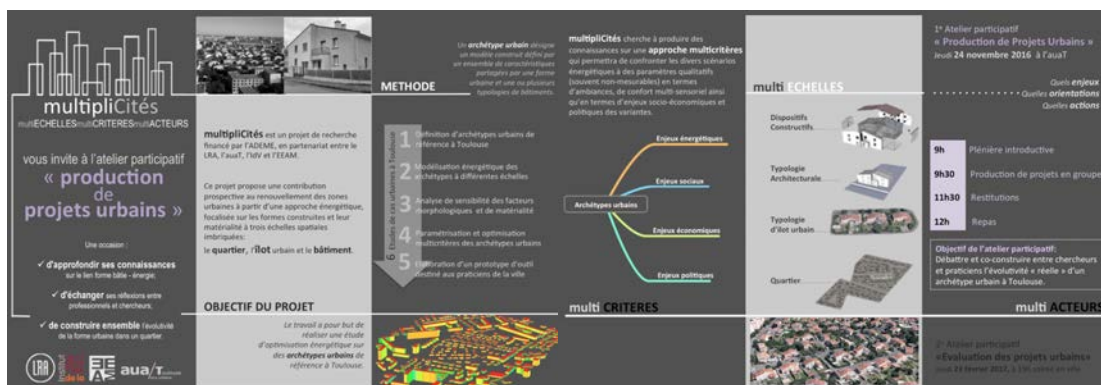


Figure 4 : Flyer d'invitation au premier atelier participatif.

Un second atelier a permis de poursuivre la réflexion collective chercheurs – acteurs, à partir de la présentation de l'analyse des résultats de modélisation énergétique des variantes urbaines issues du premier atelier, ainsi qu'une analyse de sensibilité réalisée sur différents indicateurs urbains. Lors de ce second atelier, nous avons demandé aux groupes d'aller plus loin dans leurs propositions en travaillant, sur deux variantes d'optimisation énergétique à choisir parmi *économe, fraîche ou productive*.

4. AVANCEMENTS

4.1. Introduction

Nous présentons dans cette partie centrale de notre rapport, les avancées de notre projet lors de cette seconde année du projet.

La première année, nous avons principalement travaillé sur trois tâches concomitantes : la définition des archétypes sur l'aire urbaine de Toulouse, la définition et l'imbrication des échelles spatiales, et la mise au point d'un outil d'évaluation énergétique multi-échelle. Ces tâches ont bien sûr été complétées ou achevées lors de la seconde année. Nous avons parallèlement initié les tâches liées aux analyses de sensibilité et à l'optimisation énergétique des archétypes. Mais la plus-value de cette seconde année, réside davantage dans notre travail commun sur l'intégration dans les pratiques architecturales et urbaines au travers d'ateliers participatifs.

Nous avons souhaité, en adéquation avec les objectifs initiaux de recherche, travailler davantage nos propositions dans un processus ouvert d'intégration aux pratiques de projet et d'appropriation par les professionnels.

Plutôt que de présenter nos propositions d'archétypes optimisés à un panel de professionnels en fin de projet pour un retour critique, nous avons en effet pris le parti d'intégrer dans le processus de recherche une réflexion commune *chercheurs – acteurs* sur l'évolutivité des archétypes urbains : **ouvrir, focaliser et limiter le champ des possibles au filtre croisé des modèles et des praticiens**. Ce souci de transférabilité aux acteurs du territoire et aux partenaires techniques, nous a obligé à « inventer » des méthodes pour faire adhérer l'ensemble des participants.

Nous avons donc construit et organisé un cycle de deux ateliers participatifs et d'une restitution « publique » ciblée. Les deux ateliers ouverts à un panel de chercheurs et d'acteurs de l'aménagement ont respectivement eu lieu en Novembre 2016, et en Mars 2017. La restitution est prévue en Février 2018.

La logique de ce cycle a été la suivante. Nous avons préparé une analyse énergétique de trois archétypes urbains représentatifs, présentée dans la partie 4.3. Nous avons ensuite initié une réflexion collective acteurs- chercheurs, lors d'un premier atelier sur l'évolutivité de la forme urbaine de ces archétypes dans un objectif d'optimisation de la performance énergétique. Cet atelier ouvert à des chercheurs et des praticiens, a permis d'aboutir à la co-construction d'une évolutivité possible et consensuelle des archétypes urbain. Cet atelier est présenté dans la partie 4.4. L'équipe de recherche a ensuite développée une modélisation énergétique des archétypes modifiés à l'atelier 1 (Partie 4.5), ainsi qu'une analyse de sensibilité de la performance énergétique d'un quartier générique à différents indicateurs typo-morpho-énergétiques (Partie 4.6). Ces éléments ont servi de socle à un second atelier participatif, qui a permis de poursuivre la

réflexion collective *chercheurs – acteurs*. Lors de ce second atelier, nous avons demandé aux groupes d’aller plus loin dans leurs propositions en travaillant, sur deux variantes d’optimisation énergétique à choisir parmi *économe, fraîche* ou *productive*.

Ce second atelier est présenté en partie 4.7.

Ces deux ateliers seront suivis, lors de la dernière année du projet, par une restitution sous la forme de débat ouvert à l’ensemble des participants aux deux ateliers

Cette approche a permis de croiser directement des approches « top-down » issues des approches théoriques de la Recherche, avec des approches « bottom-up » issues des propositions émanant des ateliers participatifs. Ceci améliore la pertinence du champ d’exploration des variantes urbaines.

Nous avons ainsi structuré ce chapitre « Avancements » en plusieurs parties :

- Synthèse du premier rapport intermédiaire,
- Evaluation énergétique et solaire des archétypes initiaux,
- Premier atelier participatif « production de projets urbains »,
- Evaluation énergétique et solaire des archétypes modifiés,
- Analyse de sensibilité énergétique des indicateurs typo-morphologiques,
- Deuxième atelier participatif «évaluation et production de projets urbains »,
- Analyse de sensibilité énergétique contextualisée,
- Cahier des charges pour l’optimisation.

4.2. Synthèse du rapport intermédiaire de la première année

Trois briques principales avaient été développées lors de la première année :

- la définition des archétypes sur l'aire urbaine de Toulouse ;
- la définition et l'imbrication des échelles spatiales ;
- la mise au point d'un outil d'évaluation énergétique multi-échelle.

Ces tâches étaient caractérisées par des niveaux d'avancement très variables. Nous nous étions, par exemple, largement focalisés sur la tâche 1, tâche qui a mobilisé l'ensemble des équipes du projet, alors que certaines autres tâches n'ont été qu'initiées pendant cette période.

Dans les tâches 1, *Définition des archétypes sur l'aire urbaine de Toulouse*, nous partions d'une revue de littérature sur les formes urbaines et indicateurs morpho-énergétiques, pour croiser des approches descendantes (projet MapUCE, détermination d'un système d'indicateurs morpho-énergétiques) et d'approches montantes (approches PLU, PLUiH). Ceci nous a permis de définir des études de cas caractéristiques de différentes typologies urbaines, de différentes époques architecturales et de différentes centralités. Pour caractériser ces études de cas retenues, nous proposons des archétypes appelés « superblocs » classés selon des critères variés (typologie du bâtiment, discontinuité, mitoyenneté, délimitation ...).

Dans la tâche 2, *Modélisation des archétypes existants*, nous proposons à partir des contraintes et opportunités offertes par l'analyse archétypale précédente, la définition de plusieurs échelles spatiales emboîtées correspondant à des niveaux de description variables (Level Of Definition- LOD).

Dans la tâche 3, *Modélisation prospectives variantes aux archétypes*, à partir d'une revue de littérature sur les outils d'analyse énergétique existant à l'échelle urbaine, dans un contexte de description multiscale de l'environnement, nous avons comparé les environnements logiciels les plus adaptés, les avons testé sur une étude de cas urbaines, mais aussi avons étudié les formats et structures de données les plus adaptés à l'échelle urbaine, pour proposer une architecture logicielle adaptée à la construction d'une prémaquette d'outil d'évaluation multiscale.

Dans la tâche 6, *Application à des études de cas*, nous avons croisé deux approches :

1. l'ancrage des travaux de recherche sur des questionnements architecturaux et urbains actuels et locaux, à partir notamment des retours d'expérience de l'auaT ;
2. le déclenchement des réseaux d'acteurs locaux, pour permettre d'organiser des ateliers participatifs.

Pendant cette première année du projet, nous avons parallèlement appris à nous connaître et à développer une culture commune entre les différentes sensibilités des

membres de l'équipe (architectes, ingénieurs, géographes, aménageurs et informaticiens), autour d'une approche morpho-énergétique des projets urbains. Cette variété des origines thématiques a permis de développer des tâches variées, complémentaires et concomitantes. Nous sommes conscients qu'à l'instar de la première année d'une thèse de doctorat, l'état d'avancement que nous avons proposé ne permettait pas toujours de percevoir l'édifice final, derrière les briques que nous avons construites. Les liens entre tâches ont été largement affinés dans ce deuxième rapport.

Les conclusions provisoires les plus prégnantes que nous pouvons tirer de la première année de travail ont été les suivantes :

1. l'approche croisée *top-down- bottom-up* (archétypes - étude de cas) semble pertinente, et peut offrir une plus-value décisionnelle importante aux aménageurs

Les projets actuels travaillant sur l'énergétique urbaine sont axés pour la plupart sur une approche *top-down*. L'originalité de notre approche est qu'elle vise à mettre en perspective ces approches, avec des approches *bottom-up*, en interrogeant les archétypes définis à partir d'approches théoriques, au filtre de cas réels (et d'ateliers participatifs, dans la suite), pour être en adéquation avec les modes opératoires des équipes de concepteurs et avec les données disponibles qu'ils manipulent dans les projets urbains. Pour définir des archétypes urbains sur l'aire urbaine de Toulouse, notre méthode de travail a évolué ainsi entre :

- les propositions de typologies architecturales et urbaines qui permettent de caractériser les opérations, de les classer (définition des archétypes),
- des études de cas (opérations déjà réalisées) afin d'une part d'identifier les indicateurs urbains, d'autre part d'intégrer les données du projet propres aux modes opératoires des équipes de concepteurs (nombre d'habitants, surface de plancher, efficacité énergétique etc.)

Le passage entre la réflexion théorique sur les archétypes et les études de cas (et les ateliers participatifs, dans la suite), a permis de développer un certain nombre de réflexions sur la définition des limites des opérations étudiées, ou sur l'emboîtement d'échelles ; ceci nous a permis de sélectionner quatorze études de cas, répondant aux critères retenus dans cette réflexion croisée.

2. l'emboîtement des échelles spatiales retenu dans notre projet, bien que difficile à mettre en œuvre dans les environnements logiciels étudiés, **semble nécessaire à une évaluation morpho-énergétique raisonnée**, permettant un compromis entre précision et temps de calcul.

Nous avons ainsi choisi, de définir trois zones emboîtées :

1. la zone d'intérêt, échelle des « superblocs » ou des bâtiments types modélisés très finement en termes de morphologie (3D) et de matérialité ;
2. l'échelle du voisinage, une zone « tampon » caractérisant l'environnement de cet archétype détaillé, modélisée en 2D et ½ ;
3. L'échelle du quartier permettant la définition des masques lointains influents – échelle du quartier, un deuxième “buffer” d'un rayon de 700m à partir du centre de la zone d'étude.

Cette approche multiscalaire a permis de faire évoluer raisonnablement et plus simplement les formes urbaines les plus représentatives du point de vue de leur appartenance au tissu urbain existant et de leur capacité à se reproduire dans le futur.

3. l'ouverture de notre projet à des acteurs urbains locaux, souhaité initialement en fin de projet, a été avancé avec l'organisation d'ateliers participatifs par l'aua/T, dès le début de la seconde année du projet (novembre 2016). Ces ateliers destinés aux professionnels locaux (maîtres d'ouvrage, aménageurs, urbanistes, architectes, bureaux d'études techniques, promoteurs, entreprises de matériaux) ont permis de passer progressivement de l'accompagnement du projet Multiplicités à sa co-construction entre acteurs et chercheurs.

Les travaux associés à la préparation, à la tenue et à l'exploitation de deux ateliers participatifs croisant chercheurs et acteurs, ont largement accaparé, nous le verrons dans la suite, notre emploi du temps de cette seconde année. Ils ont nécessité la création d'une tâche 7, que nous n'avions pas anticipée lors du dépôt du dossier ADEME.

4.3. Evaluation énergétique et solaire des archétypes initiaux

4.3.1. Définitions initiales

Objectif

Ce chapitre est dédié à la discussion de l'ensemble des résultats de simulation énergétique des trois archétypes étudiés dans leur état original.

Nous avons évalué trois réponses principales : les besoins de chauffage, les besoins de refroidissement, et la quantité d'énergie solaire incidente sur les différentes surfaces des bâtiments (l'irradiation solaire). Pour les besoins énergétiques, les résultats sont présentés en kWh par unité de volume (en m³) et pour l'irradiation solaire, en kWh par m² de surface de toiture.

Cette première évaluation par quartier nous a permis de construire le lien de cause et effet entre les paramètres typo-morphologiques et les diverses réponses énergétiques.

Méthode

Pour cette étude, nous avons employé la modélisation numérique telle qu'explicitée dans le premier rapport intermédiaire. Suite aux tests comparatifs réalisés avec différents outils, nous avons donc choisi une modélisation énergétique à l'aide de l'outil CitySim, développé par le LESO (EPFL- <https://citysim.epfl.ch/>).

4.3.2. L'archétype BELFORT

A partir de cette première évaluation énergétique de l'îlot Belfort, nous avons remarqué un certain nombre de propriétés spécifiques :

- Une forte hétérogénéité des besoins de chauffage liée à une variation importante de la contiguïté entre bâtiments, les bâtiments placés aux angles de l'îlot consommant par exemple plus d'énergie (par m³) que les bâtiments courants.
- Des besoins de chauffage relativement importants dus à une technologie de murs de briques non-isolés.
- Une consommation par unité de volume beaucoup plus faible des bâtiments de grande dimension et compacts, que leurs homologues de petite taille. La compacité des bâtiments joue donc un rôle important sur les consommations de chauffage (Figure 6).

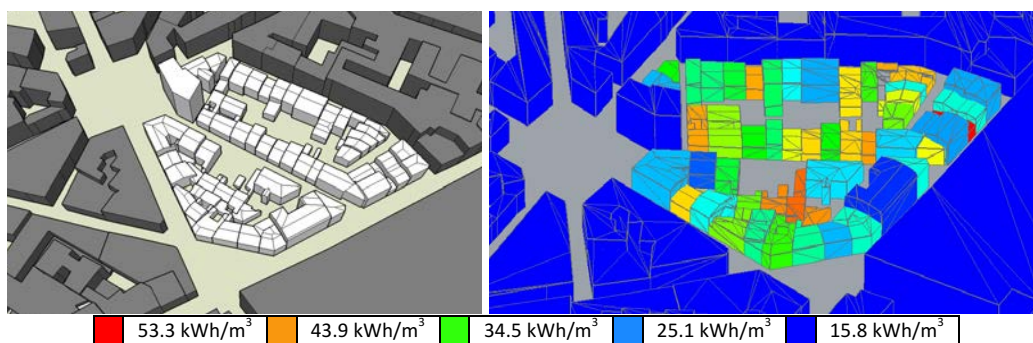


Figure 6 : besoins de chauffage par unité de volume bâti par an pour l'îlot Belfort.

- Des besoins de refroidissement relativement importants dus à la technologie des murs de brique non-isolés.
- Une variation relative plus faible des besoins de refroidissement que les besoins de chauffage entre les bâtiments (Figure 7).

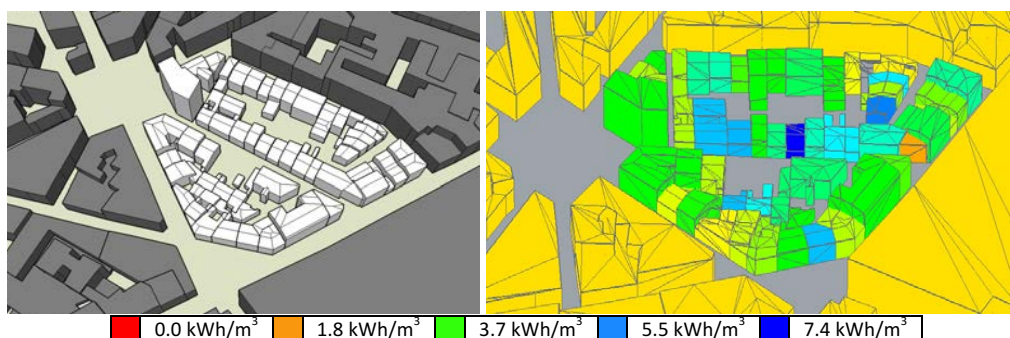


Figure 7 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Belfort.

- Une variation importante entre le potentiel de captation solaire des parois verticales et des toitures.
- Une variation relative faible des irradiances solaires sur les différents pans d'une même toiture, cet indicateur étant caractéristique d'une moyenne annuelle d'irradiation.
- Une variation relative faible des irradiances sur les façades verticales, même sur les façades bien orientées (sud-est à sud-ouest), due aux effets combinés des réflexions multiples et des ombres portées (Figure 8).

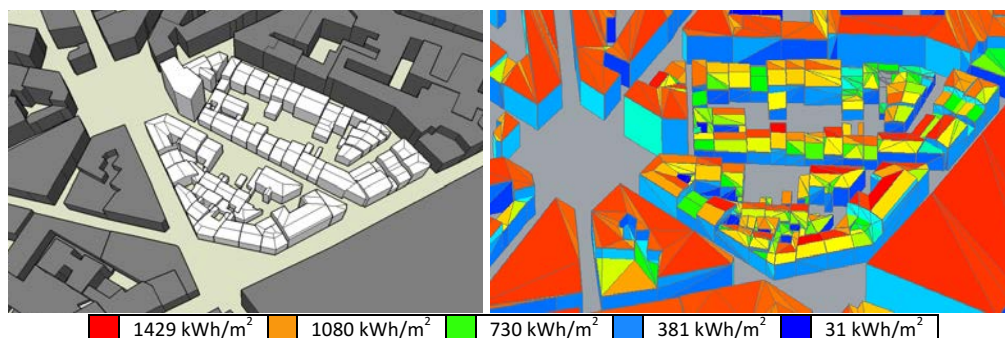


Figure 8: irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Belfort.

4.3.3. L'archétype HERS

A partir de cette première évaluation énergétique de l'îlot Hers, nous avons remarqué un certain nombre de propriétés spécifiques :

- Une forte homogénéité des besoins de chauffage entre bâtiments de même taille, et de même direction.
- Des besoins de chauffage relativement importants, car pénalisés par la présence des murs en béton non-isolés.
- Des besoins de chauffage qui bénéficient toutefois de la compacité des bâtiments (Figure 9).

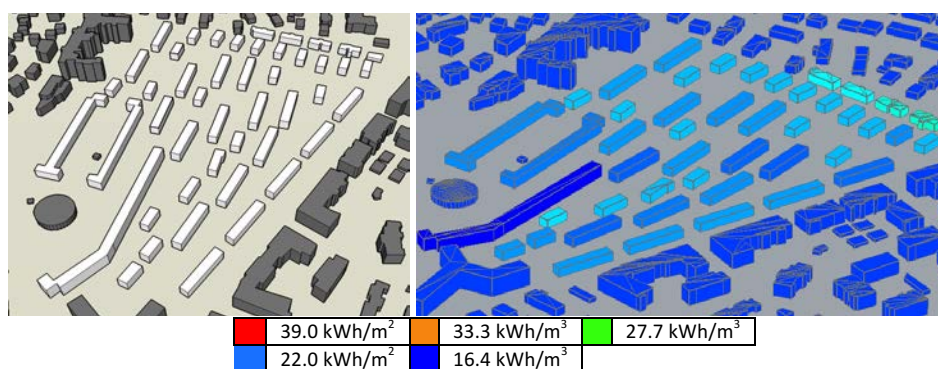


Figure 9: besoins de chauffage par unité de volume bâti par an pour l'îlot Hers.

- Des besoins de refroidissement relativement importants dus à la technologie des murs en béton non-isolés.
- Une variation relative très faible des besoins de refroidissement entre les bâtiments, de par leur même morphologie, leur même orientation et l'absence d'ombres portées (Figure 10).

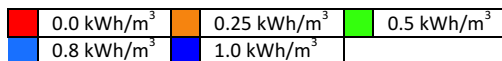
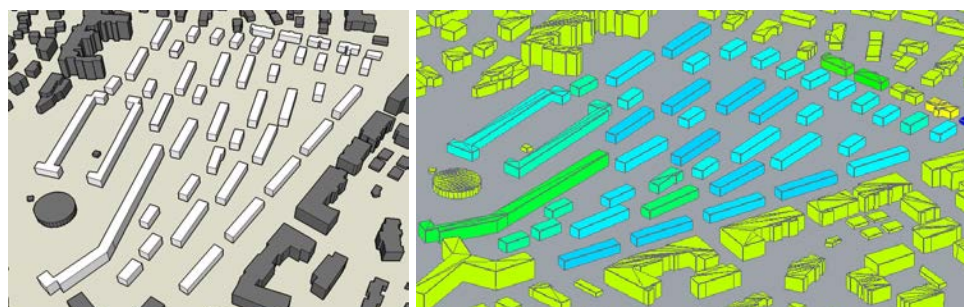


Figure 10 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Hers.

- Une variation importante entre le potentiel de captation solaire des parois verticales et des toitures.
- Une variation relative faible des irradiances solaires sur les différents pans d'une même toiture, cet indicateur étant caractéristique d'une moyenne annuelle d'irradiation.
- Une variation relative faible des irradiances sur les façades verticales, orientées dans les grands bâtiments à l'est et à l'ouest (et dans les petits au nord et au sud), due à l'effet de moyenne sur l'année (donc la journée), ainsi qu'à l'absence d'ombres portées (Figure 11).

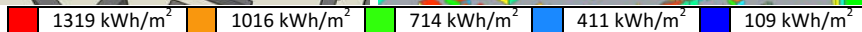
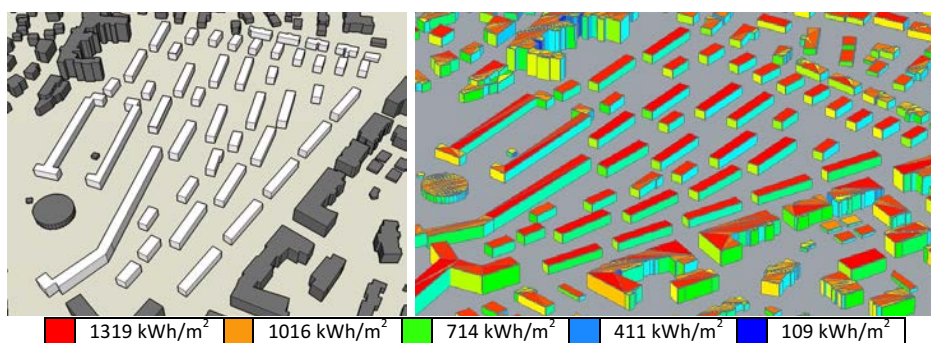
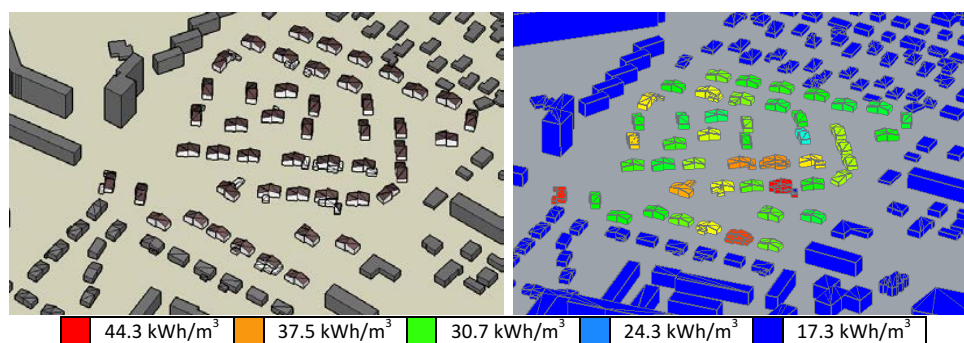


Figure 11 : irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Hers.

4.3.4. L'archétype CASTORS

A partir de cette première évaluation énergétique de l'îlot Castors, nous avons remarqué un certain nombre de propriétés spécifiques :

- Une forte homogénéité des besoins de chauffage entre bâtiments de même taille, et de même direction.
- Des besoins de chauffage relativement importants, car pénalisés par la technologie des murs en béton non-isolés.
- Des incohérences apparaissent sur deux bâtiments présentés en rouge dans la figure ci-dessous, incohérences probablement dues à un modèle géométrique partiellement ouvert. Nous devons réitérer la modélisation pour corriger cette erreur (Figure 12).



- Des besoins de refroidissement relativement importants dus à la technologie des murs en béton non-isolés.
- Une variation relative très faible des besoins de refroidissement entre les bâtiments de même orientation, de par leur même morphologie et l'absence d'ombres portées.
- Des incohérences apparaissent sur deux bâtiments présentés en vert dans la figure ci-dessous, incohérences probablement dues à un modèle géométrique partiellement ouvert. Nous devons réitérer la modélisation pour corriger cette erreur (Figure 13).

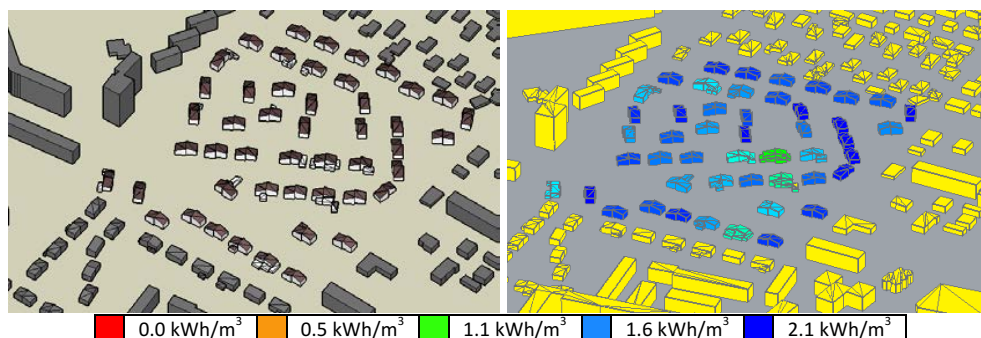


Figure 13 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Castors.

- Une variation importante entre le potentiel de captation solaire des parois verticales et des toitures.
- Une variation relative faible des irradiances solaires sur les différents pans d'une même toiture, cet indicateur étant caractéristique d'une moyenne annuelle d'irradiation (Figure 14).

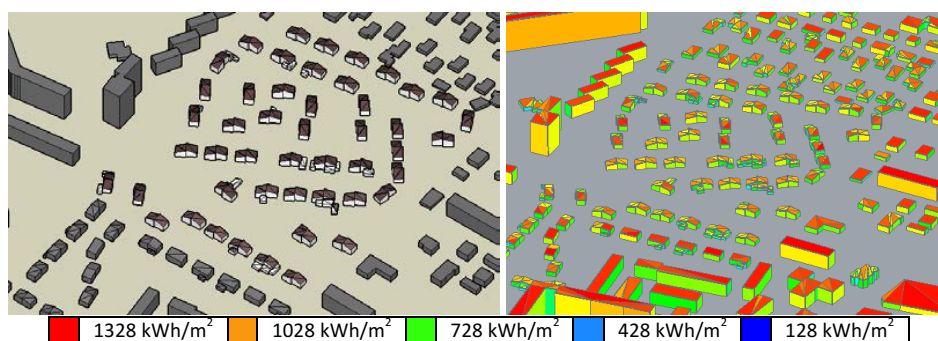


Figure 14 : irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Castors.

En comparant les évaluations énergétiques sur les trois quartiers, nous pouvons remarquer des similitudes fortes entre les trois archétypes notamment sur un certain nombre d'invariants :

- Une forte homogénéité des besoins de chauffage et de refroidissement entre bâtiments de même taille, et de même direction, dans la mesure où ceux-ci sont non contigus.
- Des besoins de chauffage et de refroidissement relativement importants, dans les trois quartiers, car pénalisés par le mauvais niveau d'isolation des murs et toitures.
- Une variation importante entre le potentiel de captation solaire des parois verticales et des toitures.
- Une variation relative faible des irradiances solaires sur les différents pans d'une même toiture.

Toutefois, l'archétype Belfort diverge des deux archétypes Castors et Hers basés sur des modèles morphologiques de bâtiments non contigus, en termes de besoins de chauffage. La contiguïté entre bâtiments à Belfort y génère des hétérogénéités très importantes.

4.3.5. Analyse comparative

Pour affiner l'analyse des besoins de chauffage et de refroidissement ainsi que le potentiel solaire, nous abordons maintenant une analyse comparative d'indicateurs typo-morphologiques sur les trois archétypes (Tableau 1).

Echelle	FICHES DESCRIPTIVES	Indicateurs Typo-morphologiques	Immeuble continu sur ilot fermé (Belfort)	Pavillon semi-continu (Bagatelle)	Pavillon continu sur ilot ouvert (Château de l'Hers)
FORME URBAINE	1	COS	3,7	0,35	0,6
	2	CES	0,65	0,17	0,2
	3	Compacité	3	5	6
	3	Contiguïté	1	0	0
	-	Densité humaine			
	-	Taille parcelle (m ²)	812	716	-
	4	Emprise espaces verts (m ²)	354	17308	9767
	5-6	Emprise eau (m ²)/perméabilité	0	0	0
	7	Prospect	2,1	0,6	1,0
	7	Largeur rue (m)	8	10	10
	7	Gabarit / hauteur (m)	17	6	10
	7	Ecart-type hauteur (m)	5	2	2
BÂTIMENT	8	Toiture (pente)	Multiple	Double pente 15%	Double pente faible
	8	Surface de toiture/captation solaire	528	135	345
	9	Orientation façades	Nord-est - Sud-ouest	Nord-est - Sud-ouest	Est-Ouest
	7	Hauteur	17	6	
	7	Longueur	8	16	45
	7	Profondeur	12	8	8
	10	Protections solaires	non	non	non
ENVELOPPE	11	Albédo	0,2	0,2	0,2
	12	Isolation (coefficient U)	1,3	0,9	0,9
	12	Inertie thermique	Moyenne	Lourde	Lourde
	13	Ratio vitrage	0,4	0,1	0,2
	13	Facteur solaire	0,8	0,6	0,6
	13	Transmittance vitrage	1,6	1,3	1,3

Tableau 1 : Analyse comparative d'indicateurs typo-morphologiques sur les trois archétypes.

Nous pouvons tirer un certain nombre d'enseignements de cette analyse comparative.

Le Quartier Belfort est caractérisé par des indicateurs COS, CES, Contiguïté, prospect, gabarit, surface de toiture pour la captation solaire, hauteur des bâtiments, relativement élevés par rapport aux autres quartiers. Par contre l'emprise espaces verts

y est très faible. Le niveau d'isolation des parois, la longueur des bâtiments et l'inertie des bâtiments y sont plus faibles que dans les autres quartiers.

La largeur des rues, le facteur solaire, la transmittance des vitrages sont par contre relativement stables entre les quartiers.

De par ces nombreuses divergences entre un quartier hypercentral historique (Belfort) et une trame homogène discontinue (Hers et Castors), on devrait s'attendre à des variations importantes entre besoins énergétiques des différents quartiers.

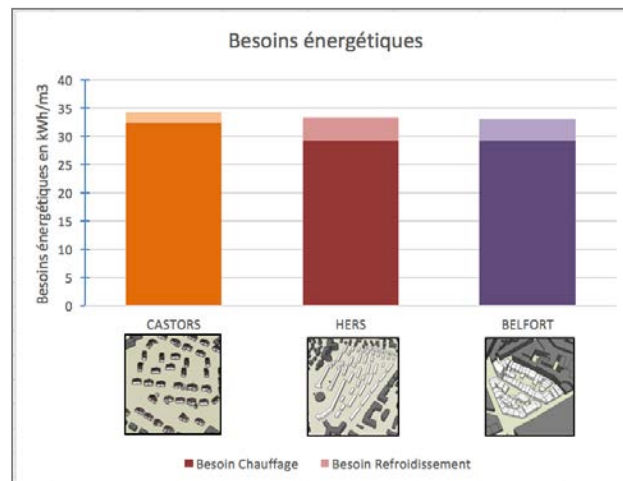


Figure 15 : Besoins de chauffage et de refroidissement dans les trois archétypes.

Or, il n'en est rien ! Le quartier Belfort offre des bilans en termes de besoins pour le chauffage, besoins pour le refroidissement, et besoins totaux, très proches des autres quartiers (Figure 15).

L'effet bénéfique de certains indicateurs sur les besoins énergétiques est donc contrebalancé par l'effet négatif d'autres indicateurs.

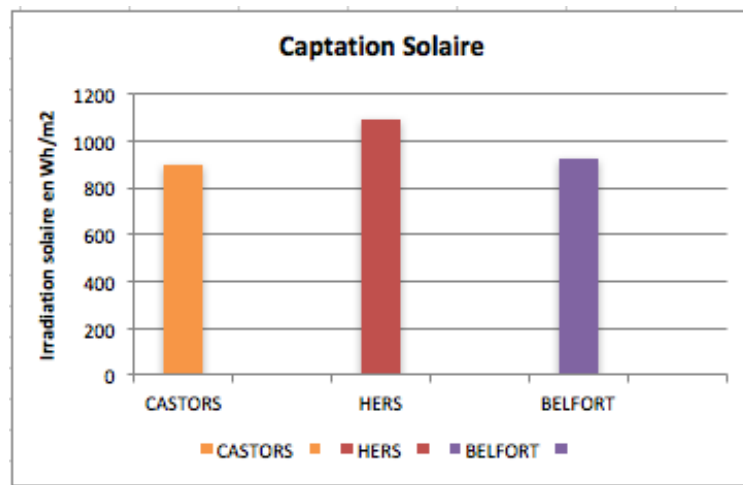


Figure 16 : Potentiel de captation solaire sur les toitures dans les trois archétypes.

En termes de potentiel de captation solaire sur les toitures (Figure 16), le quartier de l'Hers se démarque des autres quartiers parce qu'il est constitué de bâtiments relativement élevés, de hauteurs homogènes, et suffisant espacés pour ne pas produire d'ombres portées les uns sur les autres. Toutefois le quartier Belfort capte très légèrement plus d'énergie solaire sur ses toitures que le quartier Castors. Le quartier hypercentral historique caractérisé par une hétérogénéité des hauteurs de bâtiments générant potentiellement des ombres portées sur les toitures, et une très forte contiguïté, se comporte mieux qu'une trame homogène discontinue. On remarque ainsi que le faible rendement d'une toiture urbaine est contrebalancé par l'isotropie des directions de toitures. Si on pousse plus loin le raisonnement, en comparant non plus des kWh/m² mais des kWh produits par chacun des quartiers, on peut affirmer que la plus forte densité de toitures dans un quartier historique (liée à la forte emprise bâtie) par rapport à un faubourg d'emprise bâtie discontinue et faible, générera des écarts encore plus importants en faveur d'archétypes tels Belfort. D'où l'intérêt évident de « solariser » la ville traditionnelle !

4.3.6. Conclusion

Cette analyse morpho-énergétique des trois archétypes initiaux fait apparaître des divergences importantes entre nos trois archétypes. Ce qui est toutefois paradoxal, c'est qu'in fine, le mètre cube chauffé ou climatisé à Belfort « coûte » autant que celui de l'Hers, par exemple, ou que l'irradiation solaire dans un quartier hypercentral historique peut être supérieure à celle obtenue dans un quartier de faubourg, moins dense et moins contigu. On voit donc que l'effet positif de certains indicateurs typomorphologiques vient contrebalancer l'effet négatif d'autres indicateurs : contiguïté vs. isolation, compacité vs. prospect... L'analyse de ces différents indicateurs est donc complexe. C'est pourquoi nous allons proposer dans la suite plusieurs analyses de sensibilité permettant de quantifier et de hiérarchiser l'effet positif ou négatif de chacun des indicateurs sur les bilans énergétiques et solaires des quartiers (voir chapitres 4.6 et 4.8).

4.4. Premier atelier participatif : « production de projets urbains »

4.4.1. Introduction

L'ouverture de notre projet à des acteurs urbains locaux, souhaité initialement en fin de projet, a été avancé à la deuxième année du projet, avec l'organisation d'un premier atelier participatif par l'aua/T, dès le 24 novembre 2016.

A partir d'une évaluation énergétique et solaire des archétypes définis présentée dans le chapitre précédent, l'ouverture de notre projet vers les équipes de concepteurs a pour objectif de contextualiser nos recherches au plus près des enjeux des projets urbains et architecturaux actuels. A partir de l'état d'avancement de notre projet sur l'identification de formes urbaines (archétypes _ rapport n°1), et de leur évaluation énergétique à l'état initial, il s'agit de proposer des scénarii qui correspondent aux pratiques et aux questionnements de la production de projet urbain. Ce dialogue *acteurs- chercheurs* permet de développer des approches environnementales et énergétiques qui organisent, classent, mettent à jour ces enjeux au sein de la pratique du projet.

Pour cela, ce premier atelier a pour objectif de valider les choix des critères énergétiques (Chapitre 4.3), et de développer plus largement une vision transversale et opérationnelle de la conception énergétique urbaine. Cet atelier est une première phase, un premier contact avec les équipes de concepteurs qui marque le début d'une coopération, d'une co-construction de la production et de la diffusion des connaissances produites dans le projet MultipliCités.

4.4.2. Objectifs

Cet atelier destiné aux professionnels locaux (maîtres d'ouvrage, aménageurs, urbanistes, architectes, bureaux d'études techniques, promoteurs, entreprises de matériaux) cherche à produire des connaissances sur une approche multicritères qui permettra de confronter les divers scénarii énergétiques à des paramètres qualitatifs (souvent non mesurables) en termes d'ambiances, de confort multi-sensoriel ainsi qu'en termes d'enjeux socio-économiques et politiques des variantes. Il s'agit d'échanger des réflexions entre le domaine opérationnel et le domaine de la recherche pour construire ensemble l'évolutivité de la forme urbaine dans un quartier.



Figure 17 : Flyer d'invitation au premier atelier participatif.

L'ouverture de notre projet à des acteurs urbains locaux (maîtres d'ouvrage, aménageurs, urbanistes, architectes, bureaux d'études techniques, promoteurs, et entreprises de matériaux) avec une approche interdisciplinaire pour ce premier atelier « production de projets urbains » a pour objectif de développer une réflexion et des propositions pour orienter l'avancement du projet MultipliCités selon deux principaux axes :

- la sélection de critères énergétiques pertinents,
- la contextualisation des enjeux énergétiques dans la pratique des équipes de concepteurs.

Choix des études de cas

Architectes, urbanistes, aménageurs, promoteurs, acteurs de l'énergie se sont retrouvés pour partager ensemble sur les leviers urbains a priori les plus pertinents et imaginer les évolutions possibles des quartiers (Figure 17). Pour cela, trois études de cas toulousaines ont été sélectionnées. Il s'agit de trois archétypes (immeuble continu sur îlot fermé, pavillonnaire semi-continu et pavillonnaire continu sur îlot ouvert) construits à des époques différentes et dans des contextes urbains variés.

Les trois quartiers retenus (Figure 18) sont :

- le quartier Belfort (noté *Belfort* dans la suite),
- la cité des Castors quartier Bagatelle, (noté *Castors* dans la suite),
- le quartier Château de l'Hers (noté *Hers* dans la suite).

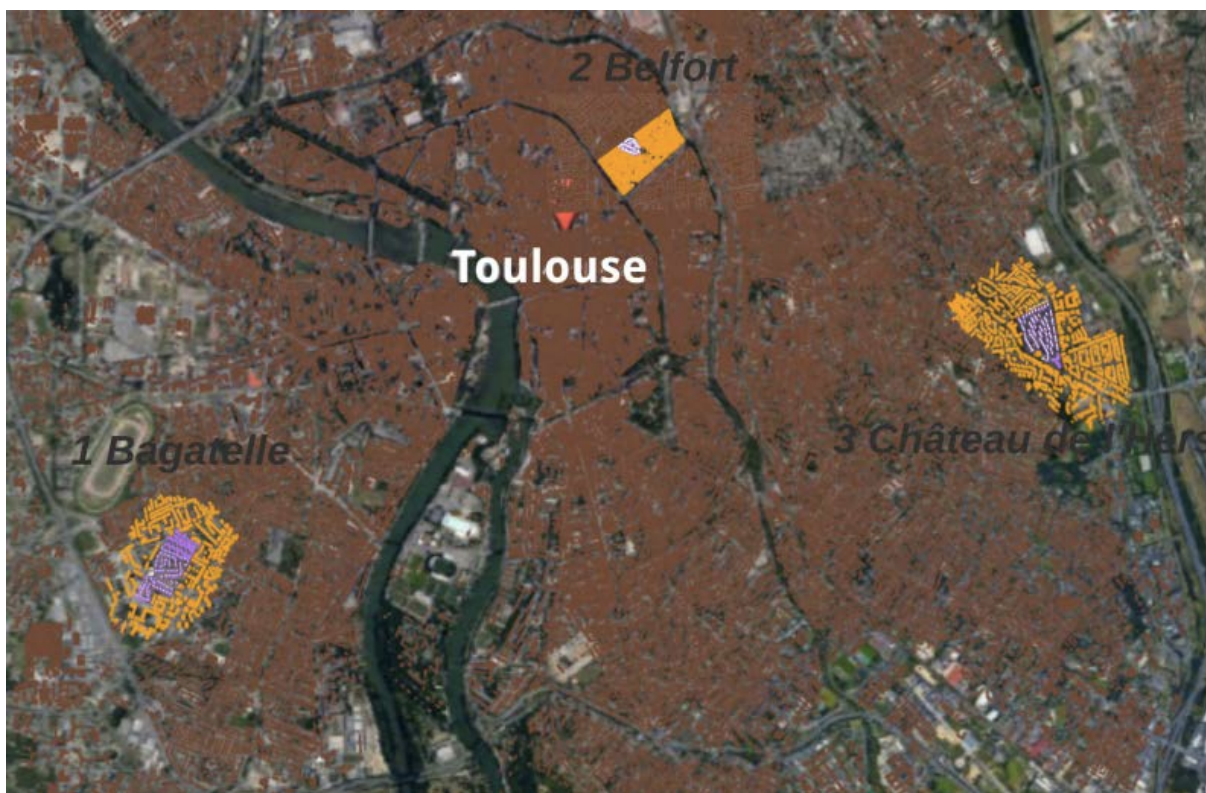


Figure 18 : Localisation des trois études de cas toulousaines

Thématiques énergétiques traitées

Lors des tâches 1 et 2 du projet MultipliCités, nous avons développé un ensemble d'indicateurs typo-morphologiques caractéristiques de l'impact énergétique de bâtiments et de leur environnement.

Le premier objectif de l'atelier est de croiser les regards sur les enjeux énergétiques pour la production du projet urbain. Pour cela, des fiches thématiques sur les enjeux identifiés ont été réalisées et sont présentées en Annexe 3 (chapitre 9.3). Ces enjeux correspondent aux indicateurs de notre étude interscalaire :

- la densité bâtie (COS)
- l'emprise au sol / la compacité (CES, compacité, contiguïté)
- la transmission et la capacité thermique d'une paroi (isolation, inertie thermique)
- les surfaces végétalisées (emprise des espaces verts)
- les emprises en eau (emprise eau)
- la perméabilité du sol (perméabilité)
- le prospect (prospect, largeur rue, gabarit, hauteur, écart-type/hauteur, profondeur)
- la captation solaire (toiture, surface toiture)
- les protections solaires (protections solaires)

- l'albédo (albédo)
- l'isolation et l'inertie des matériaux (isolation, inertie thermique)
- la transmittance des vitrages et le facteur solaire (facteur solaire, transmittance des vitrages).

Le second objectif de cet atelier est d'identifier les interactions entre les enjeux énergétiques, et les enjeux sociaux, économiques, politiques, etc.

Pour cela, un tableau composé de colonnes avec ces différents enjeux (sociaux, économiques, politiques, autres) a été préparé et a été instancié en séance par les différents groupes : les critères énergétiques identifiés pour le projet MultipliCités sont inscrits sur des étiquettes et des post-it permettant de compléter le tableau (Figure 21).

4.4.3. Participants

Une trentaine de personnes (Figure 19 - Tableau 2) ont participé à ce premier atelier couvrant les domaines de l'architecture, de l'urbanisme et de l'environnement.

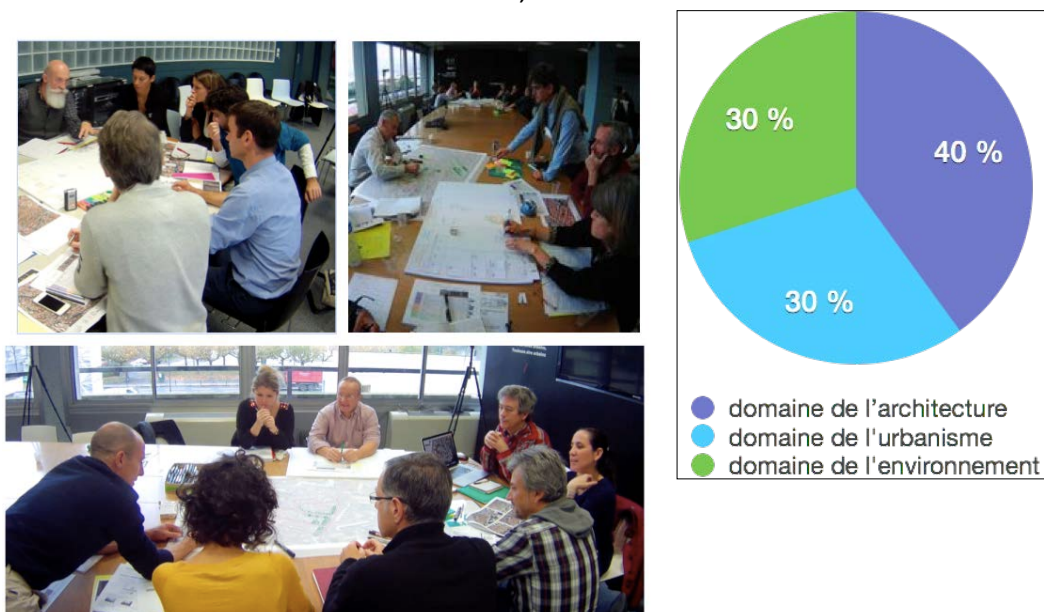


Figure 19 : Les participants au premier atelier participatif.

Groupe A	Groupe B	Groupe C
Alain Grimat - GGR	Jean-François Marty	Stéphane Jacq, ARUA
Pierre Roca d'Huyteza, d'une ville à l'autre	Erwan Marin, Agence COT	Hervé Ambal, Thersile Dufaud, David Rupp, AR357
Valérie Garrigue, architecte, Chargé de projets urbains	Edith Raillard, DOA	Samuel Roux, Chargé de projets urbains, DOA
Yves Gambier, CAUE 11	Jean Macau, ADN Promotion	Pauline Lefort
Véronique Tatry, ADEME	Sophie Lebreton, Écologie Urbaine	Adeline Reilé, environnementaliste
Jérôme Ionesco, architecte	Renaud Barres, CAUE 11	Philippe Millasseau
Agnès Domingo, environnementaliste	Florence Garros, architecte	
Quartier BELFORT	Quartier CASTORS BAGATELLE	Quartier CHATEAU DE L'HERS
Equipe du projet :		
Luc Adolphe	Patrice Contart	Genevière Bretagne
Tathiane Martins	Serge Faraut	Nathalie Tornay
	Géraldine Cazaux Ginestet	

Tableau 2 : Les participants au premier atelier participatif.

Approche pluridisciplinaire

Pour cet atelier, l'objectif est de travailler avec des professionnels des domaines de l'architecture, de l'urbanisme et de l'environnement dont les compétences sont variables : architecte, urbaniste, environnementaliste, architecte conseil, ingénieur, promoteur, etc., afin de développer une approche pluridisciplinaire.

Répartition pour les trois ateliers

Trois groupes de travail pluridisciplinaire sont établis pour se questionner sur chacune des trois études de cas sélectionnées, tel que décrit dans le Tableau 2.

4.4.4. Déroulement et résultats de l'atelier

Production de projets urbains

Chaque groupe de travail a investi les questionnements de la production de projets urbains à partir d'un des quartiers à étudier. Chacun a développé des problématiques spécifiques, à partir des fiches thématiques distribuées et présentées en Annexe 3 (chapitre 9.3). Des esquisses de projections urbaines ont été développées, et forment le socle des deux principaux questionnements : la définition des critères énergétiques et les interactions entre les enjeux énergétiques et les enjeux économiques, sociaux, politiques.



Figure 20 : Détails : Groupe Belfort, sur les usages, Groupe Castors, sur l'implantation du bâti, Groupe Hers, sur le contexte urbain

Synthèse sur les critères énergétiques

Lors de cet atelier, la sélection des critères énergétiques a fait l'objet de nombreux débats. Les groupes de travail ont fait émerger de nouveaux critères :

- Les différents groupes de travail ont proposé l'affinement de certains critères pour qualifier le « sol » :

Verbatim groupe Belfort

“La première rubrique qui nous a apparu importante d'ajouter, la question du sol, avec la question de la perméabilité, la question des plantations en sachant qu'il faut savoir distinguer les plantations basses des plantations hautes, la question de la texture du sous-sol, de leur rugosité, de leur clarté. Donc là très concrètement sur un îlot on a passé la rue Bayard en désactivé clair et en gros granulats. Et la rue Belfort en stabilisé renforcé. On a aussi rajouté pas mal d'arbres de hautes tiges si possible dans les cœurs d'îlots et sur l'espace public.”

Verbatim groupe Castors

“L'étude peut-elle prendre en compte l'impact de la zone imperméabilisée, qui accumule de la chaleur dans la journée, dans la réalité de ce qui se passe dans le site (...) Si le cœur d'îlot est bâti, comment compenser dans l'espace public ?”

Verbatim groupe Hers

« Les indicateurs qui ont été mis en place pour ce quartier, à nos yeux, nous semblent assez complet, mis à part le fait qu'il n'y a pas d'indicateur concernant le sol. Concernant les espaces non-bâti dans leurs qualités, par exemple, l'albédo du sol n'apparaît pas, la superficie enherbée, plantée n'apparaît pas, c'est des indicateurs à notre avis très importants, pour pouvoir appréhender le rapport au changement climatique et voir même au confort d'été et éventuellement au confort simplement... »

- Les différents groupes de travail ont souligné l'approfondissement des critères pour qualifier les usages :

Verbatim groupe Belfort

« Une troisième rubrique a été la question des usages, qui nous a paru assez importante, avec une série de choses, le fait que par exemple que si on avait une mixité d'usages, qu'on arrivait à avoir du bureau ou des équipements à la fois dans l'îlot, on pouvait aussi avoir des impacts différenciés sur justement l'usage de la clim', les consommations d'énergie en fonction des heures de la journée. Le fait de pouvoir donner dans les cœurs d'îlot des balcons assez larges y compris pour les bureaux, pour permettre aux gens de sortir travailler sur un balcon au nord en plein été, cela évitera qu'ils utilisent la clim'.

Verbatim groupe Hers

« Autre élément qui nous a semblé très important c'est le rapport d'usage, à savoir, le rapport aux déplacements piétons, le rapport à la voiture, le rapport à la vue, tous ces éléments font que l'interactivité d'un quartier et le rapport énergétique doit être appréhendé avec cette notion de qualité d'usage. »

La tableau suivant (Tableau 3) propose une réorganisation de l'ensemble des critères énergétiques selon cinq échelles : le contexte/environnement du quartier, le sol, les usages, les bâtiments, et l'enveloppe.

Echelle	Indicateurs Typo-morphologiques
Contexte / Environnement du quartier	Coefficient de l'environnement (ICU/IFU de la zone peut compenser)
	Coefficient de perméabilité urbaine de l'environnement
	Intensité automobile
	Eclairage public
	Accessibilité
	Ressenti moyen
	Masse thermique moyenne du quartier
	Usage du bâtiment / fonctions urbaines (commerce RDC)
	Accessibilité aux aménités urbaines / aux espaces verts (aux IFU en été)
	Présence de nuisances sonores
Sol*	Albédo – bien distinguer l'albédo du sol de celui des façades *
	Rugosité*
	Espaces verts/verdure (horizontaux et verticaux) *
	Densité de végétation*
	Occupation du sol/affectation du sol*
	Emprise par fonction urbaine*
Usages*	Mixité fonctionnelle*
	Réversibilité / adaptabilité / capacité à évoluer (isolation extérieure vs. Caractère patrimonial, survitrage intérieur) *
	Adéquation typologie/usages*
	Accessibilité au contrôle des ambiances*
	Profil(s) usage*
	Présence de compteurs intelligents*
Bâtiment	Organisation intérieure (<i>layout</i>) des logements
	Logement traversant (ventilation traversante)
	Capacités d'appropriation des espaces connexes au bâtiment (balcon, terrasse)
	Présence d'espace intermédiaire (privé – publique)
	Terrasses et balcons végétalisés à des usages particuliers
Enveloppe	Végétalisation de la toitures/façades
	Récupération des eaux pluviales
	Ratio de vitrage (double exposition)
	Coefficient de perméabilité de la façade
	Présence de puits de jour
	Protections solaires

*critères issus des synthèses de la séance d'atelier.

Tableau 3 : Les indicateurs typo-morphologiques proposés et réorganisés lors du premier atelier participatif.

Synthèse sur les interactions avec les enjeux énergétiques

Les ateliers ont marqué un postulat : “l’enjeu énergétique en soi ne suffit pas”. Les enjeux énergétiques doivent être accompagnés voire précédés par les enjeux sociaux et politiques.

Dans la pratique, l’enjeu fondamental se présente sous la forme “économie d’énergie”. L’enjeu énergétique est un enjeu culturel important : son acceptation se traduit par une réponse qui promeut la multiplication et la mutualisation des usages.

Chaque groupe a complété un tableau pour croiser les indicateurs énergétiques avec les indicateurs économiques, politiques et sociaux.

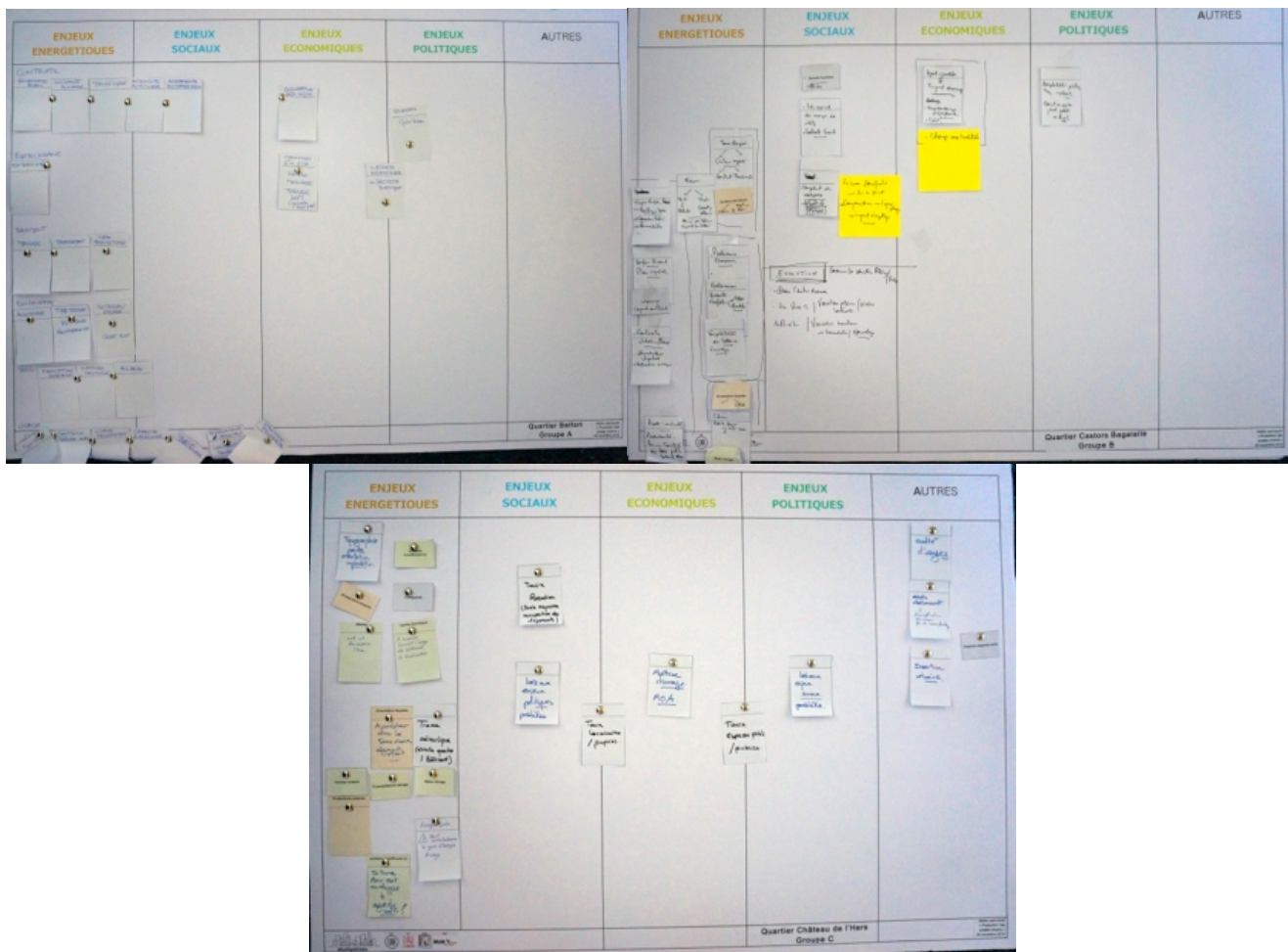


Figure 21 : Restitution des trois tableaux de correspondances entre enjeux et critères pour les trois groupes.

Cette étape a permis d’identifier des indicateurs ou critères qui ont pour objectif d’intégrer les enjeux énergétiques au sein des enjeux politiques, sociaux, économiques, culturels pour les équipes de concepteurs. Il s’agit de critères « opérationnels ».

- des indicateurs pour identifier l'évolution(s) urbaine(s), avec des indicateurs prospectifs, qui concernent l'identification de la structure urbaine par une approche historique et topographique (cours d'eau/végétation) propre à la pratique du projet urbain.
- des indicateurs économiques, liés à la facture énergétique pour développer un scénario financier ou économique.
- des indicateurs administratifs pour accompagner les démarches de demandes préalables (lien avec réseaux existants, photovoltaïque, etc.)
- des indicateurs pour sélectionner une opération afin de repérer les potentiels du secteur. Il s'agit d'analyser le type d'habitat (turn over des habitants, le pourcentage de locataires/propriétaires) et le type de propriétaire (grands bailleurs, particulier) pour affiner l'impact sur le découpage du foncier.

Verbatim groupe Belfort

"Après une autre rubrique nous a paru très importante c'est la question du contexte, cela veut dire que finalement il y a beaucoup de choses qui sont liées à ce qui va se passer autour de l'îlot et pas seulement dans les constructions et sur lesquelles en plus on peut influencer pour avoir un effet sans contre-effet. Si on arrive à ce que l'espace public soit plus tranquillisé, qu'il y ait moins de circulation automobile, qu'en plus les gens aient plus de plaisir à sortir dans la rue, globalement on va avoir des impacts immédiats et très forts sur le bilan énergétique du quartier."

Verbatim groupe Castors

"La notion d'acceptabilité sociale, par rapport à la densification, et avoir un impact à l'habitant qui soit moins fort l'échelle humaine, la nécessité de maintenir le découpage pittoresque qui existe aujourd'hui dans la rue. Maintenir pour les habitants, cette notion d'échelle humaine pour les densifications, pour continuer à percevoir les tissus urbains préexistants."

Verbatim groupe Hers

« Alors après il y a toute la réflexion sur l'enveloppe proprement dite, les matériaux, la date de construction du bâtiment est importante, contrairement aux autres quartiers, la dimension historique est beaucoup plus au centre, l'implantation des bâtiments a fait fi de toute l'historicité qu'il y a autour, donc un rapport d'implantation mono-orienté, appartement avec une logique traversante, et donc ces questions là, en terme d'appréhension des possibilités d'extension urbaine sont prépondérantes. »

4.4.5. Conclusion- Mise en perspective

La première étape de notre stratégie de co-construction acteurs- chercheurs a débuté avec ce premier atelier participatif. Celui-ci a permis de définir les premières évolutions/ variantes de projets urbains sur les trois études cas, à partir d'une analyse critique et contextualisée d'un ensemble d'indicateurs typo-morpho- urbains associés. Ces

variantes ont fait l'objet de modélisations énergétiques et solaires qui seront présentées dans le chapitre suivant (chapitre 4.5). A partir de ces modélisations et d'une étude de sensibilité énergétique d'indicateurs typo-morphologiques caractéristiques, nous avons organisé un deuxième atelier participatif, présenté dans le chapitre 4.7, pour aller plus loin en termes de propositions urbaines, et pour prolonger ce lien de questionnement, d'orientation stratégique de la production urbaine.

Un article sur cet atelier a été rédigé dans la revue d'actualités de l'aua/T (<http://www.aula-toulouse.org/spip.php?article1586>).

Sur le plus long terme, cette stratégie vise à la constitution d'une équipe pluridisciplinaire pour accompagner les questionnements de la conception énergétique de projets urbains. Cet atelier est donc le point de départ d'une collaboration qui se veut étroite entre les équipes d'acteurs urbains et les chercheurs sur la Ville. L'objectif est de continuer à développer des pistes de réflexion ensemble, pour contextualiser les questions énergétiques interscalaires, au sein de nouveaux modes opératoires chez les urbanistes, architectes, promoteurs, maître d'ouvrage, etc.

4.5. Evaluation énergétique et solaire des archétypes modifiés

4.5.1. Définitions initiales

Objectifs

Nous nous proposons d'évaluer la performance énergétique relative (en termes des besoins énergétiques et de potentiel de captation solaire) entre les îlots urbains originaux et les îlots urbains modifiés par les acteurs et chercheurs réunis lors du premier atelier participatif, ainsi que de réaliser une analyse comparative des îlots entre eux.

Cette étape permet d'une part de faciliter l'implication des différents acteurs de la ville dans l'approche interdisciplinaire proposée par notre recherche, notamment lors d'un second atelier (voir Chapitre 4.7), et d'autre part, d'alimenter un cahier des charges utilisable dans le processus d'optimisation (voir Chapitre 4.9).

Méthode

Nous allons effectuer une modélisation du bilan énergétique à l'aide du modèle *CitySim* (modèle de radiativité associé à un modèle thermique simplifié).

Nous allons également produire des cartes présentant des résultats relatifs (les cartes delta -Figure 24 et suivantes) permettant d'illustrer plus facilement cette analyse comparative.

Ces cartes sont réalisées à partir d'un outil que nous avons développé, s'intégrant dans la chaîne de traitement des résultats des simulations des archétypes initiaux et modifiés. Les fichiers de simulation CitySim correspondants étant issu d'une modélisation de la forme urbaine de ces archétypes réalisées à l'aide d'un logiciel de modélisation externe, eux-mêmes réinterprétés dans CitySim lors de l'import et de l'exportation des résultats de simulation, une identification directe dans la correspondance entre les entités de ces fichiers n'est pas permise. Une implémentation de la recherche d'une mise en correspondances entre les caractéristiques géométriques des entités urbaines des fichiers XML (produits par CitySim lors de l'évaluation énergétique) permet de déterminer les éléments du modèle (façades, bâtiments) qui ont été modifiés, supprimés ou ajoutés. Ceci permet ainsi de calculer l'évolution des valeurs des résultats de simulation selon chaque variable en les affectant à un élément urbain déterminé correspondant dans les deux modèles. Afin de produire des représentations tridimensionnelles de ces variations (et d'exploiter les possibilités de navigation et de calcul temporalisés par période intégré à Citysim), nous récréons ensuite un fichier de résultat de simulation intégrant ces valeurs de delta au sein d'un fichier directement interprétable au format CitySim en réutilisant la géométrie initiale.

4.5.2. L'Archétype BELFORT

A) Les modifications proposées par les praticiens de la Ville de Toulouse

Cet archétype est situé dans un quartier hypercentral historique. La prégnance de la contrainte patrimoniale, très fréquente chez les aménageurs urbains, semble avoir été limitée, notamment par rapport aux premiers échanges de l'atelier. Quatre bâtiments ont été remplacés par des placettes végétalisées. Certains bâtiments annexes en cœur d'îlot ont également été supprimés. Une tour de 33 mètres a été ajoutée au centre de l'îlot. Un ratio de vitrage de 20%, sur la moitié côté cour de la toiture, a été ajouté dans le but de simuler la présence de puits de jour (Figure 22).



Figure 22 : îlot Belfort initial et schéma de l'îlot proposé par les aménageurs (atelier participatif I).

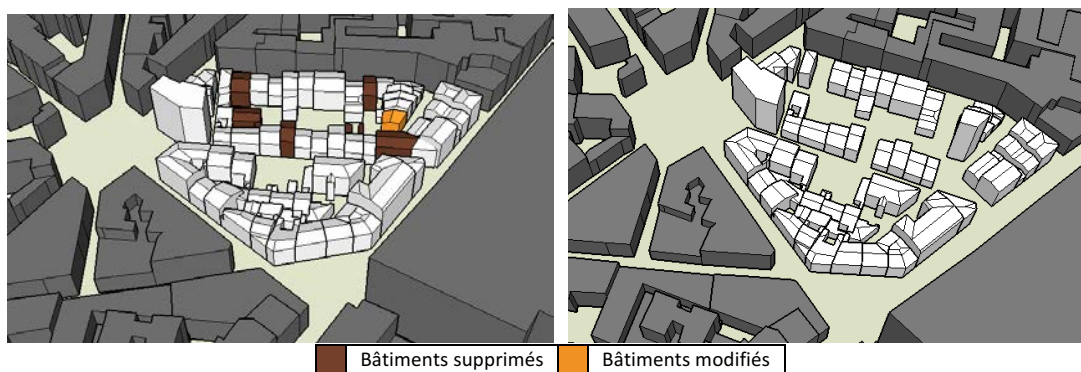


Figure 23 : morphologie de l'îlot Belfort existant (à gauche) et de l'îlot Belfort modifié (à droite).

Indicateur	Description	Belfort original	Belfort modifié
CES	Surface au sol bâtie / surface totale	0,65	0,57
COS	Surface plancher / surface totale	3,7	> 3,7
Compacité	Surface enveloppe / volume	3,0	> 3,0
Prospect moyen	Hauteur bâtie moyenne / largeur rue	2,1	2,0
Hauteur moyenne	Hauteur bâtie moyenne	17	25
Albédo Sol	Facteur réflectivité pour le sol	0,15	0,15
Albédo Façades	Facteur réflectivité pour les murs	0,3	0,3
Isolation	Conductivité	Pas d'isolant (1,3)	Isolant par l'intérieur (0,9)
Ratio de vitrage	Ratio de vitrage sur unité de façade	0,4	0,4

Tableau 4 : synthèse des changements apportés par les aménageurs à l'îlot Belfort.

La suppression de bâtiments proposée par les praticiens a entraîné d'une part la réduction global du CES et d'autre part une réduction du prospect moyen dans l'îlot, ainsi qu'une diminution conséquente des masques solaires environnants. Deux résultats principaux peuvent être mis en avant : une augmentation des apports solaires (25%) sur l'ensemble des surfaces bâties, et une réduction des besoins de chauffage (de l'ordre de 30%) (Figure 24).

La Figure 24 ci-dessous présente la synthèse de ces informations grâce à des cartes d'écarts relatifs, c'est-à-dire des cartes affichant la différence, en $[\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{an})]$, entre le scénario proposé (modifié) et le scénario original.

Les bâtiments de l'îlot Belfort ne sont pas initialement isolés (scénario initial). Les praticiens ont donc proposé une rénovation basée sur l'intégration d'un isolant par l'intérieur, dans la composition des murs des bâtiments (Tableau 4), de façon à limiter les déperditions thermiques en hiver, et les gains excessifs en été. Cette modification a également participé de manière décisive à la réduction des besoins en chauffage et de climatisation. Pour l'îlot de Belfort, situé dans un quartier historique de Toulouse, les praticiens ont intégré les contraintes liées à la préservation du patrimoine construit, par exemple, les limitations liées au changement des matériaux de façade.

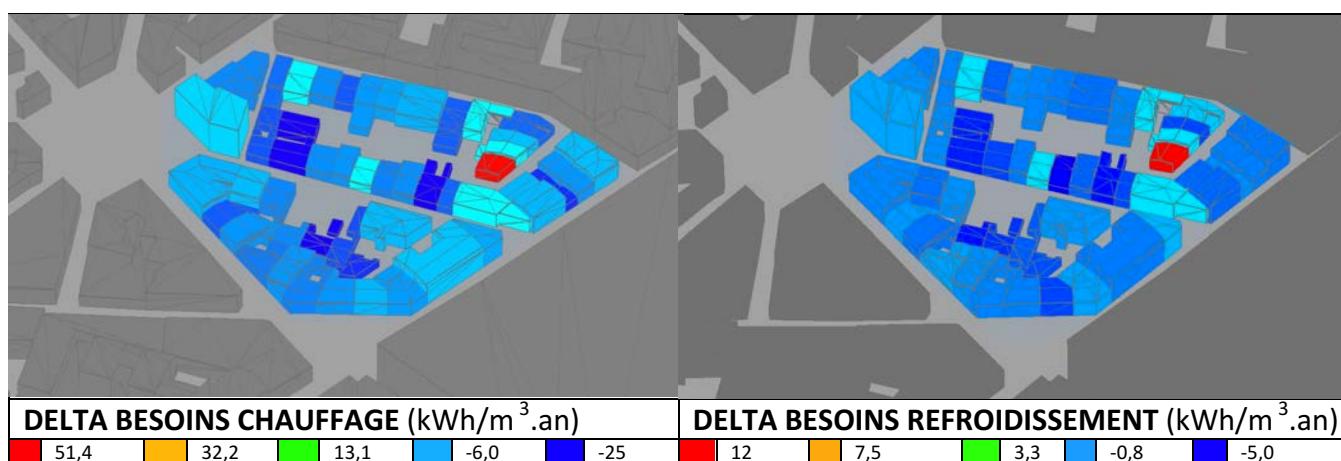


Figure 24 : cartes présentant les résultats de besoins énergétiques en valeur relative (delta des besoins de chauffage et de refroidissement, respectivement).

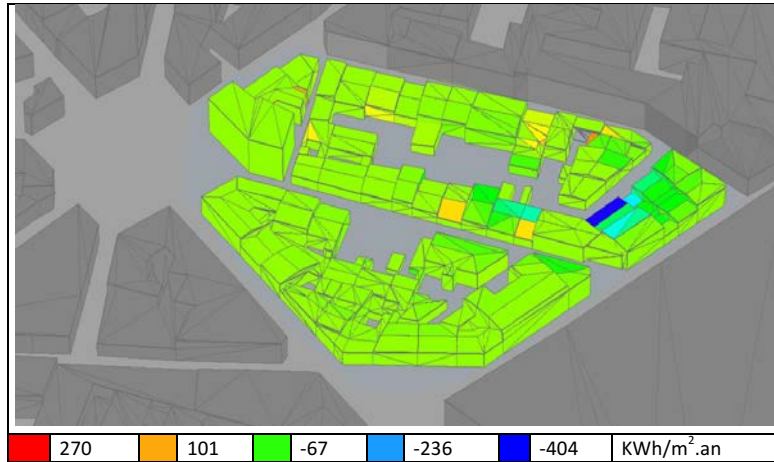


Figure 25 : carte présentant les résultats des apports solaires en relatif (delta de l'irradiation solaire).

4.5.3. L'Archétype HERS

Cet archétype composé de barres horizontales R+2 résidentielles a été légèrement modifié, notamment à partir de la création d'une mixité fonctionnelle souhaitée par les différents acteurs de la ville. En ce sens, un certain nombre de bâtiments tertiaires ont été ajoutés perpendiculairement aux barres existantes (Figure 26)

Un deuxième changement proposé a consisté à intégrer à la composition des murs, un isolant placé à l'extérieur.

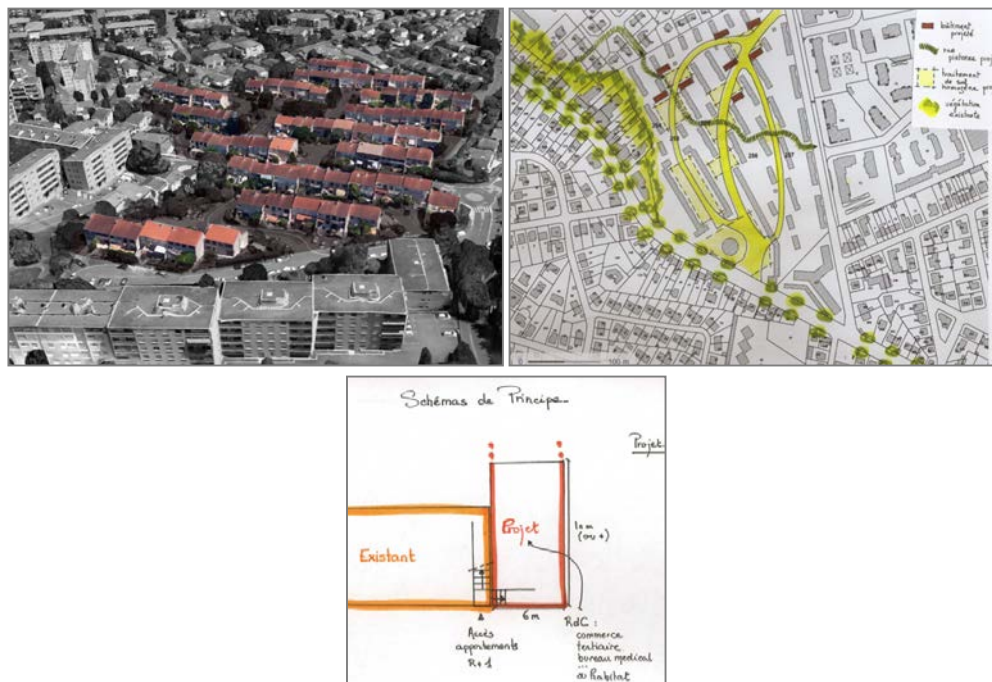


Figure 26 : îlot Hers initial et schéma de l'îlot proposé par les aménageurs lors de l'atelier participatif 1.

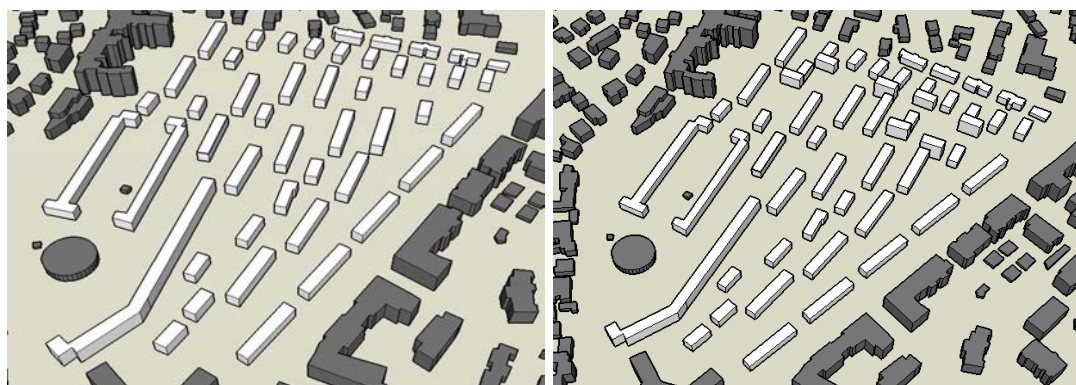


Figure 27 : morphologie pour l'îlot Hers existant (à gauche) et pour l'îlot Hers modifié (à droite).

Indicateur	Description	Hers original	Hers modifié
CES	Surface au sol bâtie / surface totale	0,20	> 0,20
COS	Surface plancher / surface totale	0,60	> 0,60
Compacité	Surface enveloppe / volume	6	6
Prospect	Hauteur bâtie / largeur rue	1	1
Hauteur moyenne	Hauteur bâtie moyenne	9	> 9
Albédo Sol	Facteur réflectivité pour le sol	0,25	0,25
Albédo Façades	Facteur réflectivité pour les murs	0,4	0,4
Isolation	Conductivité	0,9	Isolant par l'extérieur
Ratio de vitrage	Ratio de vitrage sur unité de façade	0,2	0,2

Tableau 5 : synthèse des changements apportés par les aménageurs à l'îlot Hers.

L'ajout d'un matériau isolant par l'extérieur dans la composition des murs de cet îlot a entraîné une importante réduction des charges de chauffage et de climatisation (jusqu'à 74%).

En ce qui concerne les apports solaires incidents sur les façades, nous avons pu remarquer une très faible variation de la moyenne de l'îlot. Néanmoins, il nous est possible de remarquer sur la Figure 29, l'impact direct de la création d'une mitoyenneté aux bords des barres et perpendiculairement à elles-mêmes, sur la réduction des apports solaires sur certaines façades. Cela explique également la réduction très remarquable des besoins de refroidissement des bâtiments.

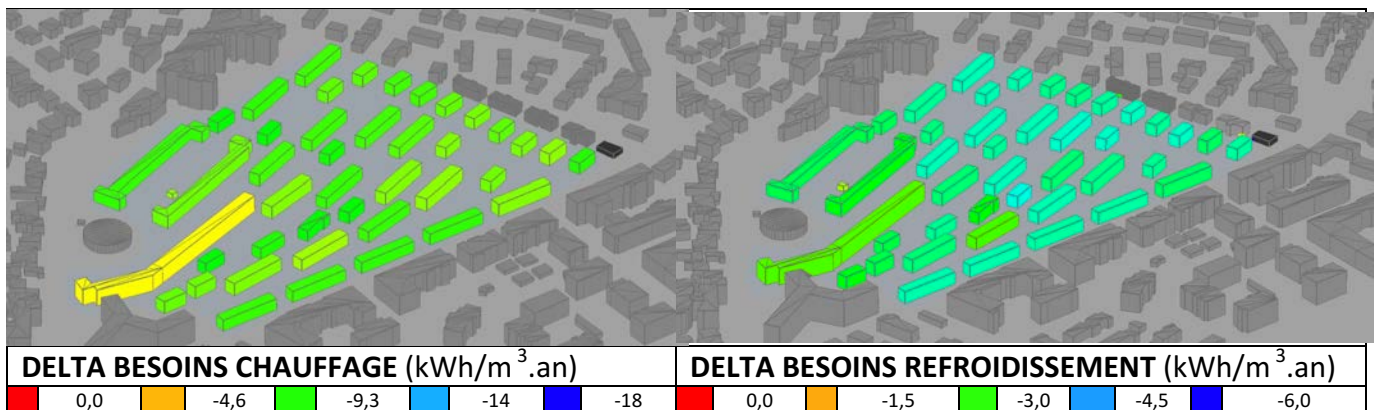


Figure 28 : cartes présentant les résultats de besoins énergétiques en valeur relative (delta des besoins de chauffage et de refroidissement, respectivement) pour l'îlot Hers.

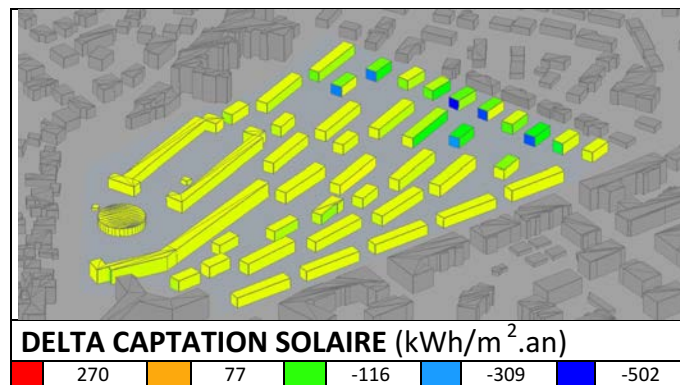


Figure 29 : carte présentant les résultats des apports solaires en relatif (delta de l'irradiation solaire) pour l'îlot Hers.

4.5.4. L'Archétype CASTORS

Dans ce quartier, ensemble de maisons jumelées, de nouveaux bâtiments R+2 ont été ajoutés entre deux maisons jumelées, pour augmenter le CES et la contiguïté. La composition des murs *parpaing plus isolant intérieur* a été conservée.



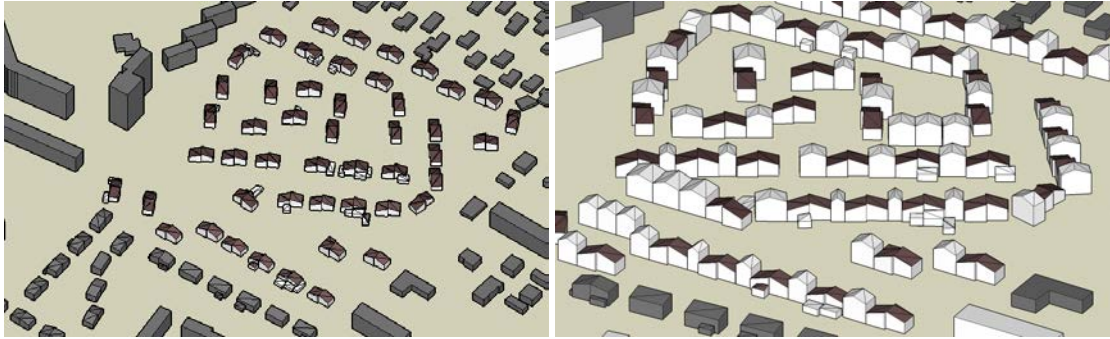


Figure 31 : morphologie pour l'îlot Castors existant (à gauche) et pour l'îlot Castors modifié (à droite).

Indicateur	Description	Castors original	Castors modifié
CES	<i>Surface au sol bâtie / surface totale</i>	0,17	0,20
COS	<i>Surface plancher / surface totale</i>	0,35	0,45
Compacité	<i>Surface enveloppe / volume</i>	5,0	< 5,0
Prospect	<i>Hauteur bâtie / largeur rue</i>	0,6	0,9
Hauteur moyenne	<i>Hauteur bâtie moyenne</i>	6	8
Albédo Sol	<i>Facteur réflectivité pour le sol</i>	0,25	0,25
Albédo Façades	<i>Facteur réflectivité pour les murs</i>	0,4	0,4
Isolation	<i>Conductivité</i>	Isolant intérieur (0,9)	Isolant par l'extérieur
Ratio de vitrage	<i>Ratio de vitrage sur unité de façade</i>	0,1	0,1

Tableau 6 : synthèse des changements apportés par les praticiens décrits par indicateur typo-morphologique à l'îlot Castors

A l'inverse de ce qui a été proposé pour l'îlot de Belfort, la stratégie pour Castors a consisté à augmenter la densité bâtie (COS et CES) en ajoutant des bâtiments R+2 situés contre les maisons individuelles existantes. Cette proposition a produit un changement très important de la morphologie construite locale : augmentation de la contiguïté, de la mitoyenneté et du prospect moyen. Une forme urbaine plus compacte !

Les conséquences énergétiques sont nombreuses. La création d'une plus forte mitoyenneté avec les maisons en bande entraîne la réduction des déperditions de chaleur en saison froide, mais aussi une réduction des apports solaires qui sont favorables en hiver. Les praticiens ont également proposé de placer l'isolant par l'extérieur des bâtiments, ce que les rend aussi moins déperditifs. Ces changements ont été décisifs dans la diminution des charges de chauffage, de l'ordre de 10% par rapport au scénario original.

Nous remarquons notamment la réduction très importante des besoins de climatisation, de l'ordre de 75%, par rapport à la forme initiale. Nous pensons que cela est principalement lié à la forte augmentation des masques solaires environnants, bien décrite par le prospect moyen (ratio hauteur bâtie sur largeur de rue) qui a été quasiment doublé.

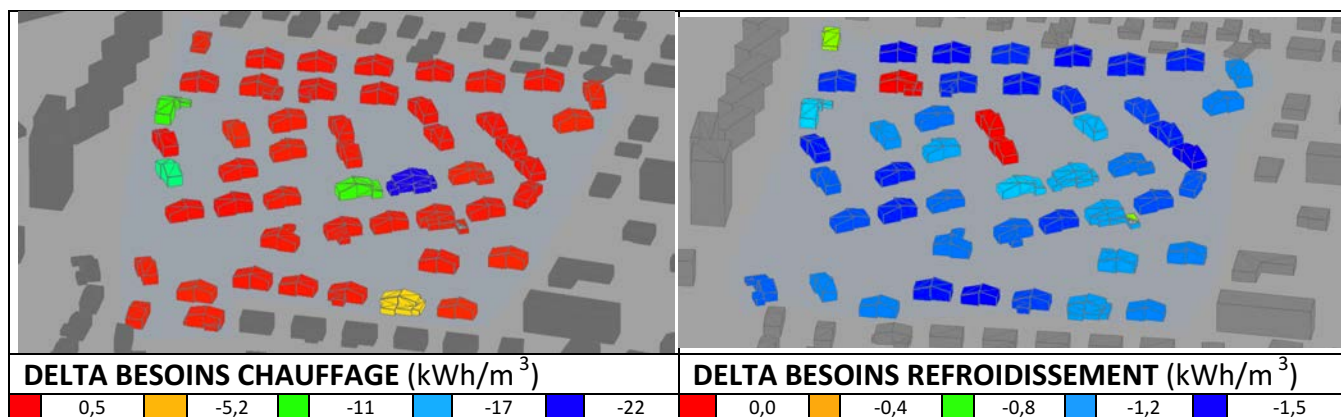


Figure 32 : cartes présentant les résultats de besoins énergétiques en valeur relative (delta des besoins de chauffage et de refroidissement, respectivement) pour l'îlot Castors.

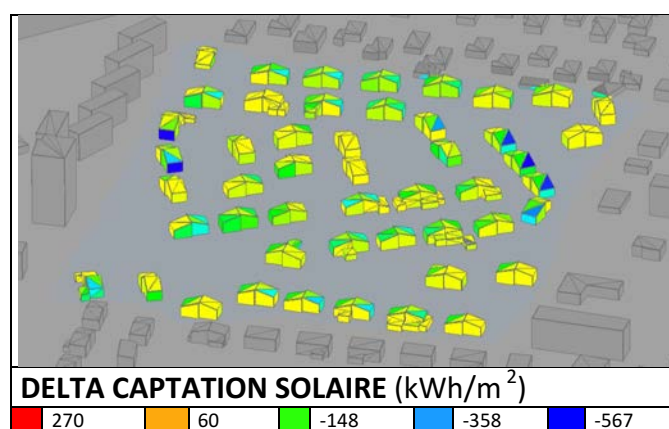


Figure 33 : carte présentant les résultats des apports solaires en relatif (delta de l'irradiation solaire) pour l'îlot Castors.

4.5.5. Analyse comparative

D'une manière générale, les variations relatives sur les besoins en refroidissement entre archétypes initiaux et modifiés sont plus importantes que sur les besoins en chauffage (Figure 34).

Les variations relatives sur les besoins de chauffage sont bien supérieures à Belfort qu'à l'Hers, lui-même supérieur à Castors. Ceci est d'abord dû à la variation de niveau d'isolation, qui est plus importante à Belfort (composition initiale des parois moins isolantes) que dans les deux autres quartiers, mais pas uniquement : la forte contiguïté, limitant les surfaces d'enveloppe y participe aussi largement, ainsi que le prospect...

Les choix opérés permettent d'obtenir la meilleure performance pour les besoins de chauffage et de refroidissement sur l'îlot Belfort. L'effet de densité bâtie (COS, CES, prospect, contiguïté élevés), à technologie d'isolation équivalente sinon inférieure (isolation intérieure à Belfort, extérieure à Castors), expliquent cette haute performance par rapport aux autres quartiers.

De même la typologie des Castors qui se rapproche de la typologie d'un tissu pavillonnaire rend difficile une réduction importante des besoins de chauffage, même en y introduisant des bâtiments intermédiaires mitoyens.

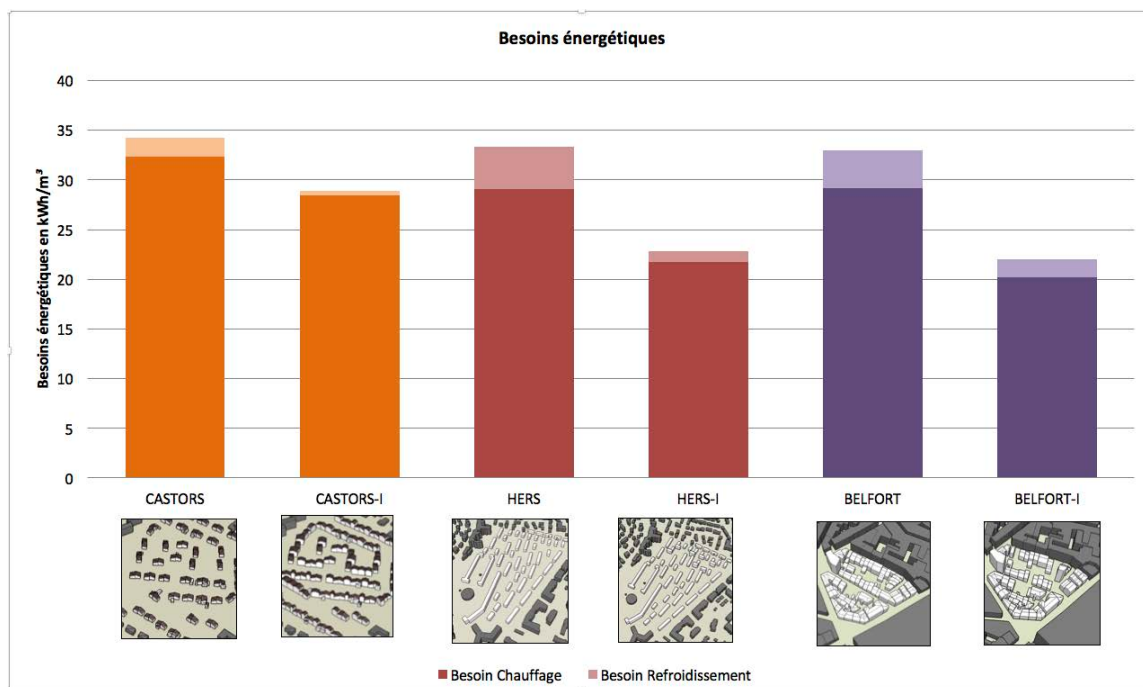


Figure 34 : graphique comparatif des besoins énergétiques (chauffage et refroidissement) des trois îlots étudiés (à gauche – initial, à droite- modifié).

D'une manière générale, les variations relatives sur l'irradiation solaire sur les toitures entre archétypes initiaux et modifiés sont relativement faibles dans les tissus peu denses de l'Hers, sinon négatives au Castors, de par la création de contiguïtés nouvelles générant des ombres portées sur les toitures (Figure 35). A Belfort, la création d'une tour de relative grande hauteur ainsi que la suppression de petits bâtiments en cœur d'îlot, potentiellement à l'ombre d'autres bâtiments, a permis, par contre, d'augmenter de près de 30% le flux d'irradiation solaire sur les toitures.

La typologie des Castors qui s'apparente à la typologie d'un tissu pavillonnaire ou la typologie de l'Hers qui s'apparente à la typologie d'un tissu moderne, rendent difficile une augmentation importante des irradiances solaires sur les toitures.

Nous confirmons ainsi une hypothèse qui nous paraît fondamentale pour l'évolution des villes dans le contexte global de la transition énergétique : **la typologie d'un quartier hypercentral historique permet potentiellement d'obtenir des irradiances solaires sur les toitures plus importantes que le tissu pavillonnaire ou le tissu moderne**, grâce à un travail sur l'optimisation de la morphologie urbaine. Si on s'intéresse non plus aux flux (kWh/m²) mais aux puissances (kWh) potentiellement captables, **la valeur élevée des**

emprises bâties (CES) d'un quartier hypercentral augmentera davantage la performance de cette typologie par rapport aux autres tissus urbains.

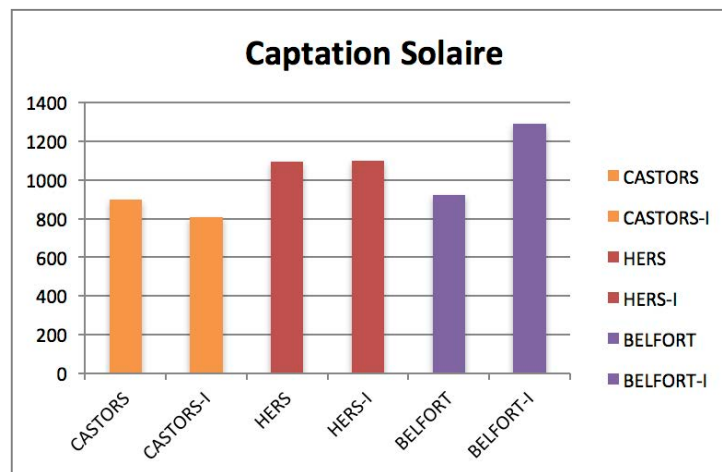


Figure 35 : graphique comparatif de l'irradiation solaire arrivant sur les surfaces de toiture des trois îlots étudiés.

4.5.6. Conclusion

Cette étude nous a permis de co-construire entre acteurs de la Ville et chercheurs sur la Ville un lien étroit entre forme, matériau et énergie, à la fois en termes de demandes et d'offres. En annexe 9.2, est présenté l'ensemble des transcriptions des synthèses par groupe et par atelier.

La littérature et l'expérience en recherche sur le domaine nous a aidé à mettre en avant les phénomènes principaux qui y sont liés, mais cette approche reste encore très incomplète, car l'aménagement des espaces architecturaux et urbains est un problème complexe où interfèrent des variables nombreuses et souvent exogènes à l'énergétique du bâtiment.

Afin de pouvoir optimiser les divers critères entre les multiples acteurs de la ville, il est nécessaire de mettre en place une méthode capable de nous aider à distinguer l'importance relative de chacun des paramètres / indicateurs sur la performance énergétique. Cette approche par indicateurs a l'avantage de faire partie de la panoplie des outils les plus couramment utilisés par les aménageurs et les décideurs urbains.

Pour cela, nous allons mettre en œuvre dans le prochain chapitre (Chapitre 4.6) une analyse paramétrique de sensibilité sur ces paramètres typo-morpho-urbains. Cette approche nous permettra de mettre en avant la pertinence de chaque indicateur dans l'évaluation énergétique et leur rôle relatif dans le cahier des charges de l'optimisation multi-objective (Chapitre 4.9).

4.6. Analyse de sensibilité énergétique des indicateurs typo-morphologiques

Objectifs

Nous cherchons à identifier statistiquement et de manière simplifiée la sensibilité des indicateurs typo-morpho-urbains étudiés, vis-à-vis des besoins énergétiques et du potentiel de production d'énergie solaire sur des études de cas représentatives choisis sur le territoire de Toulouse. Cette étude est réalisée dans le but d'hierarchiser les indicateurs typo-morphologiques indépendamment de l'archétype étudié.

Méthode

Nous allons réaliser une analyse paramétrique par la mise en œuvre d'un plan d'expérience. Pour cela, nous avons choisi la méthode factorielle fractionnée.

4.6.1. Le plan d'expériences

La morphologie urbaine interagit avec un grand nombre de paramètres architecturaux, morphologiques, typologiques, etc. qui jouent un rôle important sur le climat urbain et, par conséquent, sur la demande et l'offre potentielle d'énergie dans les villes. Afin de mieux comprendre l'impact de ces facteurs, les études paramétriques sont souvent mises en œuvre.

Cependant, ces études impliquent souvent un grand nombre de cas à modéliser. Effectuer des simulations dynamiques sur ordinateur sur plusieurs cas choisis parfois de manière aléatoire peut être une activité extrêmement énergivore et le temps de calcul associé peut être extrêmement important.

Une alternative efficace pour résoudre ce problème consiste à la mise en œuvre d'un plan d'expériences (issu de l'anglais *Design of Experiments* – DOE) basé sur une analyse paramétrique de sensibilité (MONTGOMERY, 2001). L'utilisation originale des DOE fait référence aux méthodes utilisées pour obtenir des informations qualitatives les plus pertinentes d'une base de données d'expériences en faisant le plus petit nombre possible d'expériences. Selon ces méthodes, les expériences sont prévues de manière à ce que les observations redondantes puissent être éliminées sans aucune perte de représentativité, en réduisant le nombre d'essais afin de fournir des informations sur les interactions les plus importantes entre les variables (MONTGOMERY, 2001) (KLEIJNEN, 2005).

Le DOE fait généralement partie du processus d'optimisation et il doit toujours être appliqué avant la phase d'optimisation elle-même car il permet de procéder à une première exploration de l'espace de projet tout en établissant la relation entre les réponses mesurées et les facteurs impliqués dans le processus (variables de projet) étudiés. Cette méthodologie permet à la fois de créer une population initiale de projets candidats potentiels et également de réduire l'éventail des variations ou même de réduire le nombre de variables.

Pour bien mener la méthodologie DOE, nous commençons par identifier les variables d'entrée et les réponses associées, dont la sensibilité sera évaluée. Pour chaque variable d'entrée, plusieurs niveaux sont définis. Ces niveaux représentent la plage de l'effet désiré sur chaque variable. Les scénarios d'expérience sont ensuite définis grâce à une méthode spécifique de projet expérimental, qui définit chaque paramètre d'entrée pour chaque série de tests expérimentaux. Les réponses sont évaluées en observant les différences possibles entre les intervalles d'entrée et les sorties correspondantes. Ces différences sont alors attribuées aux variables d'entrée individuellement (effet principal) ou en combinaison avec une autre variable d'entrée (effet d'interaction). Enfin, étant donné que les expériences sont constituées sur une base statistique, une confiance dans les résultats obtenus peut être définie par un test statistique.

4.6.2. La méthode factorielle fractionnée

Afin de déterminer si un changement dans les valeurs des variables du projet produit des modifications sur les résultats de l'irradiation solaire sur les façades des bâtiments, l'approche la plus intuitive serait d'essayer toutes les combinaisons possibles. Mais le nombre nécessaire d'expériences augmenterait géométriquement avec le nombre de variables. Au lieu de cela, une méthode factorielle fractionnée définit des ensembles d'expériences constituées à partir d'une fraction judicieusement choisie d'expériences définies par une méthode factorielle complète. Cette fraction est choisie de manière à exploiter le principe de la rareté des effets (*sparsity of effects*) capable de fournir des informations représentatives sur les effets les plus importants liés au problème, tout en utilisant une fraction réduite de l'information, par un plan factoriel complet en termes d'exécutions expérimentales et des ressources informatiques.

Un projet à deux niveaux est généralement suffisant pour évaluer l'effet de facteurs dans de nombreux problèmes scientifiques (MONTGOMERY, 2001). Les expérimentateurs qui évaluent les changements de processus sont souvent intéressés par les directions de l'effet des facteurs qui conduisent à l'amélioration du processus. Une demi-fraction de 2^k projets est généralement adoptée car elle n'implique que l'exécution de la moitié des traitements d'un factoriel complet. Pour cette étude, comprenant 20 variables (facteurs) de projet de l'échelle urbaine de l'îlot à l'échelle du matériau (voir Tableau 7), un plan factoriel complet définirait 1.048.576 expériences (2^{20}). Étant donné le temps extrêmement prohibitif de calcul, une fraction raisonnable de cette approche factorielle du projet (2^{20-7}) nous demanderait 8.192 séries de tests.

4.6.3. Le test d'hypothèse statistique

Afin de vérifier le seuil de signification des variables de projet et leur interaction sur les variables de réponse, un test statistique est appliqué à l'aide de données tirées à partir d'un essai expérimental contrôlé. Dans cette étude, les données sont obtenues par des simulations dynamiques sur la réponse en termes de besoins de chauffage et de

refroidissement des modèles géométriques, ainsi que d'irradiation solaire sur ses surfaces extérieures. Chaque expérience définie par la méthode factorielle fractionnée représente une configuration urbaine statistique. Un résultat est statistiquement significatif s'il est improbable qu'il ait eu lieu par hasard, selon un seuil prédéterminé appelé le niveau de signification. Les tests sur les hypothèses statistiques et sur l'estimation de l'intervalle de confiance de paramètres sont les méthodes fondamentales utilisées pour l'évaluation de l'expérience comparative.

Pour une telle analyse, on doit formuler une hypothèse à tester : la valeur nulle et les hypothèses alternatives. Nous affirmons que l'ensemble des facteurs typomorphologiques urbains étudiés ont un impact significatif sur les besoins énergétiques des bâtiments et sur le niveau d'irradiation sur toutes les surfaces construites dans n'importe quelle scène urbaine dans le contexte climatique de Toulouse.

La décision de rejeter ou non l'hypothèse nulle peut être prise en fonction d'un intervalle de confiance. Ici, nous considérons un intervalle de confiance de 95%, correspondant à une signification de 0,05. Afin d'évaluer l'importance de l'effet des variables du projet sur les variables de réponse un *test-t de Student* est considéré.

4.6.4. Description du modèle urbain simplifié et vectorisation de la géométrie

Pour l'analyse de sensibilité des facteurs morphologiques considérés, nous utilisons un modèle urbain simplifié à partir duquel il est possible de créer des variations contrastées suivant la méthode d'analyse statistique. Un modèle urbain simplifié composé de 25 bâtiments est considéré ; pour chacun nous faisons varier toutes les dimensions d'un bâtiment : largeur, profondeur et hauteur ainsi que les espaces entre eux, comme le montre la Figure 36 ci-dessous. A partir de ces variables de base, il est possible d'évaluer les variations de l'ensemble de tous nos facteurs morphologiques (Tableau 7). En outre, les caractéristiques principales de l'enveloppe du bâtiment sont également évaluées, notamment le ratio de vitrage, l'épaisseur et l'albédo, ainsi que les caractéristiques des matériaux (le coefficient de transmission thermique des murs, la conductivité, la densité, la chaleur spécifique, le facteur solaire, la transmittance thermique du vitrage).

Dans cette première analyse, un large éventail de valeurs possibles pour chaque variable est examiné (Tableau 7), indépendamment des réglementations urbaines ou des bonnes pratiques. La composition de l'espace de recherche statistique doit être aussi complète que possible permettant de mieux mesurer la sensibilité de chaque facteur sur les variables réponses, tout en évitant les biais ou les redondances sur les résultats.

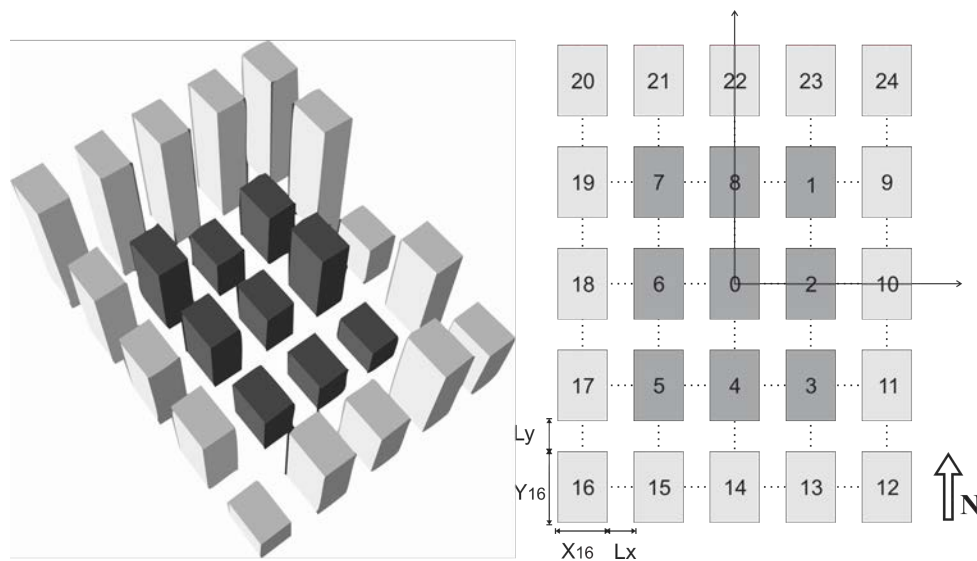


Figure 36 : modèle géométrique statistique utilisé dans l'étude.

Rue Axe E-O	Largeur (X)	Profondeur (Y)	Rue Axe N-S	Facteur Solaire(FS)	Coefficient Transmission thermique des vitrages	Albédo Sol	Coefficient. Transmission thermique des parois	Ratio vitrage	COS	CES	Compacité	Verticalité	Prospect moyen	Albédo Façade	Epaisseur murs	Conductivité	Protection solaire	Densité matériau	Chaleur Spécifique
m	m	m	m	/	W/m ² K	/	W/m ² K	%	/	/	/	/	/	/	m	W/ m ² K	/	Kg/m ³	J/Kg.K
3 ↓ 50	4 ↓ 40	4 ↓ 40	3 ↓ 30	1 ↓ 0,9	1,3 ↓ 5,0	0,1 ↓ 0,9	0,7 ↓ 4,8	0,2 ↓ 0,9	0,3 ↓ 10,3	0,05 ↓ 0,85	4 ↓ 1,0	0,01 ↓ 0,8	6 ↓ 3,9	0,1 ↓ 0,9	0,01 ↓ 0,6	0,02 ↓ 200	oui ↓ non	1,0 ↓ 2500	0,1 ↓ 0,9

Tableau 7 : facteurs typo-morphologique et les variations considérées dans l'étude.

Pour l'application de la méthode présentée ci-dessus, nous avons utilisé un outil statistique multidisciplinaire appelé modeFRONTIER® qui nous a permis de programmer la définition géométrique de notre îlot générique et la modélisation du plan d'expérience par la méthode factorielle fractionnée.

Nous présenterons cet outil plus en détail dans le chapitre 4.8.

4.6.5. Premiers résultats obtenus pour l'analyse de sensibilité

A partir du test statistique d'hypothèses, nous avons pu obtenir la magnitude d'effet relative des différents facteurs considérés. Dans les graphiques présentés pour cette étude, nous pouvons mettre en avant deux informations principales, la part relative de la

magnitude d'effet de chaque facteur sur une réponse donnée et la sens de l'effet. Pour identifier et qualifier leur intensité de ces effets, les facteurs sont analysés individuellement concernant les trois réponses étudiées, les besoins de chauffage, les besoins de refroidissement et le taux d'irradiation solaire (Figure 37, Figure 38, et Figure 39).

Dans la Figure 37, nous pouvons remarquer que les barres noires correspondent aux facteurs typo-morphologiques ayant un effet direct sur les besoins de chauffage, c'est-à-dire que plus le facteur concerné est important, plus les besoins en chauffage seront élevés ; les barres grises correspondent, a contrario, aux facteurs ayant un impact inverse à la réponse. Autrement dit, plus on agit sur ces facteurs plus on a de chances de réduire les besoins en chauffage.

Par exemple, à partir des informations obtenues dans la Figure 37, nous pouvons remarquer le rôle prépondérant des indicateurs de la densité bâtie (le COS et le CES), de la compacité et aussi de la verticalité (hauteur moyenne pondérée par la surface bâtie) sur les besoins de chauffage des bâtiments de notre îlot urbain, mais de manières différentes.

Pour les facteurs CES et COS, cela nous indique une évidence, plus l'îlot est densément bâti, plus on aura de surfaces construites à chauffer. Dans l'autre sens, plus l'îlot est compact, moins on aura de surface déperditive, par conséquent, moins on aura de besoins de chauffage.

Il est également possible de vérifier la hiérarchie de l'impact des indicateurs entre eux.

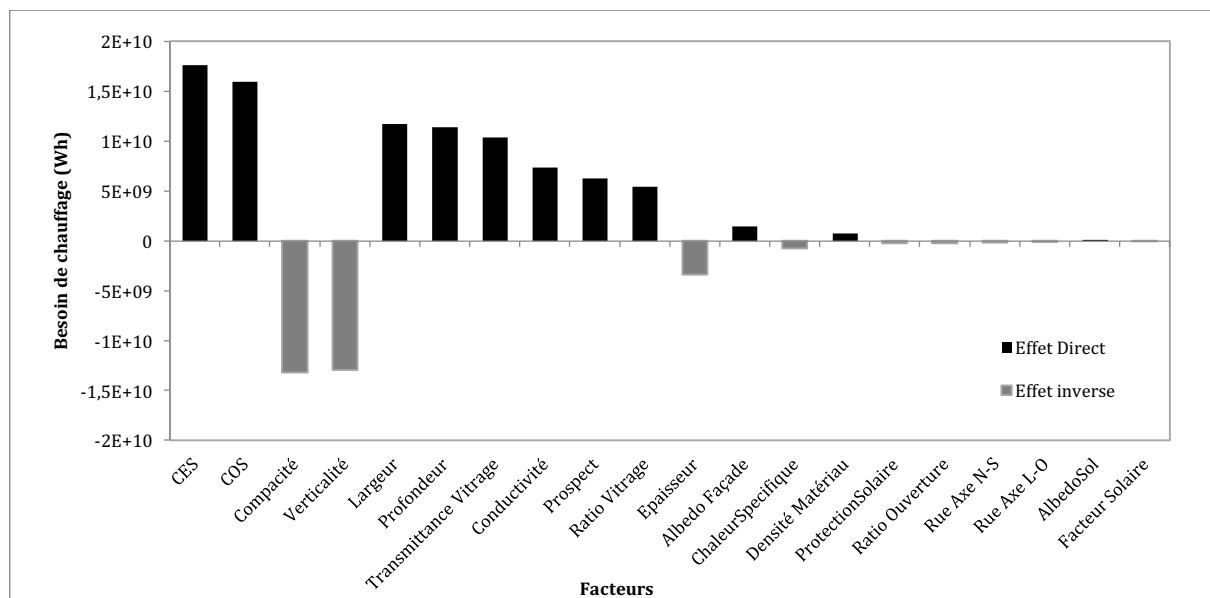


Figure 37 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins de chauffage.

Comme indiqué précédemment, l'hypothèse nulle indique que la variable ne produit pas d'effet significatif sur la réponse. Un intervalle de confiance de 95 % est considéré ici, ce qui représente un seuil de signification de 0,05. Le Tableau 8 présente les

résultats des données significatives concernant l'effet d'un indicateur sur les besoins de chauffage. Le tableau présente donc des informations sur la magnitude de l'effet, la signification du test d'hypothèse et le test statistique *t-student*. L'effet indique la relation entre le facteur et la variable de réponse : les valeurs négatives indiquent que la relation est inverse.

Selon l'intervalle de confiance adopté dans cette étude (de 95 %), onze facteurs typo-morphologiques sur vingt facteurs considérés, peuvent être choisis par rapport à leur influence sur la réponse en termes de besoins de chauffage : le COS, le CES, la compacité, la verticalité, la largeur, la profondeur bâtie, la transmission des vitrages, la conductivité des matériaux, le prospect moyen, le ratio de vitrage sur les façades, et l'épaisseur des murs (Tableau 8).

Facteurs	Taille d'effet	Signification	t-student
CES	-17609385572	0,00	11,33
COS	-15918624417	0,00	9,16
Compacité	13190334446	0,00	17,40
Verticalité	12919677637	0,00	17,65
Largeur	-11678180715	0,00	11,12
Profondeur	-11379270874	0,00	10,77
Coefficient de Transmission des Vitrages	-10365826015	0,00	9,60
Conductivité	-7375300018	0,00	6,55
Prospect	-6286393355	0,00	3,91
Ratio Vitrage	-5427408871	0,00	4,73
Epaisseur	3385147594	0,00	2,91

Tableau 8 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant les besoins de chauffage.

En ce qui concerne la réponse en termes de besoins de refroidissement, d'autres facteurs ont été mis en évidence. Nous pouvons remarquer un fort impact quasi équivalent entre quatre indicateurs typo-morphologiques à l'échelle de l'enveloppe et des matériaux : la mise en place d'un dispositif de protection solaire, le facteur solaire des vitrages, la conductivité et le coefficient de transmission dans le vitrage. Les deux premiers exercent un impact inverse sur la réponse. Autrement dit, plus la part vitrée des façades est protégée, plus les besoins de climatisation seront faibles.

D'autre part, la conductivité des matériaux est forte et plus le coefficient de transmission des vitrages est élevé, plus la chaleur en saison chaude sera facilement admise dans les bâtiments, plus les besoins de refroidissement seront importants.

Les facteurs de densité présentent aussi un impact important sur ces besoins. Cette fois-ci, on pourra conclure que cette densité représente aussi une modification significative des masques solaires. Plus la masse construite est importante, plus les façades recevant potentiellement des apports solaires indésirables en été seront protégées.

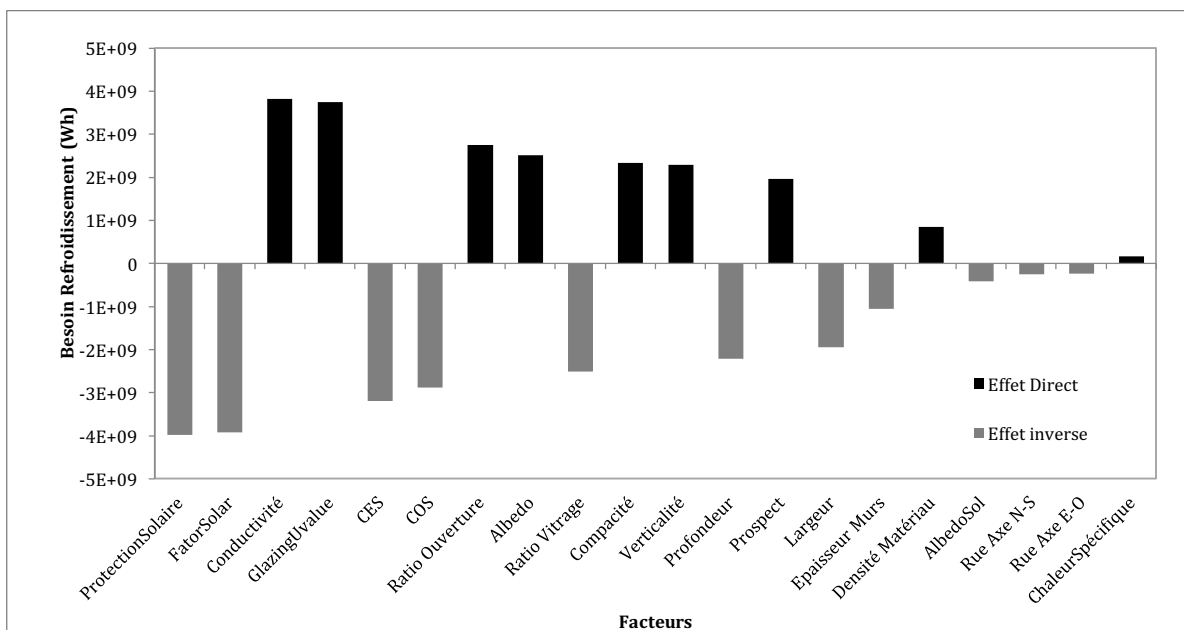


Figure 38 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins de refroidissement.

Selon l'intervalle de confiance adopté, quatorze facteurs typo-morphologiques peuvent être choisis et hiérarchisés par rapport à leur influence sur la réponse en termes de besoins de refroidissement (voir Tableau 9).

Facteurs	Effet négatif	Signification	t-student
Protection Solaire	3,97E+09	0,00	5,40
Facteur solaire	3,92E+09	0,00	5,31
Isolation	-3,82E+09	0,00	5,17
Transmission des Vitrages	-3,74E+09	0,00	5,07
CES	3,18E+09	0,00	2,55
COS	2,88E+09	0,00	1,98
Ratio Ouverture	-2,75E+09	0,00	3,68
Albédo	-2,51E+09	0,00	3,36
Ratio Vitrage	2,51E+09	0,00	3,34
Compacité	-2,34E+09	0,00	4,17
Verticalité	-2,30E+09	0,00	4,19
Profondeur	2,21E+09	0,00	2,94
Prospect	-1,96E+09	0,00	3,83
Largeur	1,95E+09	0,00	2,59

Tableau 9 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant les besoins de refroidissement.

Les résultats semblent cohérents en ce qui concerne la réponse sur l'irradiation solaire attendue pour les configurations urbaines. L'albédo des façades bâties et du sol urbain présente une importante influence directe sur les réponses. Plus l'albédo (la réflectance) est important, plus l'échange d'irradiation solaire entre eux (la réflexion) est importante et la quantité d'énergie solaire incidente sur les façades est importante.

Pour le prospect moyen (ratio de la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue), nous vérifions un effet inverse, c'est-à-dire, plus la hauteur des bâtiments est importante par rapport à la distance entre eux, plus l'ombre portée sur les toitures et les façades sera importante, ce qui peut réduire la réponse globale en termes d'incidence du rayonnement sur les surfaces des bâtiments.

En ce qui concerne la distance entre les bâtiments sur l'axe de la rue Est-Ouest, ce paramètre présente un effet direct important sur les variables de réponse. Plus les bâtiments sont espacés entre eux, plus la disponibilité de l'irradiation des surfaces est importante en raison de la moindre d'obstruction par rapport au soleil et à la voûte céleste tout au long de l'année. Parmi les autres variables influentes, la compacité, par exemple, présente un effet direct. Cela pourrait s'expliquer par l'influence des inter-réflexions entre les surfaces verticales. Plus la surface d'enveloppe par rapport au volume bâti est élevée, plus le niveau d'irradiation sur les façades est important, ce qui peut aussi représenter des apports de chaleur solaire significatifs sur les bâtiments.

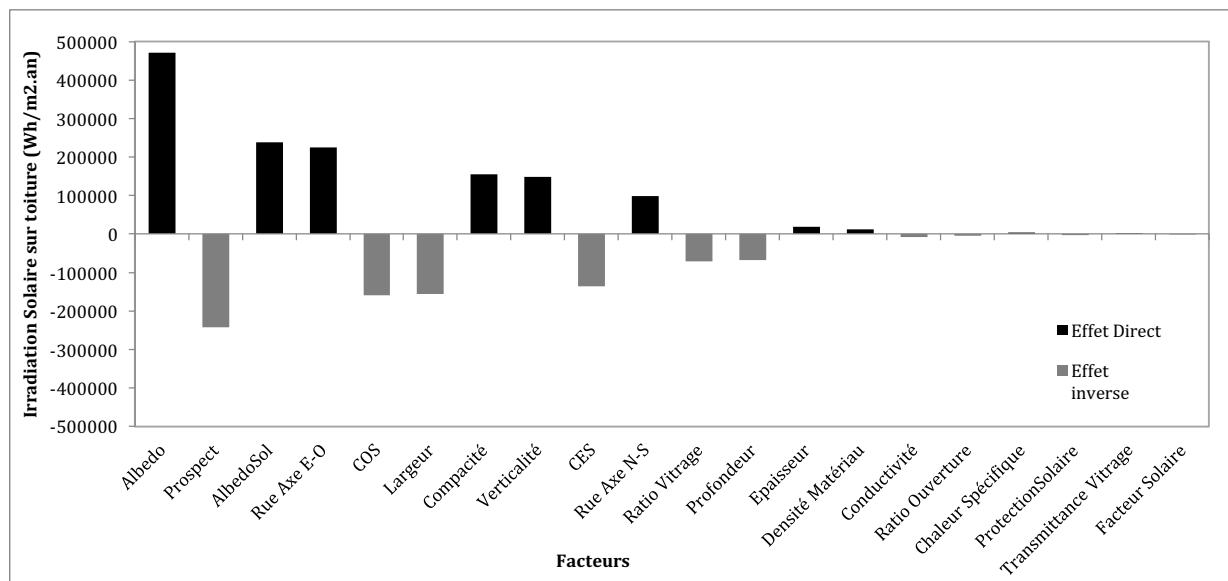


Figure 39 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur le taux d'irradiation solaire.

Selon l'intervalle de confiance adopté, douze facteurs typo-morphologiques peuvent être choisis et hiérarchisés par rapport à leur influence sur la réponse du taux d'irradiation solaire sur les différentes surfaces bâties. Dans l'ordre d'impact, nous obtenons : l'albédo, le prospect moyen, l'albédo du sol, la verticalité, la largeur des rues dans l'axe Est-Ouest, le COS, la largeur, la compacité, la verticalité, le CES, la largeur de la rue dans l'axe Nord-Sud, le ratio de vitrage et la profondeur bâtie. (Tableau 10).

Facteurs	Taille d'effet	Signification	T- student
Albédo	471763,2	0,00	23,28
Prospect moyen	-242684,4	0,00	8,08
Albédo Sol	237917,0	0,00	8,76
Rue Axe E-O	225488,3	0,00	8,24
COS	-158691,4	0,00	4,40
Largeur	-156412,3	0,00	5,53
Compacité	155391,6	0,00	4,88
Verticalité	148185,0	0,00	4,42
CES	-135119,5	0,00	4,08
Rue Axe N-S	98962,7	0,00	3,439
Ratio Vitrage	-71018,3	0,01	2,45
Profondeur	-66927,2	0,01	2,311

Tableau 10 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant l'irradiation solaire.

4.6.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté une première approche pour quantifier et pour qualifier l'impact énergétique des différents facteurs typo-morphologiques aux diverses échelles spatiales considérées initialement (voir la revue de littérature dans le premier rapport).

En fonction de chaque réponse énoncée, nous avons obtenu une hiérarchie d'effet différente pour les besoins énergétiques, pouvant être retenue de manière complémentaire, mais qui mérite aussi être examiné de manière croisée, avec la réponse en termes de potentiel de production solaire.

Par exemple, si d'un côté, une augmentation de l'albédo pourrait entraîner une augmentation du potentiel de production d'énergie solaire localement, de l'autre côté, il peut amener à une hausse significative des besoins de refroidissement en été durant la journée. L'analyse de sensibilité réalisée par la méthode présentée précédemment (factorielle fractionnée), prend en compte les deux extrêmes de l'intervalle considéré (2^{k-n} essais). Ces résultats nous permettent donc de conclure que l'albédo peut avoir un impact crucial et paradoxal entre les différents critères d'analyse. Le choix des matériaux urbains (sol urbain et façades), en fonction de leur réflectance, doit être fait raisonnablement en évitant les valeurs extrêmes. Les matériaux extrêmement clairs sont de plus en plus prescrits - principalement dans les nouveaux projets urbains - afin de mitiger l'effet de chaleur urbain nocturne. Cependant, si ce comportement est analysé du point de vue des charges potentiels de climatisation, nous pouvons peut-être retrouver un bilan assez défavorable, sans oublier les inconforts visuels produits par l'éblouissement des usagers.

Les facteurs typo-morphologiques étudiés ici feront encore l'objet d'une analyse multicritères et multi-échelles, lors des études statistiques et d'optimisation présentés plus loin dans ce rapport (Voir Chapitre 4.9).

Suite au deuxième atelier participatif (Voir Chapitre 4.7)., nous avons été amenés également à une discussion sur une nouvelle hypothèse d'étude concernant l'importance relative des facteurs par rapport à chaque contexte typo-morphologique. Par exemple, est-ce que le fort impact relatif des indicateurs étudiés aurait la même signification dans les trois environnements types considérés dans cette recherche ? De ce fait, cela nous a guidé vers la nécessité d'une nouvelle analyse de sensibilité des facteurs typo-morphologiques urbains (multi-échelles) intégrant les caractéristiques propres à chaque archétype (Voir Chapitre 4.8) : nous parlons ainsi d'études de sensibilité contextualisées.

4.7. Deuxième atelier participatif : « évaluation et production de projets urbains »

4.7.1. Objectifs

Un second atelier participatif « Evaluation et production de projets urbains » s'est tenu le 20 avril 2017, à l'aua/T, afin de poursuivre la réflexion collective chercheurs – acteurs engagée sur l'évolutivité de la forme urbaine sur trois archétypes de quartiers, avec la performance énergétique comme fil conducteur.

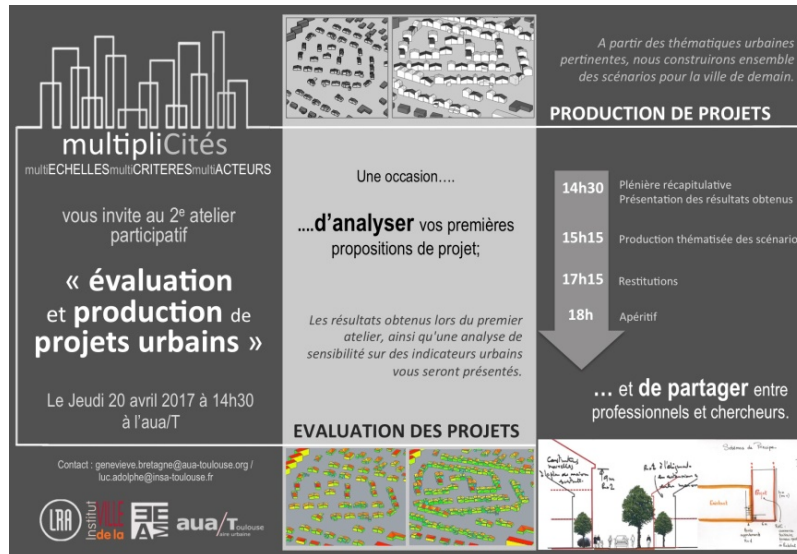


Figure 40 : Flyer d'invitation au deuxième atelier participatif.

L'objectif de ce second atelier était triple :

- **Partager l'analyse des résultats de modélisation énergétique** obtenus à l'issue du premier atelier sur chacun des trois quartiers (Figure 41), ainsi qu'une **analyse de sensibilité** réalisée sur différents indicateurs urbains (Figure 42).

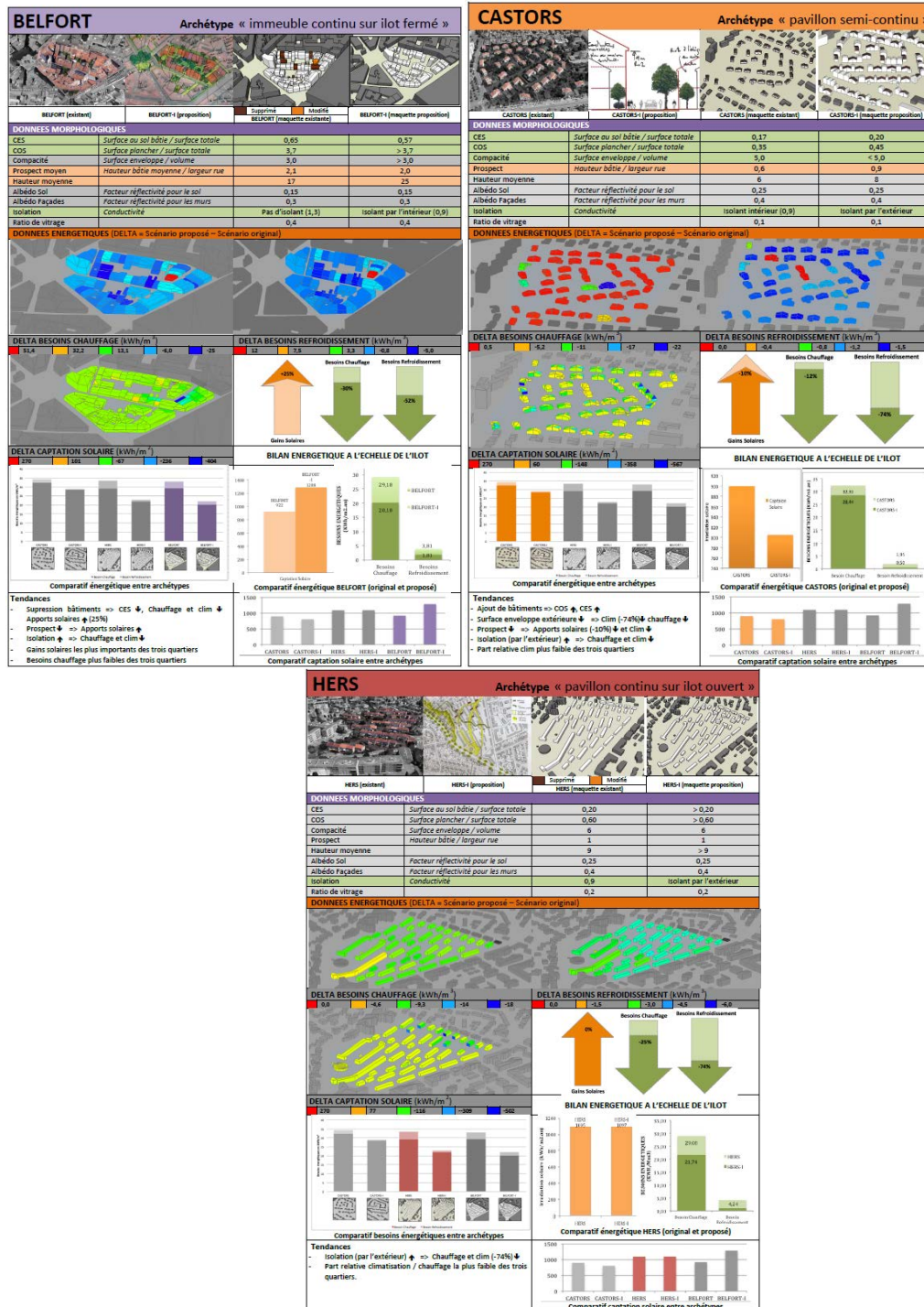


Figure 41 : Fiches d'analyse énergétique des archétypes distribuées aux participants de l'atelier 2.

Analyse de sensibilité des indicateurs morpho-techniques

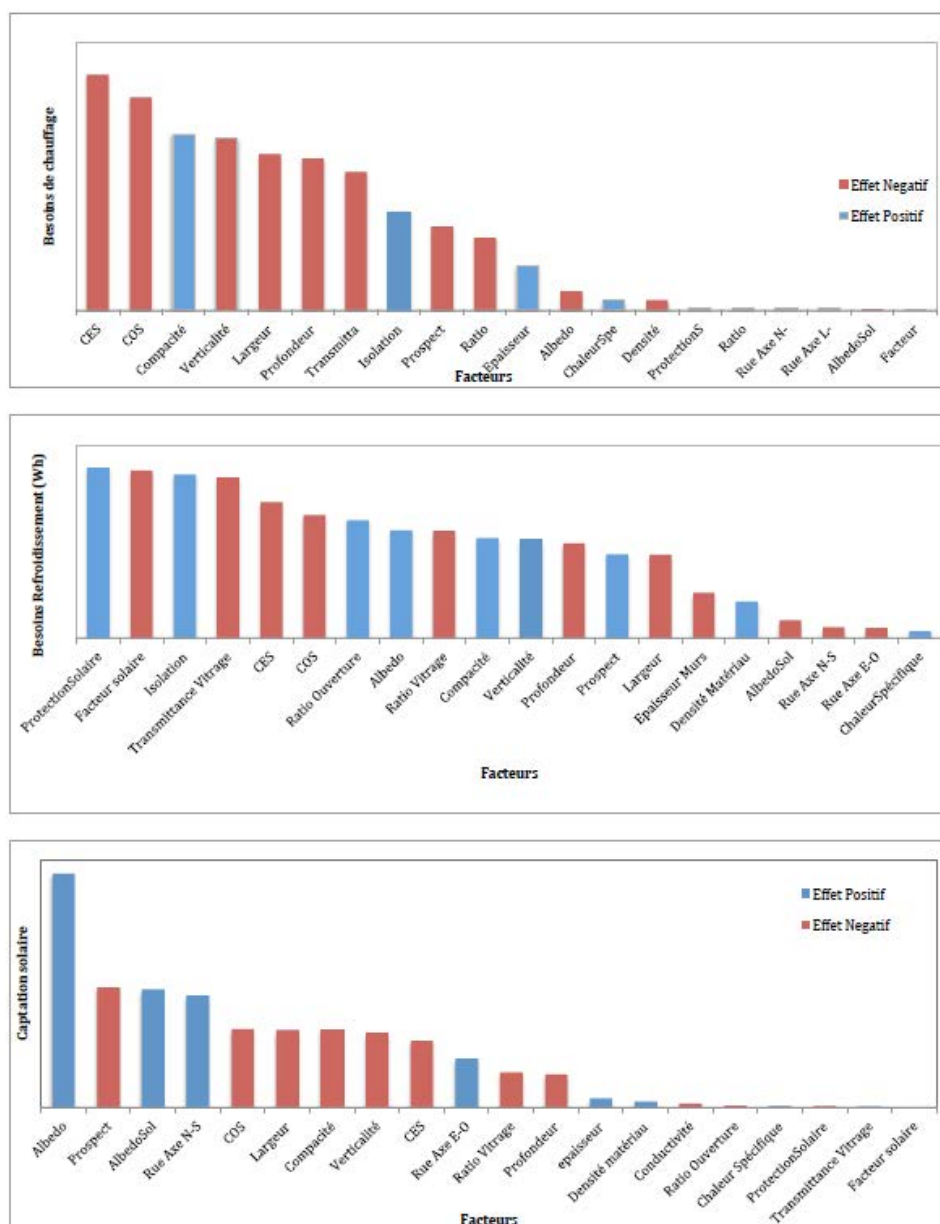


Figure 42 : Analyse de sensibilité distribuée aux participants du deuxième atelier participatif.

- Poursuivre la réflexion sur l'évolutivité des trois quartiers tests en travaillant sur **deux variantes d'optimisation énergétique**, à choisir parmi les trois suivantes : *économe, fraîche ou productive*.
- Produire, pour chaque variante retenue, un **rendu graphique**, une **explication technique**, et un **argumentaire** sur les intentions privilégiées.

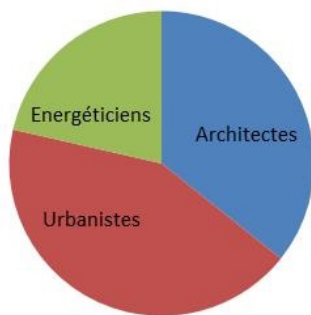
Les résultats de ce travail permettent de focaliser mais aussi de limiter le champ des variations possibles au filtre des pratiques et des cultures des acteurs de la Ville et des chercheurs sur la Ville. Ces propositions communes feront l'objet de modélisations / optimisations énergétiques qui permettront d'évaluer la pertinence des variantes étudiées en séance (Voir 4.8).

Un atelier final de restitution est prévu en Février 2018 auprès d'un public élargi comprenant l'ensemble de la communauté d'acteurs invitée aux deux ateliers.

4.7.2. Participants

Pour ce second atelier, l'objectif était de poursuivre la réflexion avec les professionnels de l'architecture, de l'urbanisme et de l'environnement, déjà invités lors du premier atelier, toujours dans une approche interdisciplinaire (Figure 43: Participants du deuxième atelier participatif. Figure 43).

Professionnels présents



Groupe A	Groupe B	Groupe C
Sylvie Hochart, Atelier du Patrimoine, Toulouse Métropole	Florence Garros, architecte aua/T	Hervé Ambal, Cabinet AR357
Nicolas Castelnau, ARUA	Sophie Lebreton, Écologie Urbaine	Samuel Roux, Direction des Opérations d'Aménagement, Toulouse Métropole
Agnès Domingo, environnementaliste aua/T	Bruno Arliguié, bailleur Les Chalets	Pauline Lefort, CerCAD Midi-Pyrénées
Vincent Toulza, Direction des Opérations d'Aménagement, Toulouse Métropole	Patrick Lanquetin, ENEDIS	Philippe Millasseau, APUMP
Pierre Marchal, bailleur Les Chalets		Adelaïde Mailhac, CSTB
Quartier BELFORT	Quartier CASTORS BAGATELLE	Quartier CHATEAU DE L'HERS
<i>Equipe projet Multiplicités</i>		
<i>Luc Adolphe, LRA</i>	<i>Patrice Contart, aua/T</i>	<i>Geneviève Bretagne, aua/T</i>
<i>Léa Gilbert, LRA</i>	<i>Serge Faraut, LRA</i>	<i>Nathalie Tornay, EEAM</i>
<i>Marion Bonhomme, LRA</i>	<i>Géraldine Cazaux Ginestet, INSA</i>	

Figure 43: Participants du deuxième atelier participatif.



Figure 44 : Participants du deuxième atelier participatif.

4.7.3. Déroulement et résultats de l'atelier

Appropriation des bilans énergétiques et de l'analyse de sensibilité

Les données transmises, issues du travail de modélisation effectué entre les deux ateliers, ont bénéficié dans tous les groupes d'un temps d'appropriation relativement long, à travers un questionnement sur les unités, les sens de variation des indicateurs, le classement des indicateurs les uns par rapport aux autres...

Deux stratégies différentes ont été observées suivant les groupes de travail.

Sur Castors et Belfort, les participants ont en premier lieu choisi le scénario (économe, frais ou captation), puis en second lieu les indicateurs sur lesquels travailler en priorité. Les stratégies de choix des indicateurs ont été différentes entre les deux exercices : priorité aux indicateurs dont le classement étonne le groupe, pour le scénario 1 ; prise en considération des critères les mieux placés, « à l'aveugle », pour le scénario 2.

Sur Hers, le raisonnement a été différent ; les participants ont d'abord choisi les critères à retenir sur chacun des trois scénarii possibles, sur la base de l'analyse de sensibilité, puis ont ensuite choisi les scénarii. On observe là, une approche plus « architecte », basée sur le choix de critères réalistes, couplée à une approche typo-morphologique. En termes de méthodologie, le groupe s'est d'ailleurs saisi du plan d'expérience élaboré dans le cadre de l'analyse de sensibilité (les « cubes ») dans le choix des typologies optimales à favoriser.

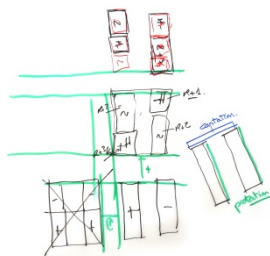


Figure 45 : Détail de la variante « économe » Hers

Choix des variantes

Dans tous les groupes, force est de constater que l'action renforce l'adhésion à l'exercice de production. Les groupes jouent de mieux en mieux le jeu au fur et à mesure de la séance. On note une entrée plus rapide et qui va plus « loin » dans la production entre l'atelier 1 et l'atelier 2.

Sur la base des bilans énergétiques des projets étudiés au premier atelier et des analyses de sensibilité transmises, un travail de production de projets urbains a été engagé par chaque groupe à travers l'étude de deux variantes, parmi les trois proposées.

		Variante économe	Variante fraîche	Variante productive
Quartier BELFORT	Scénario 1	✓		
	Scénario 2			✓
Quartier CASTORS	Scénario 1	✓		
	Scénario 2		✓	
Quartier CHATEAU de L'HERS	Scénario 1	✓		
	Scénario 2			✓

Tableau 11 : Type de variantes retenues pour chaque quartier

La variante « économe », systématiquement choisie en premier par chacun des trois groupes, répond à la prise en compte d'un enjeu de gain énergétique, considéré comme majeur par les participants, que ce soit en termes de chauffage ou de climatisation. Le souci du confort d'été a été également mis en exergue comme incontournable à intégrer dans la démarche, notamment à Toulouse.

Le choix de la variante « fraîche » répond à un enjeu de mauvais confort thermique d'été, particulièrement mis en évidence lors du premier atelier.

Le choix de la variante « productive », enfin, résulte du souhait de développer la captation solaire, en ciblant et en optimisant les façades exposées Est et Ouest, et en privilégiant certaines options d'organisation de l'îlot urbain et de forme urbaine.

Choix des critères / indicateurs

Pour une variante identique, on observe une certaine convergence des groupes de travail sur le choix des critères retenus. Les spécificités de chaque quartier ont néanmoins fait émerger des choix de critères particuliers.

→ Variante « économe »

Critères choisis	Raisons du choix	Intégration dans le projet
Compacité	Fort impact (analyse de sensibilité) Limiter les déperditions énergétiques, en conservant quelques éléments structurants	Combinaison compacité de la forme urbaine / aération des espaces Densification Rénovation des îlots existants Redéfinition des îlots : limites, ouvertures
Epaisseur		Critère travaillé conjointement à la compacité.
Isolation	Renforcer l'enveloppe extérieure des bâtiments existants, même si rôle potentiellement moindre par rapport à la compacité (analyse de sensibilité)	Principe d'isolation, dans un second temps après choix des modifications morphologiques
Verticalité	Varier la hauteur pour profiter au mieux des apports solaires, tout en limitant les effets d'ombre portée, s'adapter au relief	Ajout d'étages aux bâtiments donnant sur des espaces vides (angles, voisinage...)
Albédo	Améliorer le confort thermique et réduire les coûts énergétiques de climatisation	Principe de réduction de l'albédo, après choix des modifications morphologiques
Protection solaire	Limiter le réchauffement des façades Sud-Ouest et Ouest	
Ventilation naturelle	Réduire les coûts énergétiques de climatisation	Logements traversant
Captation solaire	Optimiser l'apport énergétique solaire	Implantation de capteurs en toiture, façades Sud, sur les bâtiments conservés

Tableau 12 : Critères retenus et intégration au projet pour la variante économe

Les critères de compacité et d'isolation ont systématiquement primé.

Après optimisation de ces derniers, les groupes ont privilégié le critère de verticalité, puis les autres critères cités.

Le critère de végétation naturelle, bien que ne figurant pas dans l'analyse de sensibilité transmise aux participants, a été systématiquement retenu, sous forme d'une végétation « généreuse, caduque », mise en œuvre à travers la création de coulées vertes, de rideaux d'arbres, de végétalisation des cœurs d'îlot, pour ses qualités d'ombrage, de protection. Elle « vient compenser la densité », dans une réflexion conjointe à celle sur l'utilisation de l'albédo, afin de favoriser les économies de climatisation en période estivale.

Restitutions graphiques des variantes « économes »

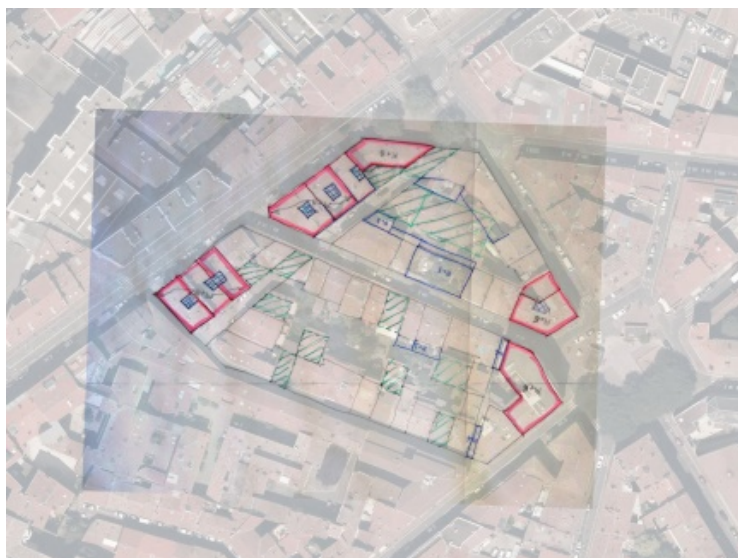


Figure 46 : Variante « économe » Belfort



Figure 47 : Variante « économe » Castors



Figure 48 : Variante « économe » Hers

Verbatim groupe Castors

« On a pris un premier scénario en partant sur le critère d'économie de chauffage. Pour atteindre cet objectif, on a essayé, on a travaillé sur la compacité, en travaillant sur des îlots un peu plus urbains et une isolation sur les bâtiments, et en travaillant également sur les orientations. On a défini un axe que l'on a relié au reste du tissu urbain. On a ciblé 3 îlots que l'on densifie un peu plus, mais on va monter un peu plus. »

Verbatim groupe Belfort

« Nous avons choisi de travailler sur les deux thématiques du chauffage dont l'influence sur le bâtiment global est plus faible que la climatisation, et sur la production d'énergie solaire, et sur quatre critères : la compacité qui a un effet très important, la profondeur des bâtiments, l'isolation et la verticalité. »

Verbatim groupe Hers

« Pour le scénario 1, par rapport au contexte qui nous était donné, nous avons travaillé à partir de l'archétype « à damier » transmis, en développant l'idée de faire évoluer les hauteurs pour ménager des expositions intéressantes en fonction des bâtiments.

En repositionnant le Nord, nous avons identifié quelles étaient les expositions favorables des bâtiments ; cette lecture nous a permis de mieux comprendre la structure urbaine en place et de cerner quel archétype de bâtiment nous pouvions définir et retenir. »

→ Variante « fraîche »

Cette variante a été retenue uniquement sur le site CASTORS, en scénario 2, principalement par contraste avec le scénario 1 « économe ».

Critères choisis	Raisons du choix	Intégration dans le projet
Protection solaire	Optimiser la protection solaire intrinsèque	Rôle des bâtiments dans la protection solaire du quartier Protections solaires pouvant se rétracter Végétalisation massive (cf. ci-après)
Isolation	Renforcer l'enveloppe extérieure / intérieure des bâtiments	Isolation des murs extérieurs et des combles
Verticalité	Permettre des économies d'énergie, en évitant les ascenseurs	Limitation des hauteurs, pas de parking en sous-sol
Albédo	Modifier l'albédo pour améliorer le confort thermique : réduction des surfaces minérales, augmentation de la surface en eau, augmentation de la surface végétalisée	Parking centralisé commun, réduction de la surface des voiries Création d'un grand bassin, de noues, de jets d'eau Cœur d'îlot végétalisé Murs végétalisés au Sud
Ventilation naturelle	Limiter la climatisation et favoriser les économies d'énergie	Logements traversant Espaces collectifs traversant
Matériau	Faire évoluer les matériaux utilisés et les dispositifs constructifs	Construction en terre crue, ossature bois pour surélévation Principe de patio

Tableau 13 : critères retenus et intégration au projet pour la variante fraîche

Les deux principaux axes retenus sont une optimisation de la protection solaire intrinsèque de l'îlot urbain (entre bâtiments) et une protection par une végétalisation massive sur les façades Sud. Le remplacement des réseaux viaires par des coulées vertes, l'introduction de noues et de plans d'eau doivent induire un changement de l'albédo et des usages permettant d'attendre une augmentation du rafraîchissement du quartier. Les économies d'énergie à l'échelle du bâtiment sont principalement liées à la modification (voire la suppression) d'équipements au sein des bâtiments (exemple : ascenseurs).

Le projet suggère enfin une suppression des parkings individuels le long de la voirie et la création de parkings mutualisés, participant là aussi à une modification de l'albédo et une amélioration du confort thermique.

Restitution graphique de la variante « fraîche »



Figure 49 : Variante « fraîche » Castors

Critères choisis	Raisons du choix	Intégration dans le projet
Captation solaire	Privilégier les surfaces favorables	Optimiser la surface en toiture
Albédo	Premier critère a priori le plus important (analyse de sensibilité)	
Prospect	Optimiser la captation solaire	Limiter les effets d'ombre portée, base de conception urbaine = trame viaire
Verticalité	Améliorer la captation solaire	Varier la hauteur pour profiter au mieux des apports solaires, tout en limitant les effets d'ombre portée, s'adapter au relief
Albédo Sol	Critère important (analyse de sensibilité)	
Orientation	Favoriser la captation solaire	Ensoleillement des façades Sud et Ouest, modèle urbain en peigne
Rue Axe N-S	Critère étonnamment important (analyse de sensibilité)	Premier critère sur lequel ils ont joué
Epaisseur		
Ventilation naturelle	Limiter la climatisation et favoriser les économies d'énergie	Logements traversant

Tableau 14 : critères choisis pour la variante fraîche

Verbatim groupe Castors

« On a choisi le deuxième scénario « Le frais ». On a végétalisé déjà, au maximum tous les cœurs d'îlot. On a ajouté de l'eau, si possible. On a ajouté des noues. On a végétalisé, rétréci pas mal les voiries qui étaient très larges. On a mis un revêtement plutôt clair. Et on a gardé un peu la typologie. Enfin on a travaillé sur certain bâtiment en essayant d'avoir au maximum des bâtiments traversant et en montant un petit peu mais dans un travail assez fin de compacité... »

→ Variante « productive »

Cette variante a été étudiée sur les quartiers BELFORT et CHATEAU DE L'HERS, en privilégiant dans les deux cas une optimisation de la captation solaire.

L'optimisation recherchée s'est appuyée prioritairement sur l'orientation à privilégier, puis conjointement sur la verticalité et le prospect, enfin sur les autres critères.

Cette réflexion a amené à la conception d'un projet urbain qui, sans changement de nature et de contenu, puisse s'adapter au terrain (possibilité de retourner les formes urbaines « en peigne », sur le site de Château de l'Hers).

Cette question de l'optimisation de la production énergétique réinterroge fortement la question de l'insertion du « nouveau » projet dans le tissu urbain environnant, et de son accroche à ce dernier par le réseau viaire.

Restitutions graphiques des variantes « productives »



Figure 50 : Variante « productive » Belfort



Figure 51 : Variante « productive » Hers

Verbatim groupe Belfort

« Travailler sur la compacité laisse peu de marges dans un îlot de centre historique, mais une densité moindre liée à une ouverture du cœur d'îlot peut être compensée par la construction de bâtiments plus élevés aux coins de l'îlot. Nous proposons donc de supprimer un bâtiment pour créer une ruelle traversant l'îlot. Si on décide ainsi d'ouvrir l'îlot, il faut préserver la compacité, ce qui est une contrainte forte de cet archétype urbain. Pour ce faire nous proposons sur les angles des îlots de monter des bâtiments de grande hauteur. Ceci permettra parallèlement d'augmenter les possibilités de captation solaire et de réduire l'effet d'ombres portées sur les autres bâtiments. »

Verbatim groupe Hers

« Dans ce scénario 2, on a fait fi de toute compacité, pour toujours nous intéresser sur les combinatoires que nous pourrions avoir en termes de hauteurs, à partir de ce système en peigne : comment aller de hauteur on va dire basse à du bâti qui peut être plus haut, tout en passant par des intermédiaires ici. Dans ce scénario 2, on rase tout ! »

4.7.4. Enseignements de l'atelier

L'atelier du 20 avril 2017 a permis de reconduire une formule de travail collaboratif, sous forme de trois groupes de participants, chacun ciblé sur un quartier prédéfini.

Cette formule de travail avait été particulièrement appréciée des participants à l'atelier 1 par « la mise en situation d'intervenir » qu'elle leur proposait, la possibilité de s'affranchir

des contraintes urbanistiques habituelles et de progresser ensemble, avec leurs différents profils professionnels, dans une vraie démarche de projet partagé.

Il a semblé évident de reconduire cette organisation et ces objectifs pour l'atelier 2, choix qui a été fort apprécié et confirmé par les participants. Dans la mesure du possible, la composition des groupes par quartier a été conservée. Forts de leur expérience lors de l'atelier 1, les participants se sont impliqués plus rapidement dans la démarche de projet et sont allés beaucoup plus loin, s'affranchissant des contingences réglementaires, ou de politiques locales.

L'acculturation commune à un sujet nouveau pour tous, la complémentarité des profils professionnels représentés et l'exercice progressif qui leur a été proposé (atelier 1, modélisation des projets, puis atelier 2, avant nouvelles modélisations des projets : « *on a donc des résultats tangibles sur les projets urbains proposés* ») apparaissent comme des facteurs très favorisant dans l'ambition à donner aux projets urbains et dans leur réelle co-construction.

Ce temps et cette démarche d'appropriation semblent opportuns à retenir dans une phase ultérieure de déploiement méthodologique.

Le cheminement urbanistique suivi par chacun des trois groupes a montré plusieurs similitudes.

Ils ont en effet construit des raisonnements urbains assez similaires, dès lors que leur choix s'était porté sur la même variante (économe ou productive notamment), quel que soit le quartier.

Il est à signaler que la variante « économe » a toujours été retenue de prime abord, avant les deux autres variantes.

Une convergence a été observée sur le choix des indicateurs pour chaque type de variante. Des convergences sont à noter également sur la hiérarchie retenue pour les indicateurs à privilégier dans la phase de conception urbaine.

En complément, la végétation a été systématiquement identifiée pour son rôle modérateur en termes d'ombrage, de protection et pour son albédo, dans tous les groupes, même en hypercentre.

Le rôle du dessin (et du dessinateur) est apparu important dans chacun des groupes, à la fois outil de résolution de problème et de formalisation de solutions, établissant un rapport entre dessin – dessein et dessin – formalisation.

La répartition des différents profils professionnels au sein des groupes a sans doute joué sur ces similitudes, en provoquant un échange d'argumentaires et une complémentarité favorables à la démarche de co-construction des projets urbains.

On note cependant l'influence manifeste des typo-morphologies initiales de chaque quartier sur le choix des variantes retenues.

Sur le quartier Castors, le critère de confort thermique d'été, évoqué dès l'atelier 1, a été déterminant dans le choix des deux variantes et des axes de projets dessinés.

Sur le quartier de Belfort, la question de la forme urbaine a constitué une entrée majeure, au vu du tissu urbain dense et ancien au sein duquel se place l'îlot Belfort ; l'articulation

étroite et contrainte entre compacité, densité et performance énergétique a constitué un vrai défi en termes d'innovation.

Sur le quartier Château de l'Hers, la typologie a priori très particulière du quartier, jugée peu modulable dans l'atelier 1, a fait l'objet d'une démarche urbaine à « contre-pied » et a finalement permis d'innover fortement dans le projet, en jouant sur la compacité et les prospects.

Verbatim groupe Belfort

« Cet atelier nous a permis d'aller plus loin que les analyses purement techniques ou réglementaires traditionnelles, en abordant la dimension urbaine, et sa composante morphologique. »

« En tant que bailleur social, aujourd'hui nous investissons beaucoup d'argent pour isoler nos bâtiments (80 millions d'euros sur 10 ans). Quand on voit que la compacité du bâtiment qu'on construit a beaucoup plus d'impact que ce sur quoi nous investissons, c'est un résultat extrêmement éclairant. La conception compte plus que le traitement du bâtiment, plus que les systèmes et les technologies qu'on vient plaquer dessus. »

Verbatim groupe Hers

« L'objectif de ces deux scénarios, le 1er un peu plus compact et le 2nd beaucoup plus ouvert, est d'apprécier comment la compacité et les prospects peuvent jouer positivement ou négativement dans la performance. »

4.7.5. Conclusion- Mise en perspective

Cet atelier a permis de collecter de nombreuses données orales ou écrites qui sont présentées plus en détail dans les annexes. En annexe 9.2, est présenté l'ensemble des transcriptions des synthèses par groupe et par atelier. En annexe 9.3, sont présentées les fiches de restitution des trois groupes. En annexe 9.4, est présenté un ensemble de productions graphiques issues de cet atelier.

Un article sur cet atelier n°2 a été rédigé dans le cadre de la lettre d'actualités de l'aua/T du mois de mai 2017 : <http://www.aula-toulouse.org/spip.php?article1725>

Des articles scientifiques et de vulgarisation seront parallèlement préparés lors de la dernière année du projet.

Suite à ces ateliers et à l'implémentation des projets ébauchés dans le travail de modélisation en cours, un temps de restitution des analyses croisées est envisagé début 2018 auprès d'un public élargi comprenant l'ensemble des acteurs professionnels invités aux deux ateliers de production. Au-delà de la présentation de la démarche et des résultats scientifiques, ce temps dédié permettra la mise au débat des thématiques transversales.

Une plaquette synthétique de restitution sera également produite et diffusée aux acteurs professionnels à l'occasion de ce temps d'échanges, puis plus largement via les voies de communication habituelles de l'aua/T.

4.8. Analyse de sensibilité énergétique contextualisée

Objectifs

L'objectif de ce chapitre est d'identifier l'ensemble des indicateurs les plus sur le bilan radiatif des façades et le comportement énergétique (besoins de chauffage et refroidissement) des bâtiments d'un îlot situé (contextualisé) de référence. Nous cherchons également à comparer les résultats de cette analyse aux résultats obtenus avec l'étude précédemment réalisée à partir d'un îlot dit statistique (générique) (Voir Chapitre 4.6). Les facteurs les plus influents joueront un rôle prépondérant dans la définition du cahier des charges de la partie optimisation de notre projet (Voir Chapitre 4.9).

Méthode d'analyse

Nous utilisons la méthode du plan d'expérience par la méthode factorielle fractionnée mise en place par un couplage du modèle CitySim dans la plateforme statistique modeFRONTIER® présentée en Chapitre 4.6.

4.8.1. L'archétype BELFORT

a) Vectorisation de l'archétype contextualisé

Afin de pouvoir paramétrer les indicateurs et étudier leur sensibilité par une étude statistique factorielle, telle que présentée dans le chapitre 4.6, il a fallu simplifier la forme de l'îlot originel, très riche en détails considérés non-relevant dans la définition de l'archétype.

Ici, nous cherchons à optimiser les trois typologies urbaines étudiées, en travaillant sur les paramètres majeurs qui les définissent à l'échelle du quartier et de l'îlot. Nous ne sommes pas intéressés par les détails plus ou moins aléatoires de la forme des bâtiments à l'échelle architecturale. Le type urbain ici peut être défini comme un modèle de référence qui met en valeur les principaux traits les plus fréquents d'une forme bâtie à l'échelle urbaine et qui exercera le plus d'influence sur la performance énergétique.

Pour simplifier la géométrie des bâtiments, on réduit l'impact de la complexité sur les résultats, ce qui permet d'approfondir la compréhension en ce qui concerne les liens entre les typologies et les besoins énergétiques ou le potentiel d'énergie solaire (RATTI, RAYDAN e STEEMERS, 2003) (COMPAGNON, 2004) (GRIEGO, KRARTI e HERNANDEZ-GUERRERO, 2012) (COMPAGNON e RAYDAN, 2000). En outre, on sait que dans le processus de conception architecturale, les décisions cruciales sont prises dans les premières étapes de la conception, lorsque le concepteur a besoin de mettre en place le volume, la proportion, la compacité, l'implantation et l'orientation, en appliquant souvent des paramètres de régulation locale urbaine (COS, CES etc..).

Nous avons donc procédé à une simplification tout en gardant, d'un côté, toutes les caractéristiques définissant l'archétype « immeubles continus sur îlot fermé », et d'autre part, toutes les caractéristiques définissant l'îlot-type choisi, son orientation, sa situation dans la scène urbaine existante, ainsi que toute la gamme de matériaux qui le compose (Figure 52).



Figure 52 : processus de simplification de l'îlot Belfort situé.

L'îlot simplifié a été ensuite vectorisé afin de pouvoir attribuer la définition des facteurs qui nous faisons varier et de pouvoir indiquer les différents intervalles de variation. Pour chaque bâtiment, défini par des coordonnées géographiques (x,y,z), nous avons programmé un vecteur variable, à partir duquel tous les facteurs morphologiques ont pu être calculés (Figure 53).

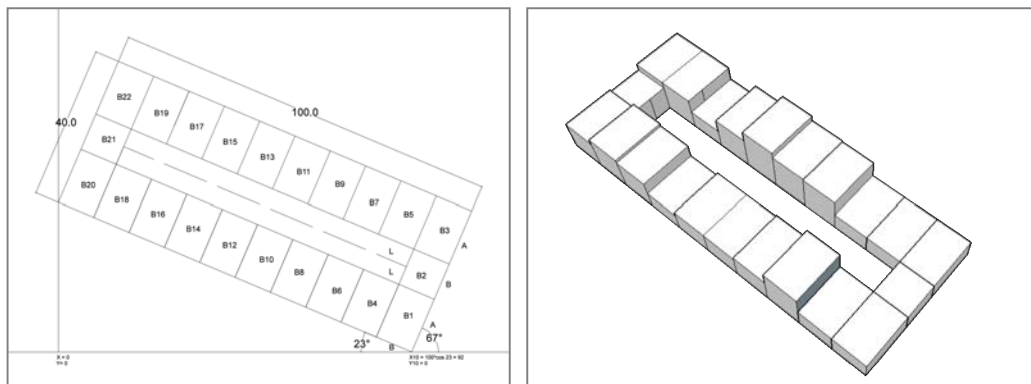


Figure 53 : schéma pour la vectorisation de l'îlot simplifié Belfort.

A partir d'une coordonnée géographique de départ liée à la situation de l'îlot concerné, nous avons ainsi pu décliner toutes les autres coordonnées de l'îlot (Figure 54).

B1	X	Y	Z
V0	92	0	0
V1	$92 - B\cos 23$	$B\sin 23$	0
V2	$92 - B\cos 23 + A\sin 23$	$A\cos 23 + B\sin 23$	0
V3	$92 + A\sin 23$	$A\cos 23$	0

B2	X	Y	Z
V0	$92 + A\sin 23$	$A\cos 23$	0
V1	$92 - B\cos 23 + A\sin 23$	$A\cos 23 + B\sin 23$	0
V2	$92 - B\cos 23 + (A+B)\sin 23$	$(A+B)\cos 23 + B\sin 23$	0
V3	$92 + (A+B)\sin 23$	$(A+B)\cos 23$	0

BN0	X	Y	Z
V0	V1 précédent Bâtiment pair	V1 précédent Bâtiment pair	0
V1	$92 - N*B\cos 23$	$N*B\sin 23$	0
V2	$92 - N*B\cos 23 + (A+B)\sin 23$	$(A+B)\cos 23 + N*B\sin 23$	0
V3	V2 précédent Bâtiment pair	V2 précédent Bâtiment pair	0

BN1	X	Y	Z
V0	V1 précédent Bâtiment impair	V1 précédent Bâtiment impair	0
V1	$92 - N*B\cos 23 + (A+B)\sin 23$	$N*B\sin 23 + (A+B)\cos 23$	0
V2	$92 - N*B\cos 23 + (2A+B)\sin 23$	$(2A+B)\cos 23 + N*B\sin 23$	0
V3	V2 précédent Bâtiment impair	V2 précédent Bâtiment impair	0

Figure 54 : vectorisation des coordonnées géographiques de l'îlot Belfort simplifié.

Pour l'îlot Belfort, nous avons considéré les bâtiments ayant une profondeur et une largeur moyenne de 20m et 10m, respectivement, comme non-variables. Suite aux discussions ayant eu lieu lors des ateliers participatifs. Nous sommes partis du principe que, si nous préservons la définition de l'archétype (« immeubles continus sur îlot fermé »), la modification de ces paramètres n'aura pas d'influence significative sur le bilan global des îlots, et augmentera le nombre de variantes à tester. Toutefois, la modification de la profondeur pourrait tout de même modifier le degré d'ouverture du cœur de l'îlot. C'est pour cela que nous avons parallèlement considéré une largeur du cœur de l'îlot, définissant un nouvel indicateur proposé dans cette étude et supposé avoir une influence considérable sur le bilan global : **le prospect du cœur d'îlot (prospect patio)**.

Les tableaux ci-dessous (Tableau 15 et Tableau 16) décrivent l'ensemble de facteurs considérés dans l'étude de l'îlot Belfort et ses intervalles de variations.

Largeur Rue	Largeur (X)	Profondeur (Y)	Largeur Patio	Hauteur moyenne	Ecart-type Hauteur	Prospect moyen	Prospect Patio	Ratio vitrage	COS	CES	Compacité
m	m	m	m	m	m	m	m	%	/	/	/
10	10	20	0 ↓ 5	6 ↓ 30	0 ↓ 15	0,6 ↓ 3	0,9 ↓ 30	0,2 ↓ 0,9	0,3 ↓ 10,3	0,05 ↓ 0,85	0,4 ↓ 1,0

Tableau 15 : facteurs morphologiques et les variations considérées dans l'étude.

Albédo Façade	Epaisseur brique	Conductivité	Protection solaire	Densité matériau	Chaleur Spécifique	Coefficient Transmission thermique des vitrages	Coefficient. Transmission thermique des parois	Facteur Solaire(FS)	Epaisseur isolant	Epaisseur toiture	Albédo Sol
/	m	W/m ² K	/	Kg/m ³	J/Kg. K	W/m ² K	W/m ² K	/	m	m	/
0,1 ↓ 0,9	0,01 ↓ 0,6	0,02 ↓ 200	oui ↓ non	1,0 ↓ 2500	0,1 ↓ 0,9	1,3 ↓ 5,0	0,7 ↓ 4,8	0,1 ↓ 0,9	0,01 ↓ 0,6	0,01 ↓ 0,6	0,1 ↓ 0,9

Tableau 16: facteurs typo-morphologiques et les variations considérées dans l'étude.

b) Résultats et analyses

A partir d'un test statistique d'hypothèse, nous avons pu donc obtenir la magnitude d'effet relative des différents facteurs considérés. Dans les graphiques qui suivent, nous discuterons l'impact relatif de chaque facteur sur chacune des réponses d'intérêt et la sens de l'effet (Figure 55, Figure 56 et Figure 57). Ensuite nous examinerons également l'effet d'interaction entre les facteurs deux à deux.

A partir des résultats obtenus pour les besoins de chauffage dans le quartier de Belfort, nous avons déjà pu constater une différence importante avec les résultats de l'étude de sensibilité précédente (réalisée avec un îlot dit générique généralisable de manière statistique- voir chapitre 4.6).

Nous avons pu constater que, ne modifiant pas la largeur et la profondeur des bâtiments, le coefficient d'emprise au sol (CES) a, par voie de conséquence, un impact moindre dans ce type de quartier. Ce qui est à contraire à ce qui a pu être vérifié dans la première étude (voir chapitre 4.6).

A partir des résultats présentés dans la Figure 55, nous pouvons remarquer l'effet important de deux facteurs sur les besoins en chauffage du quartier de Belfort, mais dans des sens opposés : l'écart type de la hauteur bâtie (effet inverse) et le prospect du cœur d'îlot (effet direct). Un écart-type de la hauteur bâtie important entraine une réduction des besoins énergétiques pour le chauffage. Un prospect de cœur d'îlot élevé entraine, a contrario, une augmentation des besoins.

L'augmentation de l'écart-type de la hauteur fait augmenter le nombre de surfaces non-contiguës et exposées à l'extérieur, dans ce cas, sur un axe Est –Ouest, ce qui peut favoriser les apports solaires. Ce résultat inattendu nous amène à croire que la recherche d'un écart-type important dans une orientation comme Est-Ouest pourrait compenser les déperditions liées à une plus faible contiguïté. Nous pouvons confirmer cet analyse au regard des résultats obtenus pour l'impact de facteurs sur l'irradiation solaire incident sur les façades Est de l'îlot Belfort (Figure 55) que nous examinerons plus loin.

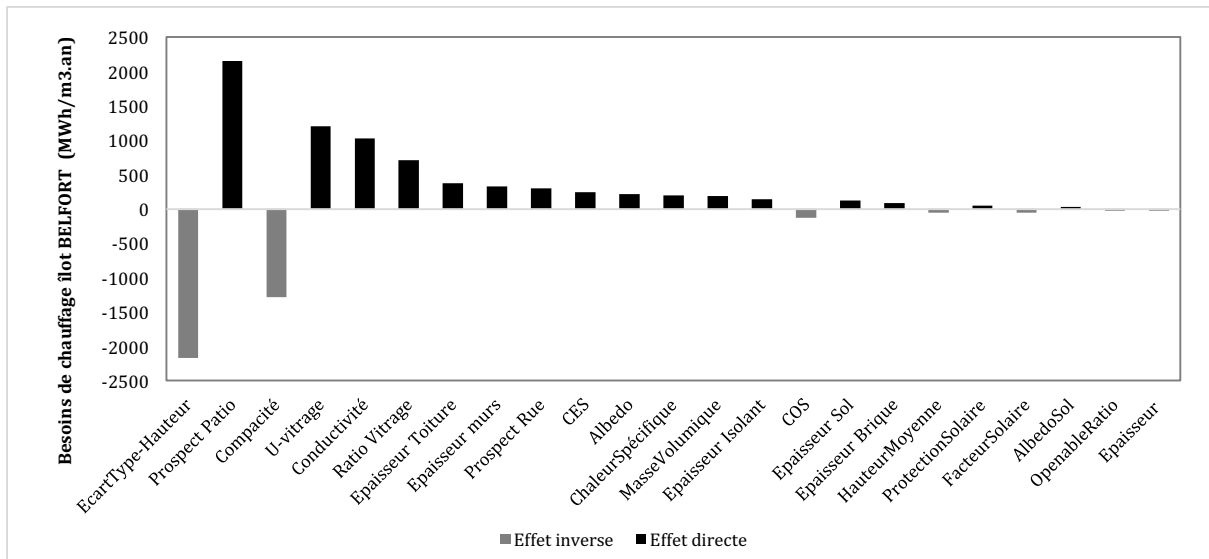


Figure 55 Tableau 1: magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins en chauffage du quartier BELFORT.

Toutefois, selon l'intervalle de confiance adopté (signification = 0,05), les deux facteurs mentionnés ayant un impact important, se trouvent en dehors de la marge de signification de notre test. Cinq facteurs typo-morphologiques pourraient être mis en évidence pour leur influence sur la réponse en termes de besoins de chauffage, dans cet ordre d'impact : la compacité de l'îlot, le coefficient de transmission surfacique des vitrages (U-vitrage), la conductivité des matériaux, le ratio de vitrage et l'épaisseur de la composition de la toiture (Tableau 17).

Bien que ces cinq facteurs, qui jouent un rôle important dans cette réponse, soient des variables couramment connues dans la conception thermique du bâtiment, cette étude nous permet de les mettre en évidence et de les hiérarchiser.

Facteurs	Magnitude d'effet (MWh/m³)	Significatio n	t-Student
Ecart-Type Hauteur	-2168	0,17	1,19
Prospect Patio	2153	0,18	1,17
Compacité	-1278	0,00	8,64
U-vitrage	1207	0,00	7,85
Conductivité	1032	0,00	6,02
Ratio Vitrage	708	0,00	4,03
Epaisseur Toiture	379	0,02	2,03

Tableau 17 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant les besoins de chauffage pour les bâtiments de l'îlot Belfort.

En ce qui concerne les besoins de refroidissement, cinq facteurs ont été mis en évidence, dans cet ordre : la conductivité des matériaux, le facteur solaire, la protection solaire, le coefficient de transmission des vitrages et l'épaisseur des murs (Figure 56 et Tableau 18).

De manière similaire à l'analyse pour les besoins de chauffage, les indicateurs à l'échelle de l'enveloppe et des matériaux jouent un rôle plus décisif pour les besoins de refroidissement.

Plus les matériaux choisis sont conductifs, plus la chaleur sera facilement admise à l'intérieur des espaces, plus la charge thermique à évacuer sera importante.

D'une part, plus le facteur solaire d'une paroi vitrée est important, plus la charge de climatisation sera importante. Le facteur solaire d'une paroi est le rapport entre le rayonnement solaire transmis et l'énergie incidente sur la paroi. D'autre part, la présence d'un dispositif de protection solaire permettrait de mitiger l'énergie solaire reçue par les ouvertures dans la période d'été, cette fois-ci en réduisant les besoins de climatisation.

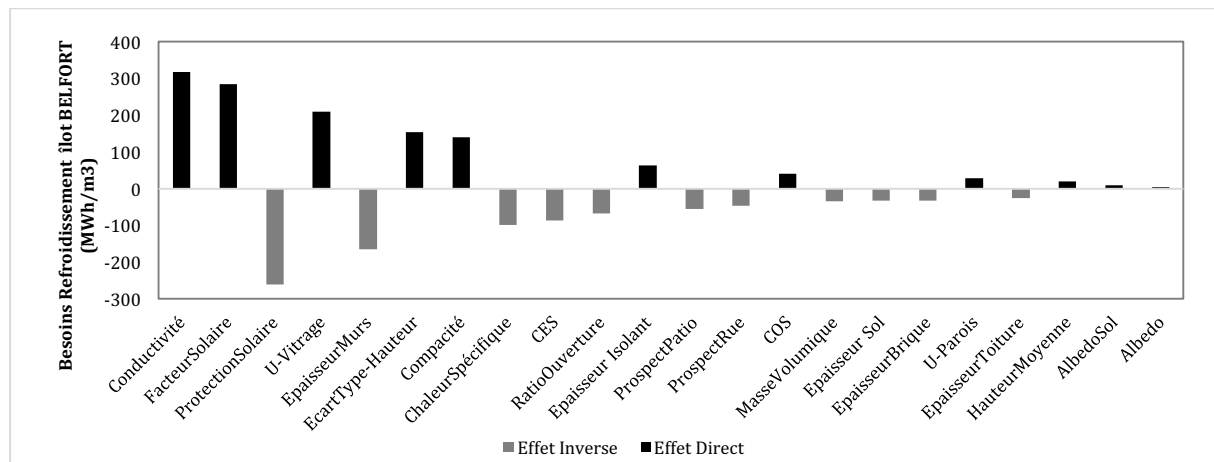


Figure 56 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins en refroidissement du quartier BELFORT.

Facteurs	Magnitude d'effet (MWh/m ³)	Signification	t-Student
Conductivité	317	0,00	3,571540493
Facteur Solaire	284	0,00	3,6164674
Protection Solaire	-260	0,00	3,25438933
U-Vitrage	209	0,00	2,796368706
Epaisseur Murs	-164	0,02	2,034598454

Tableau 18 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant les besoins de refroidissement pour les bâtiments de l'îlot Belfort.

Pour le taux d'irradiation solaire arrivant sur les toitures des bâtiments de l'îlot Belfort, on constate une magnitude d'effet plus significative pour des facteurs typiquement morphologiques à l'échelle urbaine, tel que le prospect de patio, l'écart-type de la hauteur bâtie, le COS, la hauteur moyenne des bâtiments et le prospect moyen sur rue.

Quand on pousse à l'extrême supérieur de l'intervalle du prospect de patio (défini par le rapport entre la hauteur moyenne bâtie et la largeur du cœur de l'îlot), un gain de 291

kWh/m².an peut être obtenu. Cela signifie que plus la largeur du patio est faible, plus la surface bâtie de l'îlot est importante, plus la surface (relative) potentielle de captation solaire est significative.

A l'inverse, nous pouvons vérifier un effet aussi très important de l'écart-type de la hauteur. Plus ce facteur est important, moins l'irradiation solaire arrive sur les surfaces de toiture de l'îlot. Cela peut être facilement expliqué par le fait que cela génère plus d'obstruction sur ces surfaces.

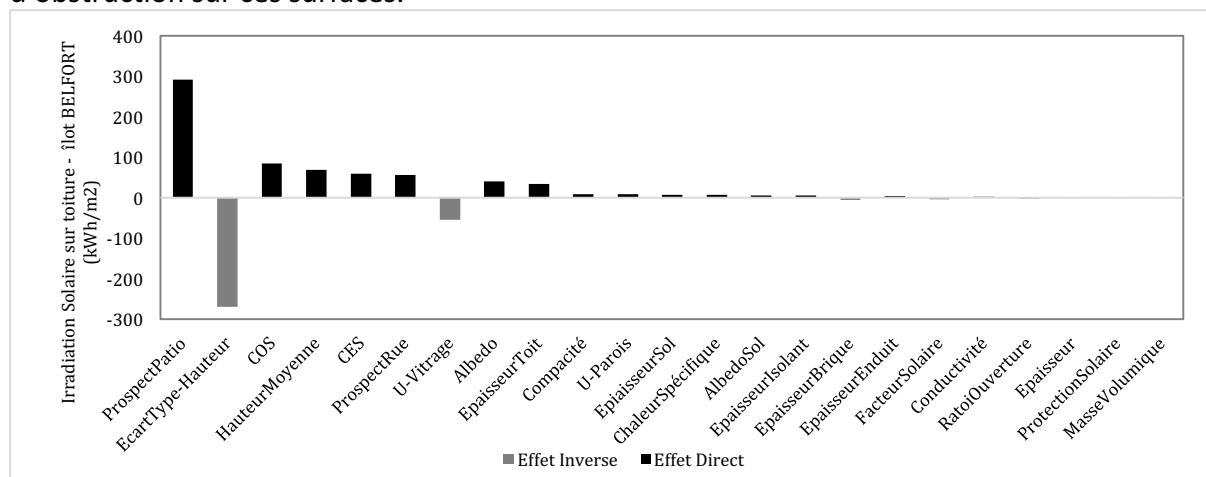


Figure 57 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur l'irradiation solaire des toitures de l'îlot BELFORT.

Facteurs	Magnitude d'effet (kWh/m ² .an)	Signification	t-Student
Prospect Patio	291,0	0,00	6,82
Ecart Type-Hauteur	-268,6	0,00	6,16
COS	85,5	0,00	6,15
Hauteur Moyenne	69,8	0,00	5,60
CES	59,6	0,04	1,79
Prospect moyen	57,2	0,00	4,46
U-Vitrage	-53,9	0,00	4,31
Albédo	41,0	0,00	3,45
Epaisseur Toiture	33,7	0,00	2,61

Tableau 19 : taille d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant le taux d'irradiation solaire arrivant sur les toitures des bâtiments de l'îlot Belfort.

En ce qui concerne l'irradiation incidente sur une des surfaces verticales de l'ensemble des bâtiments (façade Est), la hiérarchie de l'impact des facteurs est très proche de celle correspondant à la réponse d'irradiation des toitures (Figure 58). Néanmoins la magnitude d'effet ne varie pas toujours dans la même direction, à l'instar de l'écart-type de la hauteur. Ce dernier exerce un impact direct sur l'irradiation solaire de la façade Est. Quand on le pousse à l'extrême supérieur de l'intervalle, un apport solaire d'environ 100 kWh/m².an peut être vérifié sur cette surface (Tableau 20).

Inversement, plus le prospect de patio est élevé, plus l'énergie solaire arrivant sur ces surfaces est faible. Cela peut être expliqué par le fait que, moins il y a des façades

exposées pouvant augmenter la captation de l'énergie solaire par inter réflexions à l'intérieur du patio, moins il y a d'irradiation incidente sur les surfaces examinées.

L'albédo présente aussi un effet direct important, c'est-à-dire plus les surfaces sont réflexives, plus il existe d'inter-réflexions à l'intérieur d'une scène urbaine.

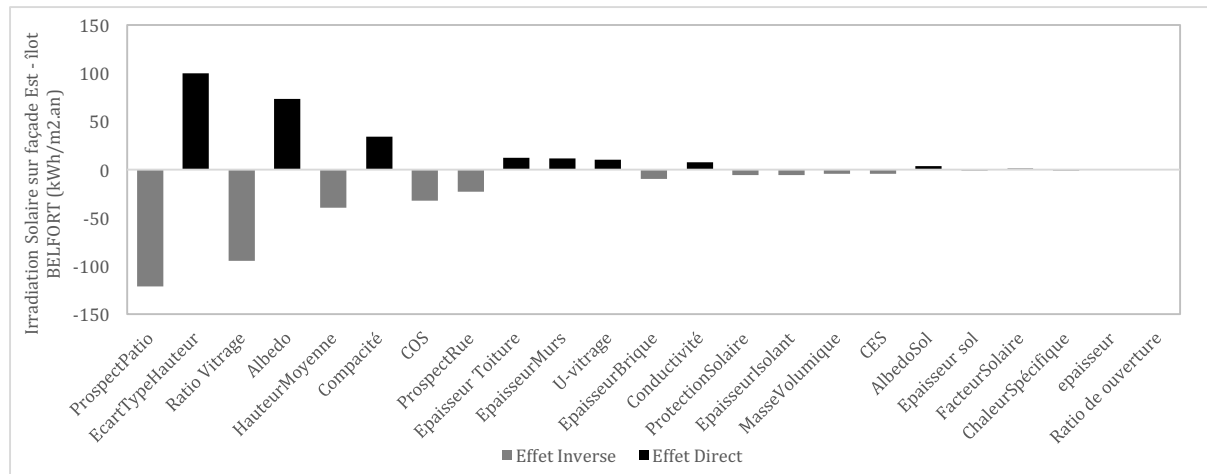


Figure 58 : magnitude d'effet des différents facteurs typo-morphologiques sur l'irradiation solaire des façades Est de l'îlot BELFORT.

Facteurs	Magnitude d'effet (kWh/m².an)	Signification	t-Student
Prospect Patio	-121,01	0,00	2,75
Ecart-Type Hauteur	99,49	0,01	2,24
Ratio Vitrage	-94,65	0,00	9,28
Albédo	73,2	0,00	8,04
Hauteur Moyenne	-39,40	0,00	3,21
Compacité	34,39	0,16	0,98
COS	-32,05	0,01	2,27
Prospect Rue	-23,07	0,03	1,85

Tableau 20 : magnitude d'effet et signification des résultats des tests statistiques concernant le taux d'irradiation solaire arrivant sur les façades Est des bâtiments de l'îlot Belfort.

Avant qu'on puisse en tirer de conclusions, il est nécessaire d'évaluer l'effet de l'interaction entre ces facteurs ou variables de projet. Pour ce faire, le graphique des quantiles demi-normaux des effets, basé sur les valeurs absolues de l'effet estimé sur les probabilités normales cumulatives, a été mis en œuvre (MONTGOMERY, 2001). Un graphique de ce type est utile pour distinguer les effets les plus importants (en haut et à droite) et les moins importants (en bas et à gauche), en considérant les effets principaux aussi que ceux d'interaction de premier ordre. Une interaction forte signifie que l'effet d'une variable dépend de la réponse d'une autre. Dans les graphiques ci-dessous (Figure 59, Figure 60 et Figure 61), les carrés noirs représentent l'effet direct sur la réponse : lorsque la valeur d'une variable augmente, la valeur de la réponse augmente également. De la même manière, l'effet inverse sur la réponse est représenté par les carrés gris.

La Figure 59 ci-dessous, permet de vérifier les mêmes effets principaux que dans l'analyse précédente par rapport aux besoins de chauffage dans l'îlot Belfort, démontrant à nouveau la grande influence du prospect patio et de l'écart-type de la hauteur bâtie de l'îlot. En outre, il est également possible de vérifier l'effet d'une interaction remarquable entre ces variables. On retrouve également l'effet principal de la compacité et du coefficient de transmission surfacique des vitrages.

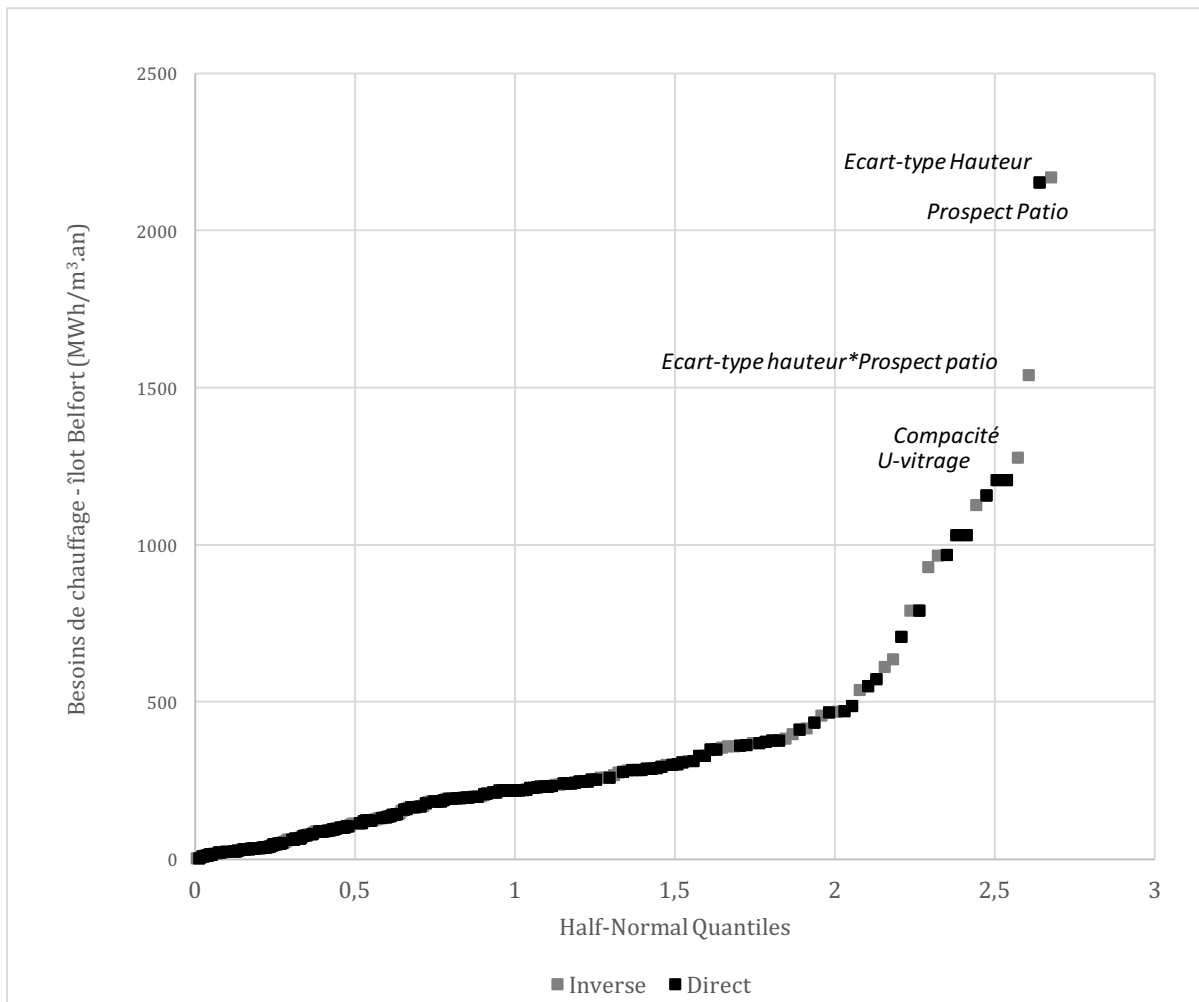


Figure 59 : magnitude d'effet principal et d'interaction entre les différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins en chauffage du quartier BELFORT (*half-normal plot*).

La Figure 60 nous montre les effets principaux et d'interaction de premier ordre des facteurs typo-morphologiques sur les besoins de refroidissement. Nous constatons que l'effet d'interaction entre certains facteurs s'imposent à leur effet principal. Par exemple, la compacité présentait un effet direct principal moins important, étant responsable d'une augmentation d'environ 140 MWh/m³.an sur l'ensemble des bâtiments (Figure 56), quand poussée à l'extrême de son intervalle de variation. Parallèlement, ce même paramètre devient prioritaire si on regarde les effets

d'interactions de premier ordre avec notamment la conductivité des matériaux. La magnitude d'effet de la compacité des bâtiments est plus de deux fois supérieure quand associée à ce dernier facteur.

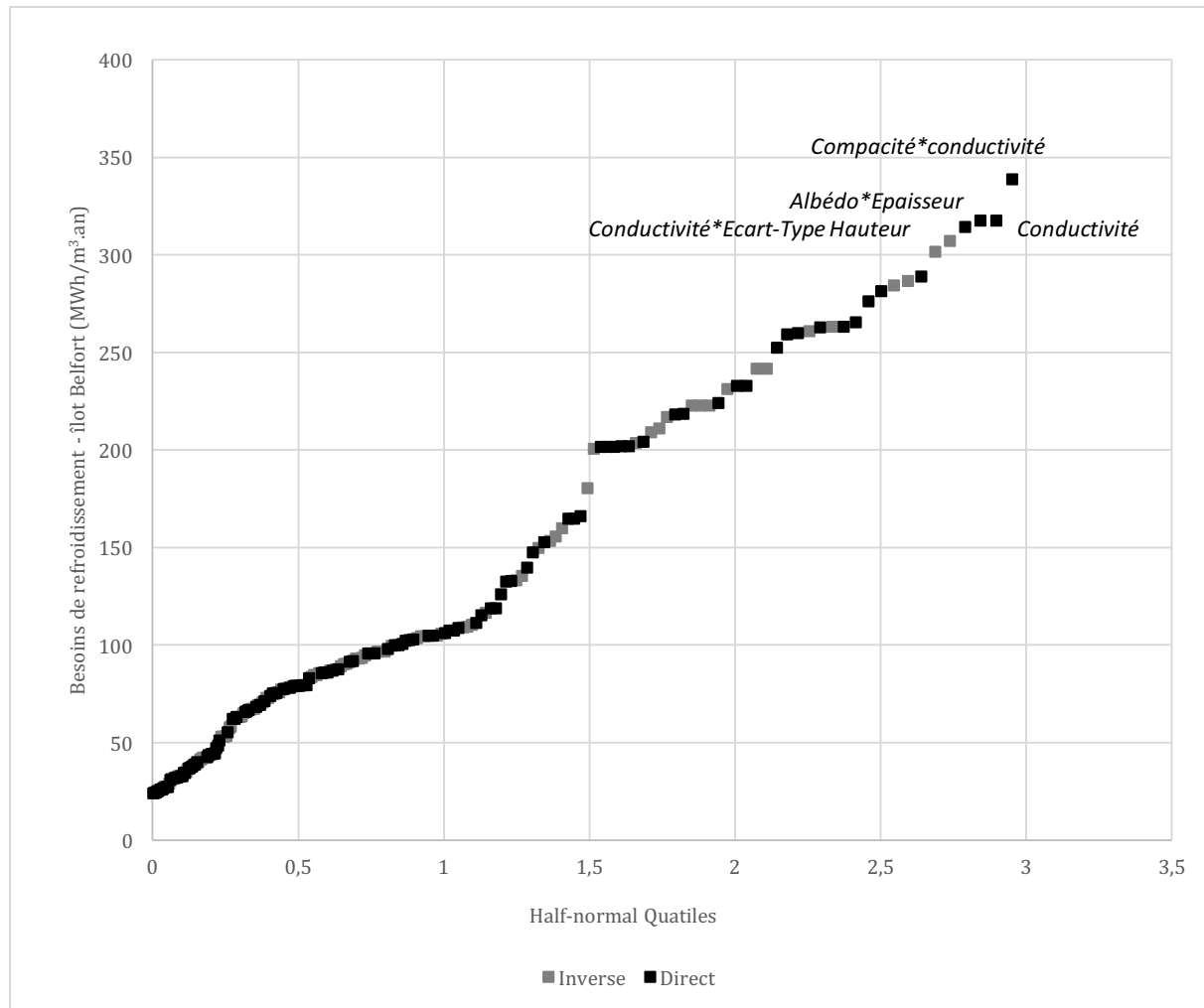


Figure 60 : magnitude d'effet principal et d'interaction entre les différents facteurs typo-morphologiques sur les besoins en refroidissement du quartier BELFORT (*half-normal plot*).

La Figure 60 nous montre les effets principaux et d'interaction de premier ordre des facteurs typo-morphologiques sur le taux d'irradiation solaire sur les toitures des bâtiments de l'îlot Belfort.

Cette fois-ci, nous retrouvons l'effet principal remarquable des deux facteurs mis en évidence précédemment, à savoir le prospect de cœur d'îlot et l'écart-type de la hauteur bâtie. Autrement dit, plus le prospect de patio est important, plus la surface moyenne de captation d'énergie solaire est importante. Dans le sens opposé, plus l'écart-type de la hauteur bâtie est élevé, moins l'irradiation solaire incidente sur les surfaces horizontales des bâtiments de cet îlot est importante. Si on pousse ce facteur à l'extrême de son intervalle de variation, l'îlot de Belfort perd l'équivalent d'environ 290 kWh/m².an de son potentiel de production d'énergie solaire.

Ensuite, nous mettons en avant l'effet d'interaction entre ces facteurs et la compacité. A nouveau, ce dernier facteur – qui a été négligé précédemment car ne présentait pas un effet principal significatif – gagne en importance quand associé au prospect de patio, et à l'écart-type de la hauteur. La magnitude d'effet de la compacité des bâtiments vis-à-vis de cette réponse solaire est plus de dix fois supérieure, quand associée au prospect de patio, ou à l'écart-type de la hauteur bâtie.

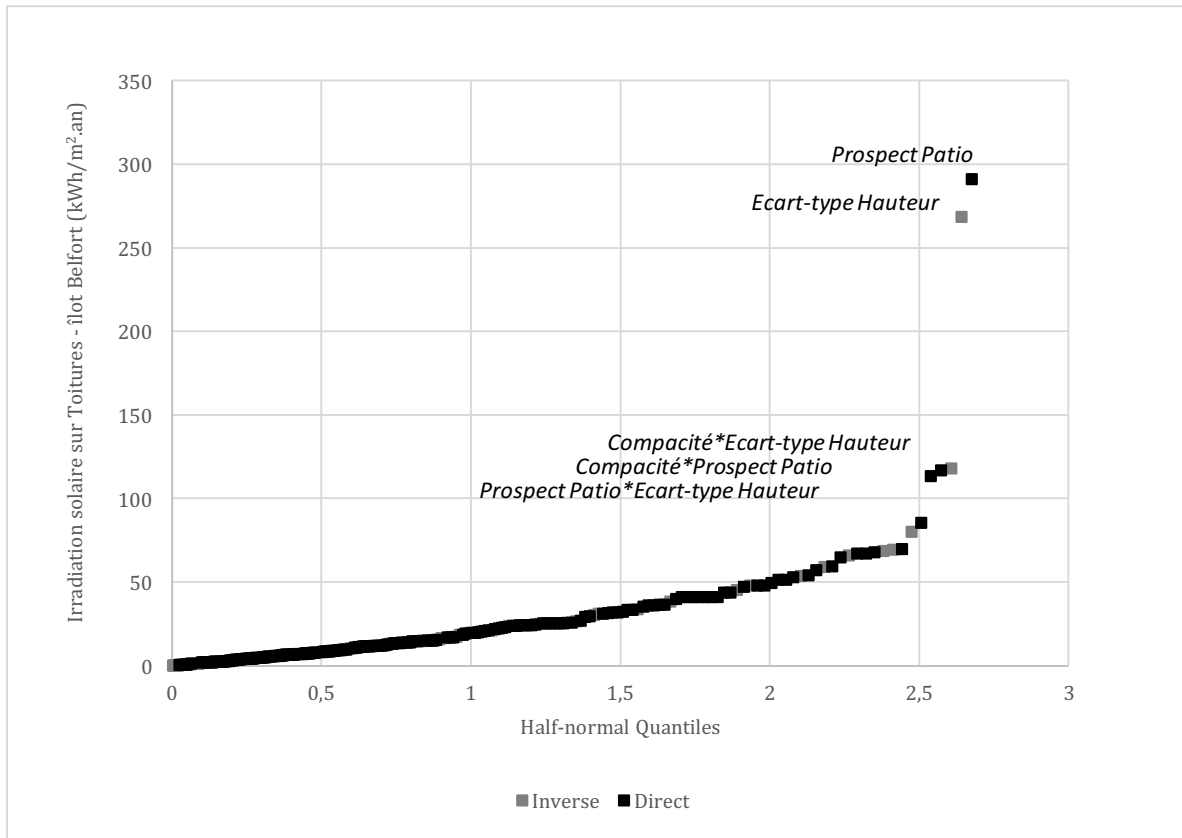


Figure 61 : magnitude d'effet principal et d'interaction entre les différents facteurs typo-morphologiques sur l'irradiation solaire arrivant sur les surfaces de toiture de l'îlot BELFORT (*half-normal plot*).

4.8.2. L'archétype HERS

Pour le cas de l'archétype Hers, nous présentons ci-après le processus de simplification raisonné de l'îlot, ainsi que sa vectorisation. Néanmoins, suite à des problèmes techniques, les simulations de ce plan d'expérience n'ont pas pu aboutir dans le temps imparti afin que les résultats puissent être traités, analysés et discutés dans ce rapport, mais figureront dans le rapport final.

a) Vectorisation de l'archétype situé

De la même manière que pour l'archétype Belfort présenté précédemment, nous avons simplifié l'îlot Hers, tout en gardant les caractéristiques définissant l'archétype « pavillon continu sur îlot ouvert », ainsi que toutes les caractéristiques définissant l'îlot-type choisi, l'orientation principale de l'ensemble des bâtiments, sa situation dans la scène urbaine existante, ainsi que toute la gamme de matériaux qui le définit (Figure 63).

L'îlot simplifié a été ensuite vectorisé afin de pouvoir y associer la définition des facteurs qui nous faisons varier, et afin de pouvoir indiquer les différents intervalles de variation. Pour chaque bâtiment défini par des coordonnées géographiques (x,y,z), nous avons programmé un vecteur variable et à partir duquel tous les facteurs morphologiques ont pu être calculés (Figure 63).



Figure 62 : processus de simplification de l'îlot Hers originel.

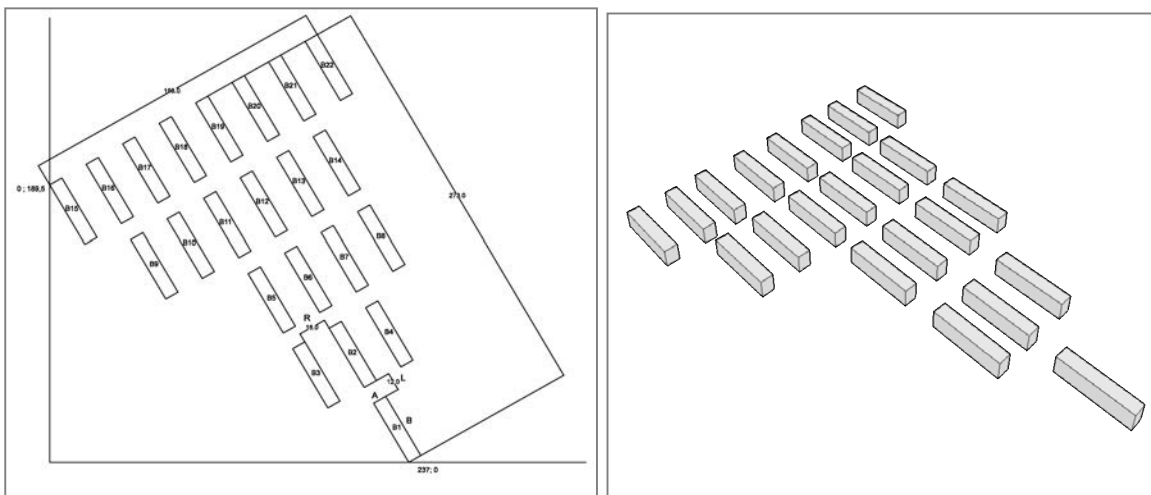


Figure 63 : processus de vectorisation de l'îlot Hers simplifié situé.

Les tableaux ci-dessous décrivent l'ensemble de facteurs considérés dans l'étude de l'îlot Hers et leurs intervalles de variations.

Largeur Rue secondaire	Largeur (X)	Profondeur (Y)	Largeur Rue principale	Hauteur moyenne	Ecart-type Hauteur	Prospect moyen	Ratio vitrage	COS	CES	Compacité
m	m	m	m	m	m	m	%	/	/	/
0 ↓ 12	20 ↓ 45	9 ↓ 12	3 ↓ 18	6 ↓ 30	0 ↓ 15	0,3 ↓ 10	0,2 ↓ 0,9	0,3 ↓ 10,3	0,05 ↓ 0,85	0,4 ↓ 1,0

Tableau 21 : facteurs morphologiques et leurs variations considérées dans l'étude.

Albédo Façade	Epaisseur murs	Conductivité	Protection solaire	Densité matériau	Chaleur Spécifique	Coefficient Transmission thermique des	Coefficient. Transmission thermique des parois	Facteur Solaire(FS)	Epaisseur isolant	Epaisseur toiture	Albédo Sol
/	m	W/m ² K	/	Kg/m ³	J/Kg.K	W/m ² K	W/m ² K	/	m	m	/
0,1 ↓ 0,9	0,01 ↓ 0,6	0,02 ↓ 200	oui ↓ non	1,0 ↓ 2500	0,1 ↓ 0,9	1,3 ↓ 5,0	0,7 ↓ 4,8	0,1 ↓ 0,9	0,01 ↓ 0,6	0,01 ↓ 0,6	0,1 ↓ 0,9

Tableau 22 : facteurs typo-morphologiques et leurs variations considérées dans l'étude.

4.8.3. L'archétype CASTORS

Également pour le cas de l'archétype Castors, nous présentons ci-après le processus de simplification raisonné de l'îlot, ainsi que sa vectorisation pour la modélisation statistique. Néanmoins, suite à des problèmes techniques, les simulations de son plan d'expérience n'ont pas pu aboutir dans le temps attendu afin que les résultats puissent être traités, analysés et discutés dans ce rapport, mais figureront dans le rapport final.

a) Vectorisation de l'archétype situé

Pour Castors, nous avons simplifié l'îlot tout en gardant les caractéristiques définissant l'archétype « pavillon continu sur îlot ouvert » : son orientation, sa situation dans la scène urbaine existante, ainsi que toute la gamme de matériaux qui le compose (Figure 64). Ensuite, nous avons procédé à une vectorisation afin de pouvoir associer la définition des facteurs que nous faisons varier et ainsi que leurs différents intervalles de variation (Figure 65).

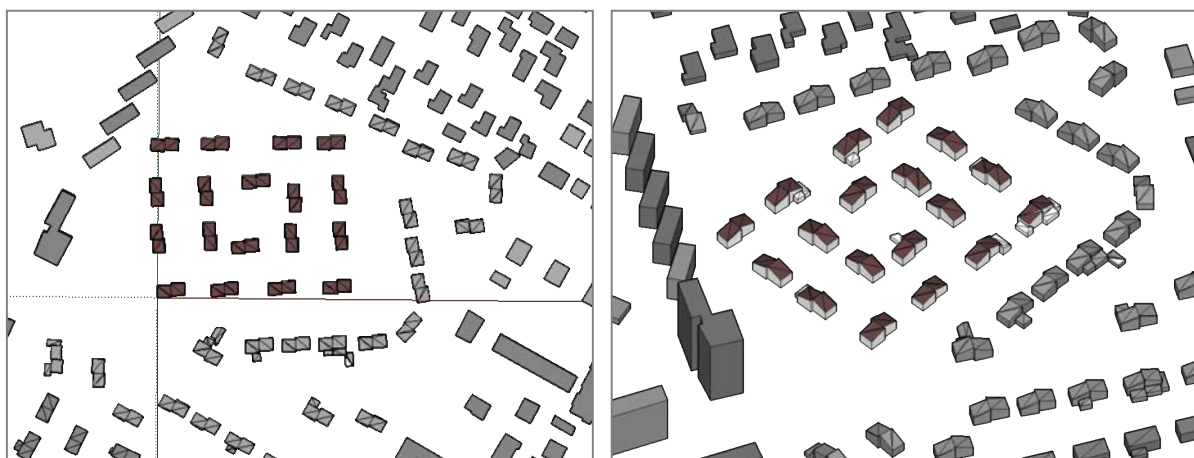


Figure 64 : processus de simplification de l'îlot Castors originel.

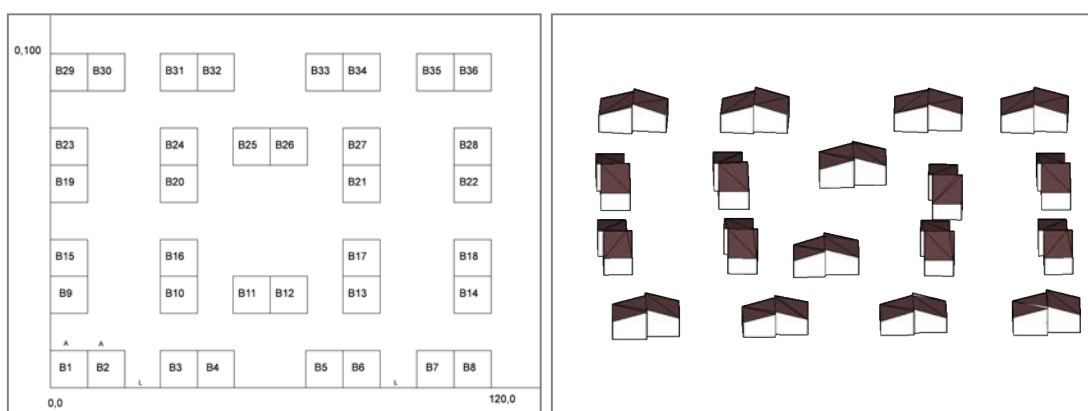


Figure 65 : schéma de vectorisation de l'îlot Castors situé.

Largeur (X)	Profondeur (Y)	Largeur Rue	Hauteur moyenne	Ecart-type Hauteur	Prospect moyen	Ratio vitrage	COS	CES	Compacité
m	m	m	m	m	m	%	/	/	/
5	5	3	3	0	0,3	0,2	0,3	0,05	0,4
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
10	10	10	15	5	5	0,9	10,3	0,85	1,0

Tableau 23 : facteurs morphologiques et leurs variations considérées dans l'étude.

Albédo Façade	Epaisseur brique	Conductivité	Protection solaire	Densité matériau	Chaleur Spécifique	Coefficient Transmission thermique des	Coefficient. Transmission thermique des parois	Facteur Solaire (FS)	Epaisseur isolant	Epaisseur toiture	Albédo Sol
/	m	W/m ² K	/	Kg/m ³	J/Kg.K	W/m ² K	W/m ² K	/	m	m	/
0,1	0,01	0,02	oui	1,0	0,1	1,3	0,7	0,1	0,01	0,1	0,1
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
0,9	0,6	200	non	2500	0,9	5,0	4,8	0,9	0,6	0,8	0,9

Tableau 24 : facteurs typo-morphologiques et leurs variations considérées dans l'étude.

4.8.4. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en avant l'importance relative d'une vingtaine de facteurs typo-morphologiques allant de l'échelle urbaine de l'îlot à l'échelle du matériau. Cette analyse répond au cahier des charges que nous nous étions fixés au démarrage du projet à savoir le traitement multiscalaire des paramètres significatifs de projets, du matériau au fragment urbain.

Pour la réponse en termes de besoins énergétiques, en ce qui concerne l'effet principal des variables, les résultats sont tout à fait cohérents avec ce qui était attendu. Les facteurs spécialement liés à l'échelle du matériau (e.g. la conductivité, le facteur solaire, le coefficient de transmission de vitrage, etc.) ont montré un impact prépondérant sur ces besoins au détriment d'une large gamme de facteurs morphologiques urbains, à l'exception de la compacité de l'îlot.

D'autre part, en ce qui concerne le potentiel de captation solaire, les facteurs les plus pertinents sont représentés par deux nouveaux indicateurs (non étudiés lors de la

première étude de sensibilité) : **le prospect de patio et l'écart-type de la hauteur bâtie qui sont fondamentaux quant à la performance des quartiers**. Le *prospect de patio* n'existe pas dans la littérature sur la performance énergétique des morphologies urbaines. *L'écart-type de la hauteur* bâtie n'apparaît que très peu dans cette même littérature. Nous pensons que même si, à la date d'aujourd'hui on ne peut utiliser ces indicateurs uniquement que pour des typologies particulières, notamment l'îlot fermé à patio « suffisamment ouvert », ce paramètre permettra d'alimenter un certain nombre de règles « expertes » mises en œuvre dans la dernière partie de notre projet, le développement de bases de données et de connaissances présentant l'ensemble de variantes « optimales ». Nous attendons les résultats des études de sensibilité sur les deux autres quartiers, Hers et Castors, pour voir si les enseignements sur l'écart type de la hauteur bâtie peuvent être généralisés

Nous remarquons aussi l'effet important de l'écart-type de la hauteur très significatif sur les besoins de chauffage lors de l'analyse d'interaction entre les facteurs. Cet effet s'applique au contexte de Belfort et, très probablement, lié à une orientation des bâtiments particulière à cet îlot. Les surfaces non-contiguës qui apparaissent avec un écart-type de la hauteur plus au moins important sur cet orientation amène manifestement à un apport solaire plus important que leur capacité à perdre de la chaleur.

Le quartier Belfort a été totalement analysé lors de cette phase du projet. Des problèmes d'incohérence dans la base de données morphologiques, ne nous ont pas permis de mener à bien la même étude contextualisée sur les deux autres quartiers, Hers et Castors, avant la production de ce deuxième rapport intermédiaire. Les simulations pour ces deux quartiers ont donc été relancées et les résultats de ces analyses de sensibilité contextualisées figureront dans le rapport final Multiplicités.

4.9. Cahier de charges pour l'optimisation

Le processus d'optimisation mis en œuvre sera basé sur une approche de génération et d'évaluation supervisées par un outil de contrôle de plans d'expériences (DOE), équivalent à celui qui a été utilisé pour réaliser l'analyse de sensibilité (ModeFrontier).

Concernant, la partie génération, il est envisagé d'évaluer deux approches de génération des formes urbaines :

- L'approche de modélisation à base de règles de production,
- L'approche générative paramétrique.

4.9.1. L'approche de modélisation à base de règles de production

L'approche de modélisation à base de règles de production utilise un formalisme de grammaire de forme pour la génération de formes urbaines à partir de la définition d'un ensemble de règles portant sur la modification ou la création d'entités qui peuvent être à la fois de la géométrie mais aussi des « objets » ou des « sous-objets » (au sens de la décomposition). Le modèle est obtenu par l'application itérative de ces règles permettant un niveau de détail de plus en plus important à partir de quelques éléments de base ainsi qu'un modèle hiérarchique des éléments qui le compose.

Dans cette méthode pour l'optimisation multidisciplinaire de processus et de projets, nous proposons l'utilisation de la plate-forme modeFRONTIER® (ESTECO, 2017). Dans modeFRONTIER®, le modèle de calcul énergétique (CitySim) peut être facilement couplé. La modélisation des projets par optimisation se produit dans l'environnement modeFRONTIER®, en définissant l'ensemble de données et le processus d'analyse.

Sur modeFRONTIER, un flux d'optimisation doit être programmé. Ce flux permet de définir les variables d'entrée (et leurs intervalles de variation), le couplage d'un ou plusieurs moteurs de calcul dynamique ou statistique aux différentes méthodes mathématiques d'analyse, les variables de sortie et les fonctions objectives de l'optimisation. Cette plateforme comporte donc deux flux principaux, le flux de données et le flux de processus.

Le flux de données se lit de gauche à droite (Figure 66), en commençant par la définition des variables de conception, puis le calcul des variables requises pour assembler le modèle de chaque configuration à simuler. Après la simulation de la configuration assemblée, le flux de données rejoint l'obtention des valeurs des réponses, la vérification des contraintes et, enfin, l'évaluation de la fonction objective.

Le flux du processus se déroule du bas vers le haut, en commençant par la définition des paramètres d'analyse (variables du type morphologique). En suivant ce flux, on commence l'analyse du projet proprement dit. Dans une première étape, on effectue l'analyse des projets, à partir desquelles l'implantation et la géométrie des bâtiments sont

hypothétiquement simulées, les bâtiments étant soumis aux différentes contraintes imposées par la faisabilité des projets.

A partir de ces configurations, la simulation dynamique démarre. Une fois le dernier processus terminé, les réponses sont extraites des fichiers de sortie générés et ces informations sont attribuées aux variables de sortie qui seront évaluées par rapport aux contraintes imposées et aux fonctions d'objectives. La Figure 66 présente le schéma général du flux d'optimisation modélisé dans le logiciel modeFRONTIER®.

Pour le moment, l'inconvénient de cet outil est lié à l'impossibilité d'afficher graphiquement des projets générés tel que le propose Grasshopper dans son couplage à Rhino (voir 4.9.2.)

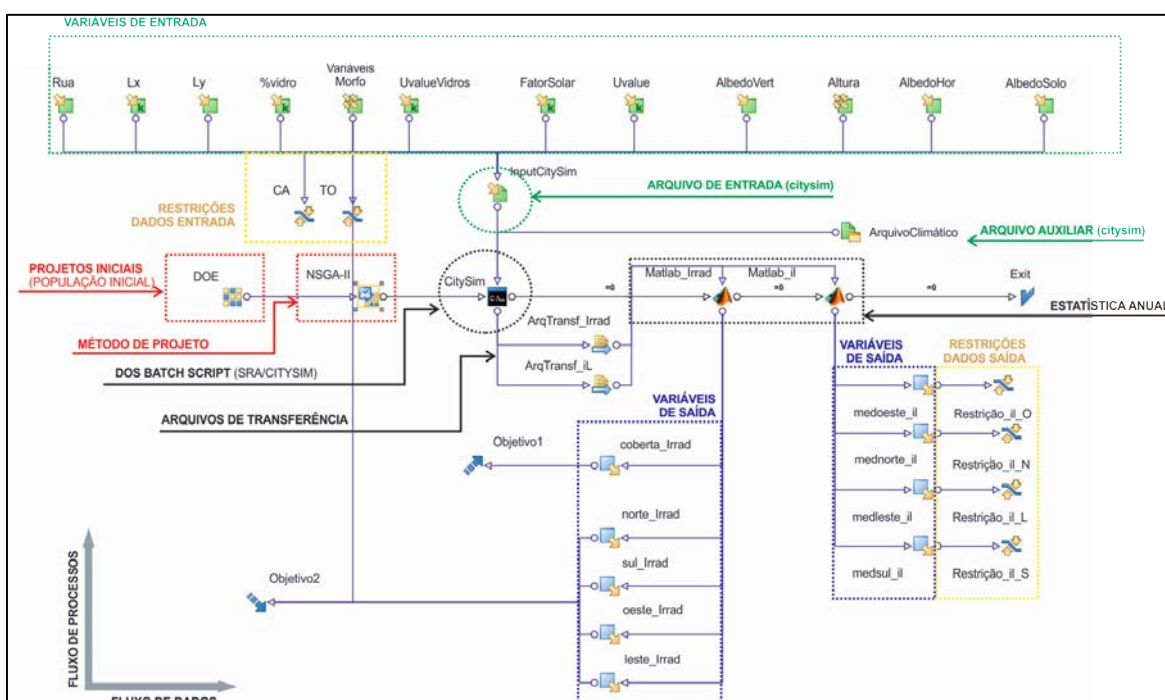


Figure 66 : flux d'optimisation décrit dans le logiciel modeFRONTIER®.

Un autre exemple d'outil de modélisation basé sur cette approche est le logiciel CityEngine (ESRI- Figure 67)¹ utilisant le formalisme des CGA (Computer Generated Architecture). Cette approche pourra être comparée avec celle de l'approche purement générative (voir plus loin) en expérimentant son application, tout en tenant compte de la contrainte complémentaire de la génération (sous contraintes des indicateurs) à l'échelle urbaine et non pas simplement à l'échelle architecturale.

¹ <http://www.esri.com/software/cityengine>

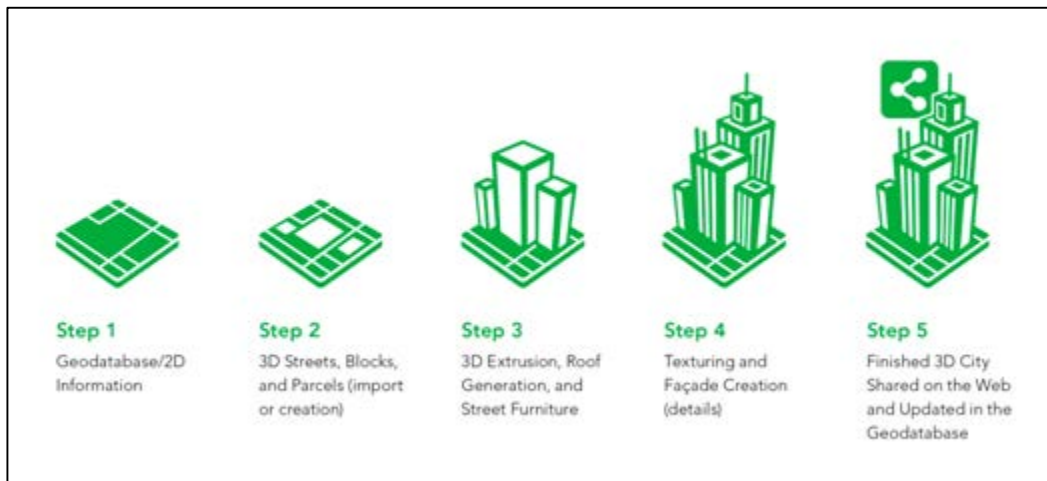


Figure 67 : Workflow permettant de créer des villes en 3D à partir des données SIG 2D/3D existantes (source ESRI)

4.9.2. L'approche générative paramétrique

L'approche générative paramétrique est basée sur la génération du modèle urbain à partir d'un ensemble de paramètres contrôlant (de manière algorithmique et procédurale) la forme résultante produite. Ces paramètres peuvent être assimilés pour certains à des indicateurs urbains, mais doivent majoritairement faire l'objet d'une analyse du processus permettant d'obtenir la forme urbaine désirée quand ils sont le résultat (où à l'origine) d'une corrélation forte entre plusieurs indicateurs distincts. Les connaissances et l'expertise issues des ateliers menés au cours du projet serviront de base à la définition des procédures définissant la nature et l'étendue (qualitative et quantitative) des processus de création des formes urbaines générées.

L'outil utilisé pour cette approche sera le couple Rhinoceros/GrassHopper qui permet de définir cette génération sous une forme de graphes définissant l'enchaînement de primitives ou de fonctions nécessaires à l'obtention du modèle de la forme urbaine (Figure 67).

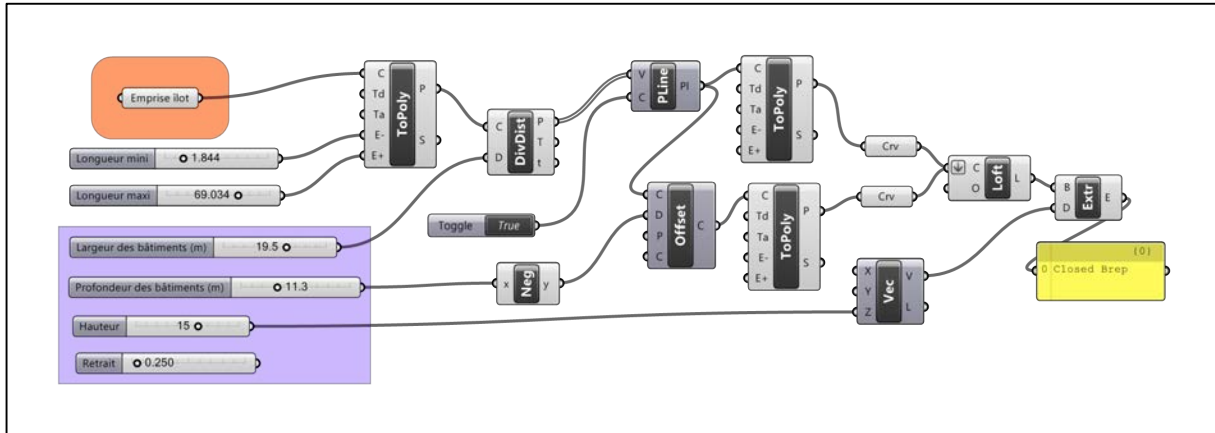


Figure 68 : Exemple de « script » Grasshopper pour la génération des bâtiments d'un îlot

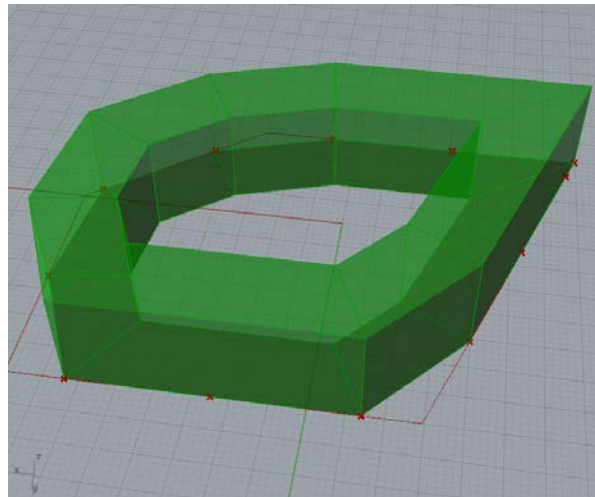


Figure 69 : Exemple de forme urbaine produite

La Figure 69 est un exemple de script Grasshopper de génération d'un îlot à partir de la donnée de son emprise, ainsi qu'un certain nombre de paramètres élémentaires (largeur, hauteur, profondeur des bâtiments), permettant de produire sa géométrie tridimensionnelle illustrée par la figure XX.

4.9.3. Conclusion

Etant données la variété et les particularités des formes urbaines qui seront utilisées, la génération des formes urbaines sera spécifique pour chaque archétype afin de pouvoir contrôler au mieux la cohérence (morphologique, fonctionnelle) et la représentativité du modèle produit à partir des paramètres (ou indicateurs) urbains. En effet l'approche générative ne permet pas en elle-même d'assurer le respect des contraintes géométriques et topologies (interpénétrations, repliements, non-respect des valeurs des indicateurs résultants ayant des corrélations trop fortes).

De même, dans notre contexte d'énergétique urbaine, un certain nombre d'attributs et de métadonnées devront être associés au moment de la génération de la forme urbaine pour pouvoir être par la suite intégrés et pris en compte par l'outil d'évaluation énergétique au travers des fichiers de simulation.

Dans cette phase d'optimisation, l'effet de la végétation ne sera pas modélisé, pour des raisons de complexité géométrique et de temps de calcul prohibitifs. Mais pour chacun des trois quartiers, nous retiendrons 4 à 5 archétypes optimum sur lesquels nous y modéliseront l'effet de la végétation.

5. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La première année du projet avait été une année de découverte entre membres de l'équipe, où nous avons appris à nous connaître et à développer une culture commune entre nos différentes sensibilités. Nous y avons principalement travaillé sur trois tâches concomitantes : la définition des archétypes sur l'aire urbaine de Toulouse, la définition et l'imbrication des échelles spatiales, et la mise au point d'un outil d'évaluation énergétique multi-échelle. Ces tâches ont bien sûr été complétées ou achevées lors de la seconde année, correspondant à ce rapport. Nous avons de plus initié cette année les tâches liées aux analyses de sensibilité et à l'optimisation énergétique des archétypes. Mais la plus-value de cette seconde année, réside davantage dans notre travail commun sur l'intégration dans les pratiques architecturales et urbaines au travers des ateliers participatifs. Cette année a aussi été le temps de la consolidation entre nos origines thématiques diverses, consolidation qui se manifeste dans ce second rapport, par des liens affinés entre les différentes tâches. On commence à voir l'édifice final, derrière les briques élémentaires que nous avons construites ensemble.

Dans notre étude, nous avons répondu à quatre des six objectifs proposés initialement à savoir :

- a) Identifier et caractériser des archétypes de quartiers représentatifs de la ville européenne traditionnelle (Voir rapport 1).
- b) Etablir le bilan énergétique de ces archétypes urbains. Nous avons évalué trois réponses principales : les besoins de chauffage, les besoins de refroidissement, et la quantité d'énergie solaire incidente sur les différentes surfaces des bâtiments (l'irradiation solaire) (Voir Chapitre 4.3).
- c) Evaluer l'impact relatif de leurs attributs typo-morphologiques dans les réponses énergétiques (Voir Chapitres 4.6 et 4.8)
- d) Générer des archétypes énergétiques urbains « optimaux » (Voir Chapitre 4.5).

Nous avons adjoint un nouvel objectif à notre projet ainsi que les tâches associées : la co-construction *acteurs-chercheurs* de variantes urbaines optimales par le biais d'ateliers participatifs. Nous avons souhaité travailler davantage nos propositions dans un processus ouvert d'intégration aux pratiques de projet et d'appropriation par les professionnels. Plutôt que de présenter nos propositions d'archétypes optimisés à un panel de professionnels en fin de projet pour un retour critique, nous avons en effet pris le parti d'intégrer au processus de recherche lors de cette seconde année, une réflexion commune chercheurs – acteurs sur l'évolutivité des archétypes urbains : ouvrir, focaliser et limiter le champ des possibles au filtre croisé des modèles et de praticiens. Les trois phases de cette tâche sont les suivantes : deux ateliers successifs de co-construction chercheurs- acteurs, baptisés atelier participatif de « production de projets urbains » (Voir Chapitre 4.4), qui a eu lieu en Novembre 2016, et atelier participatif d'« évaluation

et de production de projets urbains » (Voir Chapitre 4.7), qui a eu lieu en Mars 2017, et qui seront suivis par une présentation de la restitution des deux ateliers à un public élargi, prévue en Février 2018.

L'acculturation commune à un sujet nouveau pour tous les participants aux ateliers, la complémentarité des profils professionnels représentés et l'exercice progressif qui leur a été proposé (atelier 1, modélisation des projets, puis atelier 2, avant nouvelles modélisations des projets : « *on a donc des résultats tangibles sur les projets urbains proposés* ») apparaissent comme des facteurs très favorisant dans l'ambition à donner aux projets urbains et dans leur réelle co-construction. Cette approche a permis de croiser directement des approches « top-down » issues des approches théoriques de la Recherche, avec des approches « bottom-up » issues des propositions émanant des ateliers participatifs. Ce temps et cette démarche d'appropriation semblent opportuns à retenir dans une phase ultérieure de déploiement méthodologique.

Pour ce faire nous avons dû préparer une analyse énergétique de trois archétypes urbains représentatifs, présentée dans la partie 4.3, comme préalable à l'atelier 1. L'équipe de recherche a ensuite développé une modélisation énergétique des archétypes modifiés à l'atelier 1 (Partie 4.5), ainsi qu'une analyse de sensibilité de la performance énergétique d'un quartier générique à différents indicateurs typo-morpho-énergétiques (Partie 4.6) comme préalable à l'Atelier 2. Un travail important de cadrage et de concertation a été effectué entre les membres de l'équipe. Pour l'illustrer nous avons joint à ce rapport les comptes rendus des différentes réunions de travail du groupe lors de cette seconde année (voir Annexe 6 en Partie 9.6.).

Nous allons maintenant finaliser, lors de la dernière année du projet Multiplicités, les tâches suivantes :

- a) Mettre en œuvre une analyse multicritères de scénarios énergétiques, en générant des archétypes urbains « optimaux », vis-à-vis du potentiel solaire des formes urbaines et de la réduction des besoins énergétiques des bâtiments, définis à partir de tissus urbains de référence et des contraintes et opportunités issues des ateliers (tâche initiée en Chapitre 4.9).
- b) Développer une base de données et de connaissances sur les variantes « optimales » pour permettre de communiquer aux aménageurs urbains et aux architectes.

Parallèlement nous allons préparer, un certain nombre d'articles supplémentaires, à la fois articles scientifiques et articles de vulgarisation, pour valoriser les avancées de ce travail (voir Chapitre 6).

6. COMMUNICATIONS

Semaine de la Recherche, Approche multiscalaire et multidisciplinaire du lien ville et énergie, ENSA Toulouse, 21-26 Mars 2016.

Séminaire ADEME, Projet Multiplicités, Parcours Urbanisme Durable : modélisation et évaluation environnementales et sonores, La Recherche au service de la transition énergétique, Cité Universitaire, Paris, 17-18 Mai 2016.

« MultipliCities : multi-scale energy modelling of urban archetype buildings, case-study in Toulouse », Tathiane A.L. Martins, Serge Faraut, Luc Adolphe, Nathalie Tornay, Marion Bonhomme, Genevieve Bretagne, Patrice Contart and Geraldine Casaux-Ginestet, International Conference PLEA 2017, Design to Thrive, ISBN 978-0-9928957-5-4, 3-5 Juillet 2017 (reproduit en Annexe 5 en 9.5.).

« Zoom du mois : Projet urbain et performance énergétique », la lettre d'actualités de l'aua/T, novembre 2016, <http://www.aula-toulouse.org/spip.php?article1586>.

« Zoom du mois : Projet urbain et optimisation de l'énergie solaire », la lettre d'actualités de l'aua/T, mai 2017, : <http://www.aula-toulouse.org/spip.php?article1725>.

Projets d'articles en cours de préparation pour des revues internationales :

1. « Towards a participative construction of energy concerned urban renewal projects », Journal Sustainable Cities and Societies.
2. « Multi-Scale Approach for Energetic Urban Form Optimization », Journal Environment and Planning B.
3. « Sensitivity analysis of multiscale urban design factors on building energy demand », Journal Energy and Buildings.
4. « Modelling urban renewal energy strategies based on a participative approach », Journal Sustainable Cities and Society.

7. PILOTAGE DU PROJET / PLANNING

	Mois												
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-36	
Tâche 1 : Etat de l'art et Identification et caractérisation des archétypes urbains													
1.1. Etat de l'art													LRA- EEAM
1.2 Archétypes													LRA- EEAM
Tâche 2 : Modélisation énergétique des archétypes urbains existants													
Modélisation													LRA
Tâche 3 : Modélisation prospective de variantes aux archétypes urbains													
3.1. Analyse paramétrique													LRA
3.2 Optimisation													LRA
Tâche 4 : Analyse multicritère de scénarios énergétiques sur les variantes »													
Analyse multicritères													LRA
Tâche 5 : Définition d'un prototype d'outil d'aide à la décision urbaine													
Prototypage													LRA- EEAM
Tâche 6 : Application à des études de cas													
Etude de cas													AUAT
Tâche 7 : Ateliers participatifs													
Ateliers participatifs													AUAT
Pilotage et coordination													
Coordination													LRA-AUAT

Figure 70 Calendrier prévisionnel et responsabilités des tâches

La Figure 70 reprend le calendrier prévisionnel proposé à l'ADEME lors de la soumission de notre projet. Les tâches (ou parties de tâches) présentées en vert sont achevées à ce jour ; celles en orange clair sont partiellement achevées ; celles en orange foncé sont à venir.

Des modifications structurelles importantes ont été apportées au projet notamment dans la tâche 6 transversale « Application à des études de cas », et surtout par l'ouverture d'une nouvelle tâche 7 dans notre projet, dédiée à l'organisation d'ateliers participatifs avec des décideurs urbains. Cette nouvelle tâche vise à donner un rôle bien

plus important aux professionnels qu'ils soient engagés dans notre projet ou qu'ils soient sollicités pour accompagner le projet.

Dans le projet initial, nous souhaitions en effet présenter, lors de la dernière année du projet, notre étude d'optimisation à un panel de professionnels pour information et intégration de leurs points de vue après coup. Or après discussions entre les membres de l'équipe de projet et avec des professionnels partenaires, cette approche nous a paru limitante, notamment quant au champ des modifications possibles à partir des archétypes existants.

Nous avons donc décidé de co-bâtir avec un panel large de professionnels, les stratégies d'optimisation de ces archétypes, dès cette seconde année du projet. Ceci permet de croiser directement des approches « top-down » issues de notre approche théorique, avec des approches « bottom-up » issues des propositions émanant des ateliers participatifs. Ceci améliore la pertinence du champ d'exploration des variantes urbaines. Ceci facilitera aussi grandement la production de la maquette finale et sa contextualisation.

Cette septième tâche du projet Multiplicités est basée sur une stratégie à triple détente, sous la forme de deux ateliers successifs de co-construction chercheurs- acteurs et d'une présentation de la restitution des deux ateliers.

Un premier atelier, ouvert à des chercheurs et des praticiens, a permis d'aboutir à la co-construction d'une évolutivité possible et consensuelle des archétypes urbain par groupe (3 groupes pour 3 archétypes retenus).

Un second atelier a permis de poursuivre la réflexion collective chercheurs – acteurs, à partir de la présentation de l'analyse des résultats de modélisation énergétique obtenus à l'issue du premier atelier, ainsi qu'une analyse de sensibilité réalisée sur différents indicateurs urbains. Lors de ce second atelier, nous avons demandé aux groupes d'aller plus loin dans leurs propositions en travaillant, sur deux variantes d'optimisation énergétique à choisir parmi économe, fraîche ou productive.

Ces deux ateliers seront suivis, lors de la dernière année du projet, par une restitution sous la forme de débat ouvert à un public élargi intégrant l'ensemble des participants aux deux ateliers

Malgré ces transformations structurelles importantes et chronophages, le planning initial annoncé a été tenu à ce jour, sauf pour la tâche 3.2 « Optimisation » non totalement achevée.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME. (2011). "Agence de l'Environnement et de La Maîtrise de l'Énergie, Bâtiment. Énergie - Environnement. Coll. Les Chifres Clés 2010/Le Bâtiment." ADEME.
- Adolphe, L. (2001). *A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities*. Environment and Planning B, 28(2), 183–200. doi:10.1068/b2631
- Adolphe, L. (2002), Alain Chatelet, A. Boussooualim, C. Barlet, and E. Deboulbé. 2002. *SAGACités Vers Un Système d'Aide À La Gestion Des Ambiances Urbaines*. Toulouse: MENRT.
- Alexander, P. (2012) *Empirical and modelled relationships between urban classification and urban climate*, In International Conference on Urban Climate n°8 in Dublin, 2012.
- Arantes, L. (2013). "L'intégration Des Données Énergétiques Dans La Conception Architecturale Située." <http://www.theses.fr/2013GRENI045/document>.
- Arantes, L., Bucchianeri, X., Quenard, D., & Baverel, O. (2014). Étude énergétique d'une conception rationalisée de la façade : le concept Core-Skin-Shell. IBPSA. Arras-FR: Université d'Artois.
- Atelier Parisien d'URbanisme. (2007). *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes* (Energy consumption and greenhouse gas emissions related to heating of Parisian housing). APUR. Consulté à l'adresse <http://www.apur.org/sites/default/files/documents/246.pdf>
- Batty, Michael. 2008. "The Size, Scale, and Shape of Cities." Science 319 (5864): 769–71.
- Bechtel, B. (2012) *Classification of local climate zone from multitemporal remote sensing data*. In International Conference on Urban Climate n°8 in Dublin, 2012.
- Biljecki, Filip (2016), Hugo Ledoux, and Jantien Stoter – « An improved LOD specification for 3D building models », Computers, Environment and Urban Systems, vol. 59: 25-37, 2016.
- Bonhomme, M. (2013). "Contribution À La Génération de Bases de Données Multi-Scalaire et Évolutives Pour Une Approche Pluridisciplinaire de L'énergie Urbaine." PhD, Toulouse: Université de Toulouse. Décembre 2013.
- Bouyer, J. (2011), Christian Inard, and Marjorie Musy. 2011. "Microclimatic Coupling as a Solution to Improve Building Energy Simulation in an Urban Context." Energy and Buildings 43 (7): 1549–59. doi:10.1016/j.enbuild.2011.02.010.
- Canan, A. (2011). *Performative architecture as a guideline for transformation of the defence line of Amsterdam*, . Graduate school of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. Delft: These de doctorat.
- Chen H., et al. (2008) *Sustainable urban form for Chinese compact cities* : Challenges of a rapid urbanized economy. In Habitat International n°32, pp28–40, 2008.
- Cheng, V. (2006) et Al. *Urban form, density and solar potential*. Passive Low Energy Architecture conférence, Geneva, Switzerland, 2006.
- Christen, A. (2012) et Al. *Context sensitive scaling of energy use simulations*. In International Conference on Urban Climate n°8 in Dublin, 2012.
- Compagnon, R. (2004). "Solar and Daylight Availability in the Urban Fabric." Proceedings of the International Conference on Solar Energy in Buildings CISBAT 2001 36 (4): 321–28. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.009.

- Compagnon, R. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, v. 36, n. 4, p. 321-328, 2004.
- Compagnon, R.; Raydan, D. Irradiance and illuminance distributions in urban areas. PLEA - 17th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. [S.l.]: [s.n.]. 2000.
- Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., & Griffith, B. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43 (4), 661-673.
- Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., Buhl, W., Huang, Y. J., Pederse, C., et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319-331.
- Daren, T. (2014), Clayton Miller, Jérôme Kaempf, and Arno Schlueter. "Multiscale Co-Simulation of Energyplus and Citysim Models derived from a Building Information Model." Paper presented at the International Building Performance Simulation Association German Speaking Chapter Human-centred building(s) 5th German-Austrian Conference of the International Building Performance Simulation Association (BauSIM 2014), Aachen, Germany, September 22-24, 2014
- Droege, P. (2007). *The Renewable City : A Comprehensive Guide to an Urban Revolution*. Chichester: Wiley.
- Dubois, C. (2014), Geneviève Cloutier, André Potvin, Luc Adolphe, and Florent Joerin. n.d. "Design Support Tools to Sustain Climate Change Adaptation at the Local Level: A Review and Reflection on Their Suitability." *Frontiers of Architectural Research*, no. 0. doi:10.1016/j.foar.2014.12.002.
- Eastman, C. (2015), Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston, « *BIM Handbook : A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* », 2nd Edition ; ISBN 978-0-470-54137-1, 648 pages, juillet 2011.
- ESTECO. (2013). "modeFRONTIER - the Multi-Objective Optimization and Design Environment. Version 4.4.1."
- Faraut, S. (2016), Bonhomme Marion, Tornay Nathalie, Amossé Alexandre, Masson Valéry, Erwan Bocher, Gwendall Petit, Christine Plumejeaud, Nathalie Long, Geneviève Bretagne, Robert Schoetter, « *Des bases de données urbaines aux simulations énergétiques – Le projet MAPUCE* », SCAN'16 - Séminaire de conception architecturale numérique, Sep 2016, Toulouse, France. PUN - Presses Universitaires de Nancy, Editions Universitaires de Lorraine, SCAN'16 Toulouse - Séminaire de conception architecturale numérique : Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet, 2016, SCAN'16 Toulouse, <http://scan16.toulouse.archi.fr/scan16/>
- Faraut, S. (2016), Bonhomme Marion, Tornay Nathalie, Amossé Alexandre, Masson Valéry, Erwan Bocher, Gwendall Petit, Christine Plumejeaud, Nathalie Long, Geneviève Bretagne, Robert Schoetter, « *Des bases de données urbaines aux simulations énergétiques – Le projet MAPUCE* », SCAN'16 - Séminaire de conception architecturale numérique, Sep 2016, Toulouse, France. PUN - Presses Universitaires de Nancy, Editions Universitaires de Lorraine, SCAN'16 Toulouse - Séminaire de conception architecturale numérique : Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet, 2016, SCAN'16 Toulouse, <http://scan16.toulouse.archi.fr/scan16/>
- Ferries, B. (2013). "BIM et Nouvelles Pratiques de Collaboration. Le BIM : Un Outil Logiciel ? Plutôt Une Autre Façon de Travailler." Atelier Cinov Midi-Pyrénées.
- Fouad, A. O. (2007). *Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec* (Urban morphology and thermal comfort in public spaces: a comparative study of three urban fabric of the city of Quebec). Université Laval.
- Griego, D., Krarti, M., and Hernandez -Guerrero, A. Optimization of energy efficiency and thermal comfort for residential buildings in Salamanca, Mexico. *Energy and Buildings*. 54. (2012). 540–549.

- Hills, P. (1994). *"Sustainable Development and Urban Form"*. M.J. Breheny, (Ed.) (1992) 292pp. London, Pion Limited (European Research in Regional Science, No.2) ISBN 085086 160 8 £28.00 Paperback." *Sustainable Development* 2 (1): 31–31. doi:10.1002/sd.3460020106.
- Hui, S. (2001) et Al. *Low energy building design in high density urban cities*. *Renewable Energy* n°24, 2001.
- INSEE. (2010). *"Tableaux de L'économie Française."* INSEE.
- Kämpf, Jérôme Henri, and Darren Robinson. 2007. *"A Simplified Thermal Model to Support Analysis of Urban Resource Flows."* *Energy and Buildings* 39 (4): 445–53. doi:10.1016/j.enbuild.2006.09.002.
- Kämpf, J. (2010) Henri, Marylène Montavon, Josep Bunyesc, Raffaele Bolliger, and Darren Robinson. 2010. *"Optimisation of Buildings' Solar Irradiation Availability."* *International Conference CISBAT 2007* 84 (4): 596–603. doi:10.1016/j.solener.2009.07.013.
- Khemlani, L. (2005). *"Hurricanes and Their Aftermath: How Can Technology Help?"* *AECbytes* 1.
- Kotharkar, R. (2012) *Urban climate fields classification for an Indian city: Nagpur, India*. In *International Conference on Urban Climate* n°8 in Dublin, 2012.
- Judkoff, R., & Neymark, J. (2013). *Model Validation and Testing*. *ASHRAE Handbook of Fundamentals* , 19, 19-29.
- Kleijnen, J. P. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. *European Journal of Operational Research*, 164(2), 2005. p. 287-300.
- Leenknecht, S. (2013) et Al., *Ecological Parameters Affecting the environmental performance of the city, AA Emergence Technologies and Design (EmTech)*, Architectural Association, London, 2013
- Long, N. (2005) & Kergomard, C. *Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques (Morphological classification of the urban fabric for climate applications)*. *Revue Internationale de Géomatique*, 15, 487-512.
- Maïzia, M. (2009) et Al. *Energy requirements of characteristic urban blocks, In CISBAT, Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale*, 2009.
- Maïzia, M. (2007). *"L'énergétique Urbaine et La Morphologie Des Villes. L'analyse Du Bâti Parisien."* *Les Annales de La Recherche Urbaine*, no. 103: 79–85.
- Mardaljevic, J. a. (2003). *Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach*. *Energy and Buildings* , 35, 27-35.
- Martins, T. (2014). *"Des Contraintes Solaires À Des Opportunités de Projet Urbain : Optimisation de Typomorphologies Urbaines En Climat Tropical Au Brésil."* <http://www.theses.fr/2014ISAT0011/document>.
- Martins, T. (2014), Adolphe L., Bastos L., *From solar constraints to urban design opportunities : optimization of built form typologies in a Brazilian context*, *Energy and Buildings* 76 (2014)43-56, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.056>.
- Martins, T. (2013), Marion Bonhomme, and Luc Adolphe. 2013. *"Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL."* *Ambiente Construído* 13: 213–33.
- Masson, V. (2014), Julia Hidalgo, Alexandre Amossé, Fateh Belaid, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Alexis Bourgeois, G. Bretagne, S Caillerez, Erwan Cordeau, Coralie Demazeux, Serge Faraut, C. Gallato, Sinda Haoques-Jouve, Marie-Laure Lambert, Aude Lemonsu, Renaud Lestringant, Jean-Pierre Levy, Nathalie Long, C.X Lopez, Margot Pellegrino, Gwendall Petit, Cécilia Pignon-Mussaud, Christine Plumejeaud-Perreau, V. Ruff, Robert Schoetter, Nathalie Tornay, Didier Vye , « *Urban Climate, Human behavior & Energy consumption: from LCZ mapping to simulation and urban planning (the MapUCE project)* »

- Masson, V. (2015), Julia Hidalgo, Alexandre Amossé, Fateh Belaid, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Alexis Bourgeois, G. Bretagne, S Caillerez, Erwan Cordeau, Coralie Demazeux, Serge Faraut, C. Gallato, Sinda Haoues-Jouve, Marie-Laure Lambert, Aude Lemonsu, Renaud Lestringant, Jean-Pierre Levy, Nathalie Long, C.X Lopez, Margot Pellegrino, Gwendall Petit, Cécilia Pignon-mussaud, Christine Plumejeaud-Perreau, V. Ruff, Robert Schoetter, Nathalie Tornay, Didier Vye , « Urban Climate, Human behavior & Energy consumption: from LCZ mapping to simulation and urban planning (the MapUCE project) »
- MODEFRONTIER. (2013). The Multi-objective Optimization and Design Environment. Versão 4.4.1. ESSS / ESTECO.
- Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiment. 5. Ed. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001.
- Montgomery, D. C.; Runger, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4 Ed. ed. Rio de Janeiro,: LTC, 2009.
- Montavon, M. (2011). *“Optimization of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential.”* PhD, Lausanne: Ecole Polytechnique federale de Lausanne.
- Nouvel, R. (2015), Jean-Marie Bahu, « *Development of the CityGML ADE Energy* » - INSPIRE GWF 2015 - Lisbon 25.05.2015
- Owens, S.E. (1986). *Energy, Planning and Urban Form*. London: Pion.
- Perera, N. (2012) *Mapping « Local Climate Zones » and relative warming effects in Colombo, Sri Lanka*. In International Conference on Urban Climate n°8 in Dublin, 2012.
- Ratti, C.; Baker, N.; Steemers, K. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, v. 37, n. 7, p. 762-776, 2005.
- Robinson, D. (2011). *Computer Modelling for Sustainable Urban Design*. London: Earthscan.
- Rogers, R. (2000) *Des villes pour une petite planète*, Le Moniteur Editions, 2000.
- Salat, S. (2011). *Les villes et les formes: Sur l'urbanisme durable*. Hermann.
- Steemers, Koen. (2003). *“Energy and the City: Density, Buildings and Transport.”* Special Issue on Urban Research 35 (1): 3–14. doi:10.1016/S0378-7788(02)00075-0.
- Stewart, I. (2009) et Al. *Classifying Urban Climate Field Sites by « Local Climate Zones »*. International Association for Urban Climate, 2009
- Thomas, L. (1996) et al. *The compact city: A successful, desirable and achievable urban form? In The compact city: A sustainable urban form?* pp. 53–65, Routledge, 1996.
- Tornay, N. (2015), Marion Bonhomme, and Valéry Masson. 2015. *“GENIUS, a Methodology to Integer Building Scale Data into Urban Microclimate and Energy Consumption Modeling.”* In 12th Symposium on the Urban Environment. Toulouse.
- Tornay, N. (2011). *Vers Des Outils D’aide à La Conception Pour Intégrer Les Dimensions Techniques, Écologiques et Sensibles Des Matériaux de Construction*. <http://www.theses.fr/2011ISAT0003/document>.
- Williams, K. (2000), Elizabeth Burton, and Mike Jenks. 2000. *Sustainable Urban Form*. 389 vols. Routledge.

9. ANNEXES

9.1. Annexe 1 : Transcriptions des synthèses par les rapporteurs des deux ateliers

9.1.1. Atelier 1, quartier Belfort

On a essayé de rajouter des critères au fur et à mesure qu'on réfléchissait sur le quartier et après on a essayé de les illustrer. Je vais essayer de faire les choses de manière croisée pour voir ce qu'on ...Ce qui nous a apparu assez important, surtout en s'attaquant à un problème comme l'îlot de Belfort qui est très particulier parce que c'est quelque chose de déjà constitué. C'était d'ajouter quelques éléments fort de rubrique. Nous avons ajouté quelques rubriques.

La première rubrique qui nous a apparu importante d'ajouter, la question du sol, avec la question de la perméabilité, la question des plantations en sachant qu'il faut savoir distinguer les plantations basses des plantations hautes, la question de la texture du sous-sol, de leur rugosité, de leur clarté. Donc là très concrètement sur un îlot on a passé la rue Bayard en désactivé clair et en gros granulats. Et la rue Belfort en stabilisé renforcé. On a aussi rajouté pas mal d'arbres de hautes tiges si possible dans les cœurs d'îlots et sur l'espace public.

Après une autre rubrique qui nous a paru très importante qui est la question du contexte, cela veut dire que finalement il y a beaucoup de choses qui sont liées à ce qui va se passer autour de l'îlot et pas seulement dans les constructions et sur lesquelles en plus on peut influencer pour avoir un effet sans contre-effet. Si on arrive à ce que l'espace public soit plus tranquillisé, qu'il y ait moins de circulation automobile, qu'en plus les gens aient plus de plaisir à sortir dans la rue, globalement on va avoir des impacts immédiats et très forts sur le bilan énergétique du quartier. Eviter que les gens restent chez eux avec la clim' et aient plaisir de s'en aller juste dehors, pour aller prendre l'air. Aussi le fait de pouvoir partir et d'aller rejoindre les bords de la Garonne facilement... ou d'autres espaces publics extérieures et donc de ne pas avoir à partir là aussi obligatoirement prendre le billet d'avion pour aller à Prague ce qui plomberait le bilan énergétique de notre quartier.

Pareil dans toute la question du contexte, la question de l'éclairage public, la question de nuisances sonores, c'est plus facile d'ouvrir sa fenêtre quand il y a moins de bruits dans la rue.

Une troisième rubrique a été la question des usages, qui nous a apparu assez importante, avec une série de choses, le fait que par exemple que si on avait une mixité d'usages, qu'on arrivait à avoir du bureau ou des équipements à la fois dans l'îlot, on pouvait aussi avoir des impacts différenciés sur justement l'usage de la clim', les consommations d'énergie en fonction des heures de la journée. Le fait de pouvoir donner dans les cœurs d'îlot des balcons assez larges y compris pour les bureaux, pour permettre aux gens de sortir travailler sur un balcon au nord en plein été, cela évitera qu'ils utilisent la clim'. Aussi les usages, c'est travailler sur la rénovation urbaine pour éviter la vacance et pour que le bilan par habitant, sur lequel on a beaucoup insisté soit bon. En fait, dès qu'on réfléchit uniquement au logement, on pouvait finalement avoir un très bon pavillon très bien isolé mais avoir un impact sur le bilan énergétique à l'habitant très faible.

On a pas mal insisté aussi sur la question des ressentis qui sont plus difficiles à évaluer mais qui ont en même temps un impact important...sur la question des bâtiments, on a parlé de la typologie, du fait que les logements soient intelligents, traversants, qu'on puisse les aérer, qu'on puisse éventuellement trouver les chambres plutôt sur le cœur de l'îlot, et un peu plus à l'ombre et que les pièces de jour peut-être plus sur l'espace ouvert. Je crois que j'ai dit pas mal des choses de ce qu'on s'était raconté...

Et on s'est dit aussi que ce serait intéressant d'arriver à placer ces différents critères en fonction des différentes choses, d'une part, peut-être l'effet de levier sur lequel on peut agir plus ou moins et puis surtout d'arriver à classer ceux qui étaient clairement très positifs, ceux qu'étaient peut-être plus négatifs et ceux surtout qui avaient au milieu finalement des effets positifs souvent contrebalancés par des effets négatifs sur lesquels il était plus compliqué de se positionner ou parmi ceux qu'on a évoqué peut-être précédemment il y en avait qui était clairement très évidents à mettre en œuvre et qui politiquement avaient plus de chance d'être réalisé rapidement.

En synthèse de la synthèse, on a regroupé les indicateurs en rajoutant des éléments contextuels qu'on avait un peu oubliés : il est important de faire apparaître des indicateurs qui ne sont pas limités au territoire administratif de l'îlot. On a rajouté à l'autre bout du spectre des indicateurs liés à l'usage qui ont des impacts énergétiques énormes. Et dans le bâtiment on avait oublié des choses sur la typologie des logements, par exemple les logements traversant ou non qui ont des impacts sur le confort énergétique. On a beaucoup travaillé là-dessus. On a eu du mal à utiliser le tableau des indicateurs issu de l'analyse de sensibilité : on a travaillé autrement, on n'a réfléchi à d'autres indicateurs comme la participation à la création de filières économiques liées à la rénovation des bâtiments ou la gestion patrimoniale des biens communs. Nous sommes ici dans un territoire particulier. On n'a pas suivi systématiquement le cahier des charges initial, mais on arrive in fine à des variantes au territoire de Belfort très innovantes que nous allons pouvoir modéliser maintenant.

9.1.2. Atelier 1, quartier Castors

Il y avait des critères qui pouvaient carrément être opposés comme par exemple le fait d'utiliser la toiture comme capteur solaire qui pouvait libérer l'idée d'utiliser la toiture comme réservoir de pluie. Dans les critères manquants, on avait noté le vent, l'orientation par rapport au vent, pour pouvoir ventiler naturellement ou avoir des impacts négatifs du vent. Y-a-t-il un lien dans votre étude avec la prochaine réglementation thermique, qui va sacrement rebattre les cartes parce que chaque nouvelle construction devra être à énergie positive ?

La notion du confort ressenti par rapport au confort réel, est, c'est là aussi le lien avec votre étude l'exemple qu'on a évoqué puisqu'après on en parle, est ce que la très forte proportion de surface imperméabilisée avec du goudron est ressentie comme négative par les habitants ? Probablement que non car ils sont très vite chez eux. Mais est ce que l'étude peut montrer l'impact de cette zone imperméabilisée qui accumule énormément de chaleur dans la journée dans la réalité de ce qui se passe sur le site.

On a évoqué les modes constructifs en disant que c'était des constructions qui étaient relativement faciles à l'échelle de la parcelle dans [...] par l'isolation thermique par l'extérieur. Donc la grande échelle, c'était, pour revenir dessus, le fait qu'il y avait une surface imperméabilisée très importante et très accumulatrice de chaleur avec des dessertes, des largeurs très importantes par rapport au nombre d'habitant desservi qui était relativement forte. Donc déjà à cette échelle-là quelles sont les possibles ? On a évoqué dans ce dessin, on a discuté, sur le fait de réduire la surface de circulation pour pouvoir récupérer ces espaces, par exemple pour les jardins pour l'implantation des choses comme ça mais c'est aussi en lien avec la densification. Donc le contexte urbain, même si on se met hors contexte des vraies contraintes sur vol d'avion, il y a des notions de franges urbaines qui apparaissent, la faible perméabilité piétonne de ces quartiers.

L'impact des orientations des façades, on voit bien que dans ce type de quartier pavillonnaire l'orientation est directement lié au réseau routier [...] Ce sont essentiellement des maisons jumelées donc qui ont généralement 3 façades, c'est un moindre mal parce que [...] orientation convenable. Mais on voit bien que ce n'est pas un tissu qui a été décidé de manière [...]. Donc sur la notion d'acceptabilité sociale par rapport à l'idée de la densification, du fait d'avoir un impact à l'habitant qui soit moins fort, un élément important qui est ressorti est le fait de maintenir le découpage pittoresque qui existe aujourd'hui dans la rue : c'est à dire le fait qu'on a deux maisons un vide, deux maison un vide donc le fait qu'on arrive à maintenir pour les habitants cette notion d'échelle humaine et de ne pas avoir des barrettes qu'on peut imaginer si on se met à densifier sans tenir compte de ça. Et donc dans les propositions qui ont été perçues même si on n'est pas dans le projet, à vous de travailler après nous, l'idée qu'on pouvait dans les entre deux, puisque vous avez des maisons jumelées et des vides entre les maisons, de la densification qui ne soit pas forcément à la même hauteur justement pour maintenir une singularité et pas forcément les mêmes matériaux là aussi pour maintenir une singularité et qu'on continue à apercevoir le tissu d'origine pour les habitants. Avec l'idée aussi de compensation, c'est-à-dire que quand on vient densifier dans les zones qui

étaient vides, l'espace végétalisé perdu pourrait se retrouver justement dans le fait de refaire le gabarit des circulations actuelles et de retrouver du jardin, imaginer des incroyables comestibles fin ces idées que chacun peut faire carrément du jardin potager [...]. On est allé aussi jusqu'à l'idée de pouvoir créer des venelles et puis de récupérer des plus grandes surfaces entre deux quartiers mais d'un point de vue faisabilité réelle, ça pose beaucoup plus de question.

Est-ce que j'ai à peu près tout dit ?

Il y a une chose qui a été dite un peu [...] intéressant, c'est de dire à un moment donné si on veut faire un impact, pourquoi l'espace minéral est très fort sur ce genre de quartier là où la voirie est très présente qui dessert tous ces ilots-là si à un moment donné on veut compenser la densification qui pourrait y avoir et qui va surement prendre sur un ilot ouvert avec les jardins, à charge alors c'est un enjeu politique mais c'est aussi un enjeu énergétique, c'est de dire que si le cœur d'ilot prend plus dans la densité il faudra voir comment justement un espace public qui est là, lui, peut compenser avec un retraitement un recalibrage de l'espace public sur les continuité piétonne, sur la place de la voiture, sur le vert, sur la plantation qui pourrait lui compenser un petit peu ce qui se passe dans le cœur d'ilot qui eux serait peut-être pris par une forme de densité. [...]

Après dans la discussion c'est comment on se lâche sur l'évolution de ce type de secteur suivant son contexte. Là on a un contexte social qui est très fort peut-être sur d'autres contexte on est dans une densité identique on peut avoir des variabilités qui sont différentes selon les contextes.

9.1.3. Atelier 1, quartier Hers

Nous avons travaillé sur le quartier du château de l'Hers, à partir de la question de la forme du quartier, et à son impact comme réflexion de départ. Ne sachant pas trop comment envisager la suite.

En quelques mots, les enjeux énergétiques, dans ce cas là, doivent être précédés par des enjeux politiques et sociaux. Dans le sens, où avoir une démarche, je dirais, comment produire un maximum d'énergie dans ce quartier, où avoir une autre démarche qui dirait est-ce exclusivement ces habitants là, qui doivent avoir un logement en adéquation avec l'énergie, ou alors est-ce c'est ce quartier là qui doit accueillir demain deux fois plus d'habitants ? et donc comment transformer ce quartier ? toutes ces questions là doivent être précédées par les enjeux politiques et enjeux sociaux qui nous permettent d'avoir un programme avec *des enjeux énergétiques*.

Les indicateurs qui ont été mis en place pour ce quartier, à nos yeux, nous semblent assez complet, mis à part le fait qu'il n'y a pas d'indicateur concernant le sol. Concernant les espaces non-bâties dans leurs qualités, par exemple, l'albédo du sol n'apparaît pas, la superficie enherbée, plantée n'apparaît pas, c'est des indicateurs à notre avis très importants, pour pouvoir appréhender le rapport au changement climatique et voir même au confort d'été et éventuellement *au confort simplement...*

les 3 échelles dont on parlait au début (quartier – bâtiment – matériaux), sur ce quartier là, on est sans arrêt en train de passer d'une échelle à une autre, à savoir le quartier en lui-même, on a commencé par dire qu'il y a un indicateur sur la topographie qui n'existe pas, qui est très important par rapport à l'ensoleillement, et un indicateur sur le logement, en terme de ventilation, en sachant que les vents peuvent être analysés à l'échelle du quartier et à l'échelle de la parcelle, qui n'est pas clairement dans les indicateurs.

Autre élément qui nous a semblé très important c'est le rapport d'usage, à savoir, le rapport aux déplacements piétons, le rapport à la voiture, le rapport à la vue, tous ces éléments font que l'interactivité d'un quartier et le rapport énergétique doit être appréhendé avec cette notion de qualité d'usage.

Alors après il y a toute la réflexion sur l'enveloppe proprement dite, les matériaux, la date de construction du bâtiment est importante, contrairement aux autres quartier, la dimension historique est beaucoup plus *au centre*, l'implantation des bâtiments a fait fi de toute l'historicité qu'il y a autour, donc un rapport d'implantation mono-orienté, appartement avec une logique traversante, et donc ces questions là, en terme

d'appréhension des possibilité *d'extension urbaine* sont *prépondérantes*.

Autre élément, qui nous a semblé important, mais dans une étape, qui j'imagine future, qui permettent de faire de choix, c'est des indicateurs d'identification de propriétaire/locataire, le rapport, on ne le connaît pas, un indicateur qui est le turn-over dans chaque appartement, on ne le connaît pas et un indicateur qui est la vacance et la fragmentation du tissu, qui est un élément très important qui permet à un élu de prendre des décisions, sachant que si la volonté est garder tous ces logements là.

Le travail par rapport à notre question pourrait être de retrouver un maillage, structuré par rapport à une présence de l'eau, qu'on cherche et qu'on ne trouve pas, par rapport à ce qu'on appelle une trame verte qui est vraiment qui sont balbutiantes dans ce quartier là, dans un rapport politique à savoir doubler la population qui effectivement, est-ce que l'on va monter en hauteur, est-ce qu'on va prendre les quartiers autour ? L'autre hypothèse serait de raser une *partie*, et là *quid* des habitants.

9.1.4. Atelier 2, quartier Belfort

Cet atelier nous a permis d'aller plus loin que les analyses purement techniques ou réglementaires traditionnelles, en abordant la dimension urbaine, et sa composante morphologique.

En tant que bailleur social, aujourd'hui nous investissons beaucoup d'argent pour isoler nos bâtiments (80 millions d'euros sur 10 ans). Quand on voit que la compacité du bâtiment qu'on construit a beaucoup plus d'impact que ce sur quoi nous investissons, c'est un résultat extrêmement éclairant. La conception compte plus que le traitement du bâtiment, plus que les systèmes et les technologies qu'on vient plaquer dessus.

Nous avons choisi de travailler sur les deux thématiques du chauffage dont l'influence sur le bâtiment global est plus faible que la climatisation, et sur la production d'énergie solaire, et sur quatre critères : la compacité qui a un effet très important, la profondeur des bâtiments, l'isolation et la verticalité.

Il est paradoxal de voir qu'il existe une mode aujourd'hui autour des bâtiments fins et les logements traversants. On voit bien les effets sur le confort et la ventilation, on oublie les effets sur la compacité.

Pour faire de la compacité, nous proposons donc d'abord aérer, en creusant des ruelles traversant les ilots, et en détruisant quelques bâtiments.

Travailler sur la compacité laisse peu de marges dans un ilot de centre historique, mais une densité moindre liée à une ouverture du cœur d'ilot peut être compensé par la construction de bâtiments plus élevés aux coins de l'ilot. Nous proposons donc de supprimer un bâtiment pour créer une ruelle traversant l'ilot. Si on décide ainsi d'ouvrir l'ilot, il faut préserver la compacité, ce qui est une contrainte forte de cet archétype urbain. Pour ce faire nous proposons sur les angles des ilots de monter des bâtiments de grande hauteur. Ceci permettra parallèlement d'augmenter les possibilités de captation solaire et de réduire l'effet d'ombres portées sur les autres bâtiments.

Il faut partir d'une réflexion urbaine qu'on accompagne ensuite de mesures techniques et architecturales.

9.1.5. Atelier 2, quartier Castors

- **Scénario 1** : économe chauffage
- conservation du cœur de quartier
- création de porosité, hauteurs R+1, R+2 en conservant la typologie (?)

- **Scénario 2** : Frais

- végétalisation de tous les cœurs d'îlots + noues + réduction des voiries
- bâtiments traversants
- collectif traversant

Typologies :

- coursives + escalier
- plots + patios intérieurs

Expérimentation terre crue

Retranscription restitution

[1] Les Castors, *est un quartier composé de maisons individuelles*

Donc on a pris un premier scénario en partant sur le critère d'économie. Donc on veut optimiser ça.

[3]... chauffage...

Donc on a essayé pour atteindre cet objectif on a déjà essayé de travailler sur la compacité, en travaillant sur des îlots un peu plus urbains et une isolation sur les bâtiments, et en travaillant également sur les orientations. Donc on a défini un axe que l'on a relié au reste du tissu urbain. On a ciblé 3 îlots que l'on densifie un peu plus, mais bon on va monter un peu plus. On va monter ici à +2,

[2] ici aussi,

[1] et là ici aussi sur cette partie-là. Et sur les parties que l'on conservait on travaillait, euh..., donc ils sont à R+1, on rajoutait entre chaque maison des possibilités d'extension, de nouveaux logements intermédiaires qui viennent s'y accoler pour, euh..., voilà pour (autant) partir des critères que l'on a sur le tableau en considérant que la compacité allait nous permettre d'optimiser un peu plus la consommation pour le chauffage de cette opération.

[2] On a orienté aussi..., euh, on a gardé ce qui était orienté..., Sud et puis ceux-là on les a orientés également Nord-Sud pour optimiser les apports solaires.

On a conservé en fait existant cette partie-là qu'on trouvait plutôt... agréable, qu'on n'avait pas trop envie de toucher du point de vue de la forme, tout en créant quand même un peu plus... d'espaces verts, comme ça qui jouaient pas mais qui jouent pour l'usage dans le quartier.

Et on a aussi essayé d'ouvrir le quartier parce qu'on l'a trouvé quand même très, très fermé, très...euh... Donc on a ouvert vers les commerces et on a essayé de créer un peu plus de porosité puisque on trouvait que c'est de la petite maison individuelle sans lien. Je crois que c'est tout. Et après du point de vue des hauteurs, on a quand même un peu travaillé sur les R+1, R2, R+3, donc on reste quand même vraiment dans la typologie du

quartier, en montant un petit peu, mais en définitif très peu. ça c'était le scénario chauffage.

Le deuxième scénario, alors..., voilà. Parce que là on ne l'a pas fait tout le quartier sur celui-là.

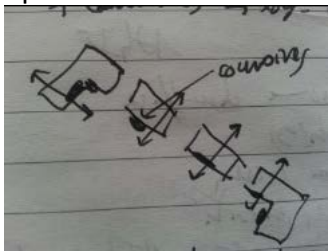
Donc le Nord est là...

Donc on a choisi le deuxième scénario « Le frais ».

Donc là ben on a végétalisé déjà, au maximum tous les cœurs d'îlot.

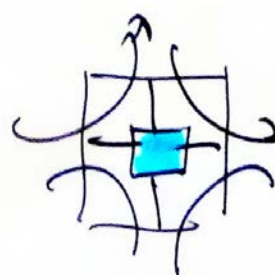
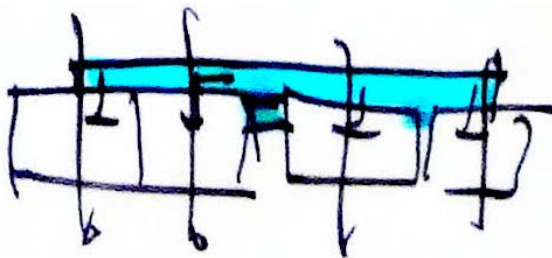
On a ajouté de l'eau, si possible. On a ajouté des noues. On a végétalisé, rétréci, euh..., pas mal les voiries qui étaient très larges. On les a, euh... On a mis un revêtement plutôt clair. On a végétalisé tous les bords de route. On a mis des noues. Et on a gardé une peu la typologie. Enfin on a travaillé sur certain (? 4:10) en essayant d'avoir au maximum des bâtiments traversants et en montant un petit peu mais dans un travail assez fin de compacité, un petit peu mais pas trop. Parce qu'on a bien...

[1] Là c'est un peu pareil, c'est-à-dire que là on restait sur l'existant avec la possibilité des les raccorder. Ici on faisait des logements collectifs avec..., euh, mais qui étaient traversants, (et) desservis par des coursives avec l'orientation Nord-Sud..., euh, optimisée.



[2] Et on a fait des typologies de logements traversants

On a réfléchi à comment est-ce qu'on pouvait faire du logement traversant de différentes manières avec des principes de coursives, avec principe de plusieurs escaliers et y compris avec des principes de plots avec un patio intérieur.



[1] Et puis les matériaux...

[2] Ah oui, on s'est dit que l'on pouvait faire quelques expérimentations de terre crue... pour le confort d'été.

Voilà, je crois que c'est tout.

On a oublié des choses, non ? C'est déjà pas mal !

[3] L'isolation...

[2] Isolation, oui !

Notes :

[1] Présentateur n°1

[2] Présentateur n°2

[3] Intervention non identifiée

9.1.6. Atelier 2, quartier Hers

Nous avons défini en fait, pour le château de l'Hers, 2 scénarios.

Pour le scénario 1, par rapport au contexte qui nous était donné, nous avons travaillé à partir de l'archétype « à damier » transmis, en développant l'idée de faire évoluer les hauteurs pour ménager des expositions intéressantes en fonction des bâtiments.

En repositionnant le Nord, nous avons identifié quelles étaient les expositions favorables des bâtiments ; cette lecture nous a permis de mieux comprendre la structure urbaine en place et de cerner quel archétype de bâtiment nous pouvions définir et retenir.

On avait un élément qui était structurant ici par rapport à cette voie ❶, un élément également qui était structurant par rapport ici aux franges ❷ et des éléments qui pouvaient aussi se regrouper sur des ensembles comme ceux-ci ❸.

A partir de l'analyse des bâtiments et des relations entre bâtiments, on a essayé de retrouver une structure à l'échelle de l'îlot et de retrouver un damier tout en l'organisant et en jouant sur des hauteurs différentes.

A partir d'un seul modèle, un seul type, on a pu arriver à un certain nombre de combinaisons, notamment en termes de hauteur, et les étudier tant par rapport au bâtiment lui-même en tant qu'élément singulier, mais aussi par rapport à l'organisation de ces bâtiments entre eux (par exemple, l'espacement entre eux) et avec leur environnement.

On est donc ici plutôt sur des hauteurs que l'on peut qualifier de « hauteur plus » ici dans l'angle Nord ❹, permettant de dégager des « hauteurs moins » et des « hauteurs intermédiaires », les « hauteurs moins » étant celles qui sont plutôt au Sud pour laisser justement passer la lumière ❺.

Le scénario 1 distingue donc l'habitat maintenu existant où on joue sur la protection solaire / l'isolation / le ratio d'ouverture et la partie où l'organisation nouvelle où on joue sur la compacité / la verticalité.

Sur le scénario 1, on était parti de l'intérieur de la structure même, des bâtis, pour définir et revenir sur l'archétype.

Pour le scénario 2, on s'est plutôt appuyé sur le maillage viaire environnant, en identifiant les continuités, et définir un nouvel archétype.

A partir de cette voie structurante (en fait un boulevard) ❻, on est parti de l'identification des petits îlots pour définir des macros lots et repenser l'organisation des bâtiments en « peigne ». Comme on peut le voir ici, on a une façade qui est plutôt bien exposée au Sud avec des bâtiments qui viennent s'étendre sur les cœurs d'îlots. Ce système est réversible,

c'est-à-dire qu'on peut aussi bien avoir « le peigne » avec sa façade principale là et des bâtiments qui viennent ici pour toujours ménager le maximum de façades bien orientées. Dans ce scénario 2, on a fait fi de toute compacité, pour toujours nous intéresser sur les combinaisons que nous pourrions avoir en termes de hauteurs, à partir de ce système en peigne : comment aller de hauteur on va dire basse à du bâti qui peut être plus haut, tout en passant par des intermédiaires ici. Dans ce scénario 2, on rase tout.

L'objectif de ces deux scénarios, le 1^{er} un peu plus compact et le 2nd beaucoup plus ouvert, est d'apprécier comment la compacité et les prospects peuvent jouer positivement ou négativement dans la performance.

Cette démarche nous a mis beaucoup plus en posture d'accompagnement pour proposer un certain nombre de scénarios à modéliser et disposer de résultats.

Réactions des autres groupes :

On arrive à une structure d'îlots assez compacte (dans le scénario 2), même si vous estimez qu'elle n'est pas compacte.

→ il est vrai que l'échelle est grande et ne rend pas bien compte du dimensionnement des cœurs d'îlots. Nous avons là 200 mètres sur à peu près 150 mètres, ce qui est assez important mais peu dense malgré tout.

Merci. Y a plus qu'à.

Vous n'aviez pas voulu lâcher, mais c'est lâché de partout là.

9.2. Annexe 2 : Fiches de restitution des trois groupes de l'atelier 2

9.2.1. Quartier Belfort

Présentation du groupe de travail

Nom de la zone : Belfort

Nom des modérateurs : Luc Adolphe, Marion Bonhomme, Léa Gilbert

Nombre de participants : 5 au départ, fin de séance à 3.

Nom des participants et fonction :

Nombre de participants ayant été présents au premier atelier Multiplicités : 1 sur toute la séance 1, 1 sur la moitié de la séance 1.

L'organisation au sein du groupe

Nom du/des rapporteurs :

Comment le rapporteur a-t-il été désigné ? Quand l'a-t-il été ?

Nom du dessinateur ?

Comment le dessinateur a-t-il été désigné ? Quand l'a-t-il été ?

Le dessinateur s'est dévoué après de longues minutes d'attente. Personne ne s'est porté vraiment volontaire pour ce rôle. Il a pris le crayon après que plusieurs idées de modification ont été mentionnées et que Luc Adolphe a suggéré qu'elles soient couchées sur le papier.

Comment s'est articulée la discussion au sein du groupe ?

Pour qu'une décision soit prise, chacun devait donner son assentiment. Quelqu'un lançait une idée. Cette idée était ensuite discutée avec l'ensemble du groupe, jusqu'à adoption ou rejet.

Les modérateurs ont-ils dû « recadrer » ou « pousser » à l'optimisation ?

Il n'y a pas eu besoin de recadrage sauf à un moment où le groupe voulait changer le quartier d'à côté.

Numéroter dans l'ordre de l'approche :

- Compréhension des documents mis à disposition : 1
- Choix des scénarios : 2
- Choix des critères : 3

Commentaires généraux sur l'ordre d'approche :

Après la présentation générale de l'atelier, un point sur les documents a été nécessaire. De cette manière, les participants ont pu les comprendre et se les approprier. Ensuite, le choix des scénarios a été fait sous impulsion du modérateur. Une fois cette étape passée, ils ont fait le choix des critères pour le scénario 1, l'ont traité. Pour finir, ils ont choisi les critères du scénario 2 et l'ont traité.

Comment l'apport de connaissances par les documents a-t-il été reçu ?

De prime abord, les documents étaient difficiles à comprendre selon eux. Une fois l'explication faite, ils se sont appropriés les documents en particulier l'analyse de sensibilité. C'est à partir de ce document que le choix des critères s'est fait. En revanche, la fiche sur les indicateurs a complètement été mise de côté.

Remplir le tableau suivant :

	Scénario 1	Scénario 2
Type de scénario	Chauffage	Captation solaire
Critères retenus	- Compacité - Epaisseur - Isolation - Verticalité - Albedo	- Albedo - Prospect - Albedo Sol - Rue N-S - Epaisseur

De manière générale, comment a évolué la séance ?

Plus la séance avançait, plus les participants se sont affranchis des contraintes et ont laissé libre cours à leur imagination.

De manière générale, comment s'est déroulée cette séance par rapport à la séance n°1 ?

Quels sont les retours des participants ?

Les participants ont été surpris de l'analyse de sensibilité. Ils pensaient que certains critères avaient plus d'importance que d'autres alors que ce n'est pas le cas dans la réalité. Ils vont essayer d'utiliser l'étude menée pour l'appliquer dans le domaine de travail.

Scénario 1

Nom du scénario : Economie de chauffage

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ?

Ce scénario a été choisi, car selon les participants ce scénario est le principal enjeu de nos jours.

Remplir le tableau suivant :

Critères	Pourquoi a-t-il été choisi ?	Comment a-t-il été utilisé ?
Compacité	Fort impact sur les économies de chauffage selon l'analyse de sensibilité par rapport à l'isolation	Ils ont d'abord aérer les espaces. Puis ils ont rendu compact l'ensemble. Le gros du travail s'est fait sur ce critère.
Epaisseur		Ce critère a été utilisé en même temps que la compacité.
Isolation	Rôle moindre que ce que l'on pourrait penser actuellement, toujours selon l'analyse de sensibilité	Une fois les modifications morphologiques faites, le principe d'isolation a été évoqué.

Verticalité		Après avoir joué sur la compacité, les participants ont ajouté des étages aux bâtiments qui donnaient sur des espaces vides (angles, voisinage...)
Albédo		Une fois les modifications morphologiques terminées, ils ont été quelques principes pour réduire l'albédo.

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ?

La réflexion s'est faite autour d'un critère : la compacité. Une fois que ce critère a été optimisé dans le respect du quartier de Belfort, les participants ont joué avec la verticalité puis les autres critères restants.

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ?

Le dessin est le résultat de la réflexion. Il s'est fait après que chaque décision se soit prise.

Remplir le tableau suivant :

Nature de la modification	Localisation	Justification de la modification	Selon quel critère (dans quel but)
Création d'un axe routier	Zone Ouest de Belfort	Créer de l'espace pour ensuite densifier	Compacité
Destruction de bâtiments	Ilôt centrale dans le bloc Nord de Belfort		
	Avancées de bâtiments dans le bloc Sud de Belfort		
Création de passage	3 bâtiments en moins dans le bloc Sud de Belfort		
Création de bâtiments	Jointure dans la partie Sud du bloc Nord de Belfort	Pas de perte d'espace	
	Jointures à l'Est du bloc Sud		
Agrandissement de bâtiments	Bâtiments agrandi en centre d'ilot		Epaisseur
Augmentation de la taille des bâtiments R+6	Angle Est du bloc Sud et angle Est du bloc Nord	Ces bâtiments donnent sur une place et s'inscrivent « bien » dans leur espace urbain avec R+6	Verticalité

Augmentation de la taille des bâtiments R+8	Bordure Ouest de la zone	De l'autre côté de la rue les bâtiments sont hauts. D'où l'augmentation en R+8	
Création de patios/Verrière	Dans les bâtiments de haute taille	Puits de lumière	
Isolation par l'extérieur	A l'intérieur des cours	Meilleure isolation et pas de problème de conservation de façade	Isolation
Isolation par l'intérieur	Sur les façades donnant sur rues	Pour conserver les façades extérieures	
Matériaux sombres sur les murs	Façades des bâtiments	Absorption des UVs	Albédo
Matériaux clairs au sol	Sol	Réflexivité des rayons	
Végétation type bouleau blanc et platane taillé	Dans les espaces de vides	Apport de verdure et réflexivité	

Des critères ont-ils été mentionnés alors qu'ils n'étaient pas dans la documentation ?

Si oui, pourquoi ?

La végétation est un élément qui a été pris en compte car c'est pour améliorer le cadre de vie quartier. Mais il a été adapté aux enjeux de la zone en considérant l'albédo par exemple.

Des modifications ont-elles été mentionnées sans être réalisées ? Si oui, pourquoi ?

Des modifications ont-elles été réalisées de manière implicite ? Si oui, pourquoi ?

Comment a été accueilli le résultat final ? Par le groupe dans un premier temps puis par l'ensemble de l'assemblée lors de la restitution.

Scénario 2

Nom du scénario : Captation solaire

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ?

Remplir le tableau suivant :

Critères	Pourquoi a-t-il été choisi ?	Comment a-t-il été utilisé ?
Albédo	Critère le plus important dans l'analyse de sensibilité	
Prospect	Critère important dans l'analyse de sensibilité	
Albédo Sol	Critère important dans l'analyse de sensibilité	
Rue Axe N-S	Critère important dans l'analyse de sensibilité et	Premier critère sur lequel ils ont joué

	étonnement de l'importance de celui-ci	
Epaisseur		

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ?

Un schéma optimal a été appliqué sur toute la zone sans prendre en compte les bâtiments déjà existants. Le travail d'optimisation s'est fait de manière plutôt global sur tous les critères.

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ?

Le dessin a été un support.

Remplir le tableau suivant :

Nature de la modification	Localisation	Justification de la modification	Selon quel critère (dans quel but)
Création d'axe N-S	Centre de la zone	Pour obtenir l'effet positif de l'analyse de sensibilité et en prenant un peu en compte la morphologie de la zone	Rue Axe N-S
	Est de la zone		
	Ouest de la zone		
Création de bâtiments en escalier orientés vers le S	Bloc Sud	Bâtiments en escalier (R+2, R+4, R+6, R+8) pour qu'un maximum d'habitation puisse jouir de l'ensoleillement vers le S	Albédo
	Bloc N		
Augmentation de l'axe de la rue E-O	Centre de la zone	Pour que les bâtiments R+2 Nord puissent avoir du soleil malgré les R+8 du bloc en face de la rue	
Toits terrasses	Façade S des bâtiments		
Capteur Solaire	Reste des bâtiments	Production d'énergie	
Verrières amovibles avec capteurs	Dans les batiments R+6, R+8	Puits de lumière mais aussi captation solaire	
Végétation	Façade Nord des blocs	Pour la qualité de vie (brise-vue)	Albédo Sol

Présentation du groupe de travail

Nom de la zone : Castors

Nom des modérateurs :

- Serge Faraut / LRA
- Geraldine Casaux-Ginestet / INSA
- Patrice Contart / aua/T

Nombre de participants : 4

Nom des participants et fonction :

- Sophie Le Breton / Ecologie urbaine
- Florence Garos / aua/T
- Collaborateur P. Marchal /Les Chalets
- Enedis ?

Nombre de participants ayant été présents au premier atelier Multiplicités : 0

L'organisation au sein du groupe

Nom du/des rapporteurs :

- Sophie Le Breton / Ecologie urbaine
- Collaborateur P. Marchal /Les Chalets

Comment le rapporteur a-t-il été désigné ? Quand l'a-t-il été ?

Après discussion entre les participants

Au début de la séance de travail après présentation de la thématique et des objectifs de travail

Nom du dessinateur ?

- Florence Garos / aua/T

Comment le dessinateur a-t-il été désigné ? Quand l'a-t-il été ?

Au début de la séance de travail après présentation de la thématique et des objectifs de travail

Florence Garros s'est proposé

Comment s'est articulée la discussion au sein du groupe ?

Bonne interaction au sein du groupe, pas de temps mort, complémentarité des interventions (archi / projets urbains / apports techniques/ Promoteurs), intervention des modérateurs en termes de relance de la dynamique de groupe

Temps de discussions sur les orientations

Solution modérée malgré la présence d'un promoteur (Patrice) (référence atelier 1)

Évocation des quartiers BIMBY

→ pas approprié à cette forme urbaine (Patrice)

→ parcelles trop petites

Logique de rénovation urbaine

Discussion sur les unités

Les modérateurs ont-ils dû « recadrer » ou « pousser » à l'optimisation ?

Quelques explications ou pointages spécifiques sur certains paramètres, œil sur la montre pour organiser le temps de travail autour de 2 scénarios

Discussions sur les lieux d'interventions urbaines

Numéroter dans l'ordre de l'approche :

- Compréhension des documents mis à disposition : 1
- Choix des scénarios : 3
- Choix des critères : 2

Commentaires généraux sur l'ordre d'approche :

Appropriation et compréhension nécessaires des critères, préalablement aux choix des paramètres en fonction des scénarios choisis

Comment l'apport de connaissances par les documents a-t-il été reçu ?

? L'ensemble des documents a été bien reçu et compris, l'analyse de sensibilité nécessitant néanmoins des clés complémentaires pour faciliter l'interprétation et la compréhension (*comment traduit-on l'effet positif ou négatif pour tel ou tel critères ?*
Indication plus précises des unités utilisées (si elles ont un sens) ?)

	Scénario 1	Scénario 2
Type de scénario	→ économe (en chauffage)	→ frais
Critères retenus	En jouant sur : → compacité → isolation - densification - rénovation des îlots existants (16h05) - aménagement de nouveaux îlots - redéfinition de l'îlot (16h10) → limites → ouverture vers les grands axes → nouvel îlot intégrant la « raquette » → suppression des maisons mal orientées → définition d'un coeur d'îlot (16h12) → rues larges → alignements (16h15) → ajout habitations intermédiaires (idem atelier #1) - îlots collés mais ouverts → pour casser l'effet de barre - orientation Sud-Ouest → efficace thermiquement (17h17) - assurer une continuité verte (16h20) → il faut reverdir/végétaliser ! → coulée verte - densification îlot « raquette » → proposition : logement social, orientation diago, R+3, étagé (?) (photo 16h35) - coeur d'îlot : → passage en R+2, R+3 (16h45) → remplacement du R+1 par quelque-chose de plus haut (plus compact!)	- protection solaire - plantations pour végétaliser (16h47) - pas hauts → pas d'ascenseurs → économie d'énergie - Rq : si (parking sous-sol) et (R+1) → ascenseur obligatoire ! - abandon de l'orientation N-S (?) - introduction d'un grand bassin (rôle important de l'eau) (16h55) - protections solaires qui se rétractent - Rq : entretien ? - présence de moustiques ? (16h57) - présentation d'un principe de patio + ascenseur (Patrice) (16h58) - Rq : SF : changement d'archétype (17h03) - parking centralisé commun (économie de voirie et de surfaces minéralisée) - création de noues (Rq : en bleue sur la carte) - proposition de modification de l'albédo ? (SF) (17h15) - isolation des murs extérieurs et des combles ! - logement traversant + coeur d'îlot vert - construction dense en haut de rue (photo 17h16) + coursives → logements traversants - travailler sur les jets d'eau (effets de rafraîchissement) - murs végétalisés au Sud (17h21?) - Discussion (sur principes constructifs) : - construction en terre (Sophie?) - ossature bois → Patrice - sur-élévation bois (17h25)

De manière générale, comment a évolué la séance ?

1. Prise en main de la documentation, compréhension de l'analyse de sensibilité,

2. Scénario 1 : démarrage de la réflexion sur la base de la forme urbaine existantes pour travailler sur la compacité et la verticalité, identification des îlots et ensemble de bâtiments à conserver / démolir / construire dans une logique par « lot » et en fonction du relief, dessin de la trame viaire, végétation, production énergétique, interrogation par rapport aux bâtiments limitrophes au quartier
3. Scénario 2 : plus rapide que le scénario 1, démarche plus interventionniste, démolition / construction de plus grande ampleur, en fonction du relief, dessin de la trame viaire, végétation, production énergétique,

De manière générale, comment s'est déroulée cette séance par rapport à la séance n°1 ? Une entrée plus rapide dans le travail de conception et de dessin ; démarche d'atelier et concepts du travail attendu mieux intégrés

Quels sont les retours des participants ? Appréciation positive de la documentation fournie et des résultats du 1^{er} atelier ; une démarche de production participative encore mieux appréciée, du fait de l'expérience et des acquis du 1^{er} atelier ; attentes des résultats et effets sur les scénarios élaborés

Restitution

- Scénario 1 : économe chauffage
- conservation coeur (?)
- création de porosité, hauteurs R+1, R+2 en conservant la typologie (?)
- Scénario 2 : Frais
- végétalisation de tous les coeurs d'îlots + noues + réduction des voiries
- bâtiments traversants
- collectif traversant
- typologies:
- coursives + escalier
- plots + patios intérieurs
- expérimentation terre crue

Scénario 1

Nom du scénario : économe (en chauffage)

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ?

Scénario jugé le plus intéressant de manière générale au niveau du groupe

Remplir le tableau suivant :

Critères	Pourquoi a-t-il été choisi ?	Comment a-t-il été utilisé ?
compacité	Bien placé dans le tableau des indicateurs influents	Habitat plus compact et dense (introduction de R+2, R+3)

isolation	Bien placé dans le tableau des indicateurs influents	déjà abordé lors de l'atelier précédent. Considéré comme acquis
-----------	--	---

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ?

Approche de remplacement de typologies ayant une valeur d'indicateur plus faible par une typologie ayant une valeur plus forte. Prise en compte, paradoxalement dans une optique d'optimisation, des effets induits par une intention de compensation (végétalisation pour compenser la densité) en prenant a priori les effets positifs potentiels (économie de climatisation l'été avec la végétalisation). Alors que la végétalisation ne figure pas dans l'analyse de sensibilité des indicateurs fournie.

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ?

Support immédiat de réflexion et de correction permise par la réactivité de la dessinatrice.

Des critères ont-ils été mentionnés alors qu'ils n'étaient pas dans la documentation ? Si oui, pourquoi ?

Principalement la végétation, de différentes natures (rideaux d'arbres, espace verts,...)

Des modifications ont-elles été réalisées de manière implicite ? Si oui, pourquoi ?

Isolation généralisée à tout l'habitat existant implicite

Scénario 2

Nom du scénario : frais

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ?

Par contraste mais probablement aussi sachant depuis l'atelier précédent que ce quartier souffre potentiellement d'un mauvais confort thermique (d'été)

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ?

Optimisation de la protection solaire intrinsèque (entre bâtiments) mais aussi par le rôle de protection de la végétalisation massive au Sud au regard des façades.

Changement de nature : Remplacement des réseaux viaires par des coulées vertes.

Eau : Introduction de noues pour l'effet de rafraîchissement induit.

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ?

Idem

Des critères ont-ils été mentionnés alors qu'ils n'étaient pas dans la documentation ?

Si oui, pourquoi ?

Consommation des bâtiments : Economie d'énergie liée à la modification (ou à la suppression) d'équipements des bâtiments (ascenseurs)

Type et localisation de parkings : Suppression des parkings individuels le long de la voirie et création de parkings mutualisés.

Des modifications ont-elles été mentionnées sans être réalisées ? Si oui, pourquoi ?

Modification de l'albédo

9.2.3. Quartier Hers

Présentation du groupe de travail

Nom de la zone : Château de l'Hers

Nom des modérateurs :

- Nathalie Tornay / EEAM
- Geneviève Bretagne / aua/T

Nombre de participants : 5

Nom des participants et fonction :

- Hervé Ambal, urbaniste / Cabinet AR357
- Samuel Roux, chargé de projets urbains / Toulouse Métropole
- Pauline Lefort, chargée de mission énergie / CeRCAD Midi-Pyrénées
- Philippe Millasseau, architecte urbaniste / architecte libéral, CAUE 82, APUMP
- Adélaïde Mailhac / thèse « Evaluation environnementale à l'échelle urbaine »

Nombre de participants ayant été présents au premier atelier Multiplicités : 6 (dont 4 présents au second atelier)

L'organisation au sein du groupe

Nom du/des rapporteurs : Hervé Ambal

Comment le rapporteur a-t-il été désigné ? Décision spontanée du groupe

Quand l'a-t-il été ? A la fin du travail de groupe

Nom du/des dessinateurs ? Hervé Ambal, Samuel Roux, Philippe Millasseau

Comment le dessinateur a-t-il été désigné ? Prise en main spontanée des crayons, pas de désignation, 1^{ère} initiative par Hervé Ambal

Quand l'a-t-il été ? Tout au long du travail de groupe

Comment s'est articulée la discussion au sein du groupe ? Bonne interaction au sein du groupe, pas de temps mort, complémentarité des interventions (archi / projets urbains / apports techniques), peu d'intervention des modérateurs en termes de relance de la dynamique de groupe

Les modérateurs ont-ils dû « recadrer » ou « pousser » à l'optimisation ? Pas vraiment, quelques explications ou pointages spécifiques sur certains paramètres, œil sur la montre pour organiser le temps de travail autour de 2 scénarios

Numéroter dans l'ordre de l'approche :

- Compréhension des documents mis à disposition : 1

- Choix des scénarios : 3
- Choix des critères : 2

Commentaires généraux sur l'ordre d'approche : Appropriation et compréhension nécessaires des critères, préalablement aux choix des paramètres en fonction des scénarios choisis

Comment l'apport de connaissances par les documents a-t-il été reçu ? L'ensemble des documents a été bien reçu et compris, l'analyse de sensibilité nécessitant néanmoins des clés complémentaires pour faciliter l'interprétation et la compréhension (*comment traduit-on l'effet positif ou négatif pour tel ou tel critères ?*)

Remplir le tableau suivant :

	Scénario 1	Scénario 2
Type de scénario	Gain énergétique en chauffage + climatisation	Captation solaire
Critères retenus	• Compacité • Verticalité • Isolation • Protections solaires • Végétation génèreuse caduque • Ventilation naturelle (logements traversant) • Captation solaire en toiture + façades Sud	• Orientation • Verticalité • Prospect • Captation solaire en toiture + façades Sud • Végétation génèreuse caduque • Ventilation naturelle (logements traversant)

De manière générale, comment a évolué la séance ?

4. Prise en main de la documentation, compréhension de l'analyse de sensibilité,
5. Scénario 1 : démarrage de la réflexion sur la base du modèle type / théorique (les cubes) pour travailler sur la compacité et la verticalité, identification des bâtiments à conserver / démolir / construire dans une logique par « lot » et en fonction du relief, dessin de la trame viaire, végétation, production énergétique, interrogation par rapport aux bâtiments limitrophes au quartier
6. Scénario 2 : plus rapide que le scénario 1, démarche plus interventionniste, démolition / construction de plus grande ampleur, en fonction du relief, dessin de la trame viaire, végétation, production énergétique,

De manière générale, comment s'est déroulée cette séance par rapport à la séance n°1 ? Une entrée plus rapide dans le travail de conception et de dessin ; démarche d'atelier et concepts du travail attendu mieux intégrés

Quels sont les retours des participants ? Appréciation positive de la documentation fournie et des résultats du 1^{er} atelier ; une démarche de production participative encore mieux appréciée, du fait de l'expérience et des acquis du 1^{er} atelier : +++, prêts pour un 3^{ème} atelier !

Scénario 1

Nom du scénario : Scénario Energétique

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ? Jouer sur une limitation des besoins en chauffage et en climatisation – Souci du confort d'été

Remplir le tableau suivant :

Critères	Pourquoi a-t-il été choisi ?	Comment a-t-il été utilisé ?
Compacité	Limiter les déperditions énergétiques, en conservant quelques éléments structurants	
Verticalité	Varier la hauteur pour profiter au mieux des apports solaires, tout en limitant les effets d'ombre portée, s'adapter au relief	
Isolation	Renforcement de l'enveloppe extérieure des bâtiments existants	
Protection solaire	Façades Sud-Ouest et Ouest	
Végétation naturelle	Végétation généreuse, caduque, en cœur d'îlot	
Ventilation naturelle	Logements traversant	
Captation solaire	Toiture, façades Sud, sur les bâtiments conservés	

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ? Optimisation conjointe des deux premiers critères, puis des autres

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ? Dessin : aide et résultat de la réflexion

Remplir le tableau suivant :

Nature de la modification	Localisation	Justification de la modification	Selon quel critère (dans quel but)
Analyse du contexte	L'ensemble de la parcelle	S'intégrer dans le contexte existant	continuité

Emprise au sol	L'ensemble de la parcelle	L'orientation des bâtiments / topographie	ensoleillement
volumétrie	L'ensemble de la parcelle	Compacité / ensoleillement	Compacité / ensoleillement

Des critères ont-ils été mentionnés alors qu'ils n'étaient pas dans la documentation ?

Si oui, pourquoi ? *je ne crois pas... ? idem*

Des modifications ont-elles été mentionnées sans être réalisées ? Si oui, pourquoi ?

non

Des modifications ont-elles été réalisées de manière implicite ? Si oui, pourquoi ?

non

Comment a été accueilli le résultat final ? Par le groupe dans un premier temps puis par l'ensemble de l'assemblée lors de la restitution.

Satisfait d'avoir investi et proposé une nouvelle typologie architecturale et urbaine (par rapport à l'atelier 1) et curieux de connaître les résultats énergétique de cette proposition.

Scénario 2

Nom du scénario : Captation solaire

Pourquoi ce scénario a-t-il été choisi ? Optimiser les façades Sud et Ouest

Remplir le tableau suivant :

Critères	Pourquoi a-t-il été choisi ?	Comment a-t-il été utilisé ?
Orientation	Ensoleillement des façades Sud et Ouest, modèle urbain en peigne	
Verticalité	Varier la hauteur pour profiter au mieux des apports solaires, tout en limitant les effets d'ombre portée, s'adapter au relief	
Prospect	Limiter les effets d'ombre portée, base de conception urbaine = trame viaire	
Captation solaire	Toiture	

Végétation	Végétation généreuse, caduque, en macro-lots, en cœur d'îlot	
Ventilation naturelle	Logements traversant	

Quelle a été l'approche de réflexion (optimisation de tout, optimisation d'un critère puis des autres, ...) ? Optimisation : 1/ orientation, 2/ verticalité + prospect, 3/ les autres critères

Le dessin a-t-il été un support à la réflexion ou le résultat de celle-ci ? Dessin : aide et résultat de la réflexion

Remplir le tableau suivant :

Nature de la modification	Localisation	Justification de la modification	Selon quel critère (dans quel but)
Analyse du contexte	L'ensemble de la parcelle	S'intégrer à l'échelle urbaine	continuité
Emprise au sol	L'ensemble de la parcelle	L'orientation des bâtiments / topographie	ensoleillement
volumétrie	L'ensemble de la parcelle	Compacité / ensoleillement	Compacité / ensoleillement

Des critères ont-ils été mentionnés alors qu'ils n'étaient pas dans la documentation ? Si oui, pourquoi ?

Oui, l'insertion urbaine. Cette proposition s'intègre dans le tissu urbain des quartiers environnants (désenclaver), à partir des axes routiers.

Des modifications ont-elles été mentionnées sans être réalisées ? Si oui, pourquoi ?

Oui, la possibilité de « retourner les « peignes » ».

Des modifications ont-elles été réalisées de manière implicite ? Si oui, pourquoi ?

Non

Comment a été accueilli le résultat final ? Par le groupe dans un premier temps puis par l'ensemble de l'assemblée lors de la restitution.

Curieux de connaître le résultat énergétique de cette proposition qui renouvelle totalement la typologie architecturale et urbaine de l'Hers.

145

3. COMPACTITE-CONTIGUITE

Forme urbaine / Forme architecturale

* Indicateur simplifié

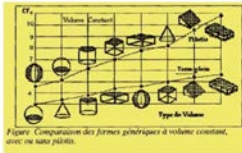
1. Généralités, Définition

La compacité d'un bâtiment ou d'un îlot est caractéristique de sa volumétrie. Plus un bâtiment ou un îlot est compact, plus ses échanges avec l'environnement extérieur sont limités, par exemple les déperditions ou les gains thermiques. La compacité peut être évaluée par un coefficient de forme (Cf), ratio de la surface d'enveloppe extérieure par le volume (chauffé ou refroidi). On appelle coefficient de forme réduit (Cfo), le rapport sans dimension, surface d'enveloppe par volume à la puissance 2/3. Attention, plus ces rapports sont faibles, plus le bâtiment est compact.

La contiguïté entre bâtiments va modifier la surface d'enveloppe extérieure, en la réduisant de tous les murs mitoyens, supports adiabatiques. En ce sens, un îlot constitué de bâtiments contigus aura des déperditions beaucoup plus faibles que l'ensemble des bâtiments le constituant situés chacun sur une parcelle : un îlot contigu sera beaucoup plus compact qu'un îlot non contigu.

2. Valeurs de référence

Les coefficients de forme d'un bâtiment ou d'un îlot varient avec la forme générique dans laquelle ces volumes s'inscrivent : les bâtiments hémisphériques (gêodes) seront plus compacts que les cylindriques, prismatiques ou parallélépipédiques.



Les bâtiments idéaux du point de vue de la compacité sont les bâtiments (semi-)enterrés ou les bâtiments troglodytes qui posent toutefois d'autres problèmes en termes de confort visuel, hydrique...



C'est pourquoi à l'échelle urbaine, il est très intéressant de travailler sur la contiguïté des bâtiments et préférer à un tissu pavillonnaire discontinu ou à l'îlot ouvert, la maison en bande ou la villa urbaine, ou mieux l'îlot fermé (hausmannien, par exemple).

Surface d'enveloppe / Volume
Surface Contigüe / Surface totale enveloppe

Pour rendre plus économes nos bâtiments, il faut augmenter leur compacité tout en maintenant une profondeur limitée de 10 à 12m avec une orientation permettant la pénétration de la lumière, de l'énergie solaire et de l'air.

3. Interactions

Impacts sur la consommation énergétique :

Les transmissions sont proportionnelles au coefficient de déperdition volumique G1. Ce coefficient peut être écrit comme le produit d'un niveau d'isolation [Ubat] par un coefficient de taille [Ct] par le coefficient de forme réduit Cfo.

$$Transmissions = \sum_{i=1}^n \Phi = U_{bat} A_{ext} (T_{int} - T_{ext}) = G_1 V (T_{int} - T_{ext}) [W]$$

$$U_{bat} A_{ext} = G_1 V [W K^{-1}]$$

$$G_1 = \frac{U_{bat} A_{ext}}{V} [W K^{-1} m^{-3}]$$

$$G_1 = U_{bat} \frac{1}{V^{1/3}} \frac{A_{ext}}{V^{2/3}} = U_{bat} C_t C_{fo}$$

Cela confirme qu'un travail sur la compacité des bâtiments (Cfo), notamment à l'échelle d'un îlot, aura des impacts directs sur les déperditions thermiques des bâtiments, et sur la performance énergétique de la ville.

Interactions avec les autres indicateurs :

- prospect
- emprise au sol

4. Bibliographie

- [1] Nick Baker et Koen Steemers, Energy and Environments in Architecture, E17N SPON, London, 2000.
- [2] Luc Adolphe, Énergétique du Bâtiment dans son Environnement, Cours EMP-ISUPFERE, 2000.
- [3] R. Banham, The architecture of the well-tempered environment, Chicago, 1969.

4. SURFACE VEGETALISEE

Vegetation et eau

Surface végétalisée / surface totale
* Indicateur simplifié

1. Généralités, Définition

Nous définissons la variable « surface végétalisée » dans un espace urbain comme une surface au sol recouverte d'un substrat végétal, ras de type pelouse ou haut de type bosquet, arbruste et arbre. Cette surface végétalisée peut également recouvrir les bâtiments au niveau de leur toiture (toiture végétalisée) ou de leurs façades (mur végétalisé).

Ces surfaces végétales se caractérisent par une capacité d'évapotranspiration et d'ombrage (pour la végétation haute) qui joue un rôle sur l'îlot de chaleur urbain.

- Cette variable peut se traduire par plusieurs données quantifiables :
 - la surface totale des espaces végétalisés sur la surface de la zone étudiée
 - la taille moyenne des espaces végétalisés sur la zone étudiée (m²)
 - la répartition entre la zone à végétation basse et haute (%)
 - la quantité d'irrigation nécessaire (litres/m² de végétation/jour)

2. Valeurs de référence

Évolutions historiques :

L'espace végétal en ville est traité jusque dans les années 70/80 par des jardins urbanisés gérés à des fins esthétiques et hygiéniques (parcs paysagers, espaces publics de détente et de loisir). Plus tard, dans les années 90, un renversement s'opère avec l'intégration du concept de développement durable. Les espaces végétalisés ne sont plus perçus seulement comme de simples supports paysagers mais deviennent des éléments d'écosystème à part entière, ils ont un rôle pour la gestion de l'eau, le confort climatique, la qualité de l'air, le stockage du carbone...

Surface totale des espaces végétalisés :

Dans le cas des îlots de fraîcheur urbain, une étude [1] montre qu'il faut environ 10 ha d'espace vert pour perdre 1°C, 50 ha pour 2°C et 200 ha pour 3°C. Cependant les surfaces varient énormément d'une ville à l'autre : le centre de l'agglomération parisienne ne compte que 2,4 m²/hab d'espaces verts publics alors que les objectifs du schéma directeur d'Île de France sont de 10m²/hab [6]. La ville de Nanterre bénéficie de 105 ha ouverts au public, ce qui représente près de 9% du territoire municipal et près de 12 m²/hab [8].

Taille moyenne des espaces végétalisés et échelles d'implantation :

Il est intéressant de diversifier au maximum les types de végétalisation : squares de quartiers, parcs urbains, plantations d'alignement, murs et toitures végétalisés... Chaque mode de « nature en ville » présente un intérêt pour la lutte contre les ICU. Ainsi, les espaces végétalisés peuvent avoir plusieurs surfaces et dispositions : bâtiment, parcelle, rue (arbres d'alignement), petit parc, grand parc. On estime qu'à surface égale, les espaces verts de proximité ont un plus grand pouvoir de rafraîchissement que les grands massifs périphériques. La création d'un parc de 100 m² en cœur d'îlot dense bordé par des immeubles de 15 m de hauteur, permet d'abaisser la température de 1°C dans les rues adjacentes [8].

La ville de Lyon teste depuis 2005 un mur végétal bio filtrant dont les vertus dépolluantes semblent plutôt encourageantes. Selon les analyses de l'air à l'entrée et à la sortie du mur, on remarque une diminution de 50% pour le dioxyde d'azote et de 80% pour certains composés organiques volatils (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène) [9]. Cependant, il convient de rappeler que le rafraîchissement apporté par la végétation provient essentiellement de l'évapotranspiration. La végétation doit donc être continuellement bien alimentée en eau. Or les périodes de canicule coïncident la plupart du temps avec des périodes de forte sécheresse. C'est pourquoi les murs végétaux et toitures végétalisées, à moins d'être fortement arrosés, auront toujours une efficacité inférieure à des plantations en pleine terre.

Pour donner un exemple à une autre échelle, à Angers, la surface accordée à la végétation dans la ZAC des Capucins représente 1/3 de la totalité de la ZAC, rythmée par une succession franche de séquences bâties de lamelles vertes, aux statuts et aux usages divers... »



Mur végétal Perrache, Lyon, 2007



ZAC des Capucins, Angers

Quantité d'irrigation nécessaire : D'après une étude de métro France [1], un espace vert horizontal classique, comme une pelouse, demande environ 3 litres d'eau/jour et les murs végétaux demandant quatre à cinq fois moins d'eau qu'un gazon. Aujourd'hui, rares sont les pelouses plantées, elles sont remplacées par des plantations adaptées comme des vivaces et des graminées, moins gourmandes en eau.

3. Impacts microclimatiques

La végétation haute limite la montée en température des surfaces urbaines en bloquant une partie du rayonnement solaire et en le renvoyant directement vers l'atmosphère. Cela contribue en outre à limiter la montée en température de l'air ambiant.



Protection du rayonnement solaire [3]

De plus, les végétaux sont capables de puiser l'eau du sol pour la restituer sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère [3]. En milieu urbain, moins d'espaces sont laissés au végétal, ce qui a pour conséquence de réduire l'humidité de l'air. Notons cependant que cette évapotranspiration est essentiellement liée à l'irrigation des végétaux. Des arbres mal irrigués (stress hydrique) auront même tendance à limiter le rafraîchissement de la ville en piégeant le rayonnement solaire infrarouge [4]. Cette réduction de l'humidité de l'air est accentuée par l'imperméabilisation de la ville. En effet, en milieu urbain, la pluie ruisselle sur les toitures et les voiries et s'écoule vers les réseaux d'eaux pluviales. Le sol contient donc peu d'eau ce qui réduit l'évaporation [7].

Or cette diminution de l'humidité provoque une augmentation des températures. En effet, l'évaporation de l'eau s'accompagne d'une absorption de chaleur. Ainsi, lors d'une averse estivale fournissant cinq millimètres d'eau par mètre carré, huit fois moins d'eau s'évaporent en milieu urbain qu'en milieu rural dans les vingt-quatre heures suivantes. La différence de quantité de chaleur empruntée à l'environnement correspond à 2,5 kWh/m² en vingt-quatre heures, soit un peu plus du double de la chaleur résultant des activités humaines en été [8].

Le potentiel d'action sur l'ICU par augmentation de la surface végétalisée est très important.

4. Interactions

Les impacts sur la consommation énergétique :

La végétation haute bloque une partie du rayonnement solaire atteignant les bâtiments. Ainsi, cette réduction des apports permet de diminuer les besoins de climatisation et/ou d'améliorer le confort thermique en été. Cependant, si cette végétation n'est pas caduque, cela entraîne une augmentation des besoins de chauffage en hiver. Dans tous les cas, la végétation peut conduire à une augmentation des besoins d'éclairage artificiel.

Les murs végétaux et les toitures végétalisées sont aussi un moyen pour protéger des rayonnements solaires. Ce sont des écosystèmes qui créent un microclimat abaissant la température de l'enveloppe du bâtiment. La température maximale d'un mur végétal est de 30°C alors que celle d'un mur classique atteint les 60°C. On note une diminution de l'utilisation de la climatisation [3].

Impact sur les consommations d'eau :

La lutte contre le stress hydrique nécessite une irrigation consommatrice en eau, souvent potable.

Interaction avec d'autres variables :

- emprise au sol - une trop grande emprise au sol du bâti peut limiter le végétal en ville. Cependant, grâce à l'emploi de nouvelles techniques de végétalisation du cadre bâti, cela ne sera pas systématique, l'architecture devenant elle-même le support de cette végétation.
- isolation / inertie - les murs et toitures végétaux ne sont pas des isolants mais ils permettent, de par leur mise en œuvre (lame d'air ventilée continue dans le cas des murs), d'améliorer le bilan thermique des constructions.
- revêtements des murs, toitures et sols - ils sont de plus en plus végétalisés.
- espaces en eau - intégration de noues, plans d'eau dans tous types d'espaces végétalisés
- capteurs solaires - ils entrent en compétition avec les toitures végétalisées

Les effets négatifs de ce levier d'action peuvent être les consommations d'éclairage et les consommations d'eau.

5. Bibliographie

- [1] Doreux, Jean-François, Architecture végétale, Eyrolles, 2013
- [2] Dettwiler, Jacques, « L'évolution scolaire de la température à Paris », FRA 6, no 13 (1978): 95-130.
- [3] ECC, « L'adaptation au changement climatique et le phénomène d'îlot de chaleur urbain : conséquence sur les bâtiments 2014 »
- [4] Gill, Handley, Emsw, et Pauls, « Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure », Built Environment 2007
- [5] André Many, Hydrologie générale, Section SIE et GC, <http://echo2.epfl.ch/fle-drologie/chapitres/chapitre4/main.html>, 2005
- [6] Süßnagel, Étude de 1987 citée dans Morgane Colombat, « Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville » (Université Paris 6)
- [7] United States Environmental Protection Agency, « Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies », octobre 2008.
- [8] Vallette, Cordeau, Magdelaine, « Les îlots de chaleur urbains, l'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines » AU Ile de France, 2010.
- [9] DEV de la Ville de Lyon, « Végétalisation de murs et biofiltration : Retour d'expérience sur la ville de Lyon », Colloque ALE Juin 2008

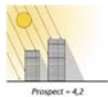
- 147

7. PROSPECT

Forme urbaine / Forme architecturale

1. Généralités, définition

Le prospect indique le rapport (sans dimension) entre la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue et sa largeur. Cet indicateur peut être appliqué à plusieurs échelles de la rue, jusqu'à l'échelle de l'agglomération. Le prospect définit un des plus importants indicateurs employés dans les analyses climatiques urbaines [2], [3], [4], [9].



Le facteur de vue du ciel est un autre indicateur qui caractérise le niveau d'obstruction ou d'ouverture d'un ensemble bâti par rapport à la visibilité de la voûte céleste. Ces deux indicateurs ont un rôle majeur sur le bilan radiatif et la disponibilité d'éclairement naturel sur les surfaces bâties.

■ Méthode de calcul :

$$\text{Prospect} = P = \frac{H_1 + H_2}{2L}$$

$$\text{Facteur de vue du ciel} = \psi_{\text{ciel}} = \frac{(1 - \cos \theta_1) + (1 - \cos \theta_2)}{2}$$



Schéma nécessaire pour le calcul de ces deux indicateurs : le prospect et le facteur de vue du ciel - rue canyon

2. Valeurs de référence

Évolutions historiques :

Ce paramètre a déjà été utilisé dans de nombreux codes d'urbanisme afin de garantir le droit au soleil. En France, après la seconde guerre mondiale, une règle inspirée par la Charte d'Atènes, stipulait que la hauteur bâtie ne devait pas dépasser la largeur des rues. La Cité Radieuse de Le Corbusier est un exemple de recherche du rapport optimal de ce paramètre notamment pour permettre une plus grande incidence de la lumière du jour à l'intérieur des habitations. Cependant cette préoccupation remonte encore plus loin dans le temps. Les réglementations d'urbanisme, les projets d'expansion urbaine tels que Barcelone ou Paris (XIX^{ème} siècle) ont cherché à établir la notion de prospect afin de prendre en compte des préoccupations hygiénistes et climatiques. L'arrêt du Conseil d'État du 13 décembre 1862 définit le rôle du rapport de la hauteur et de la largeur des rues : « Les dispositions ont pour but d'assurer la circulation de l'air et de la lumière dans les rues et d'établir des garanties en faveur de la sécurité publique et de la sécurité des voisins. » Les travaux d'Hausmann à Paris (entre 1853 et 1870) ont abouti à de plus faibles prospects, avec des percées urbaines jusqu'à deux fois plus larges qu'aujourd'hui.

Tissus urbains des villes contemporaines :

La morphologie urbaine accroît l'absorption du rayonnement solaire du fait des réflexions, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible, et diminue les pertes de rayonnements infrarouges, par « effet écran » des murs des bâtiments. Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albedo global de la ville en plaçant le rayonnement.



Prospect de trois tissus urbains de la ville contemporaine

Des travaux de T.R. Oke ont montré que pour une meilleure protection au vent et une préservation de l'îlot de chaleur, le rapport H/L devrait être inférieur à 0,4, alors qu'une valeur proche de 0,5 et 0,65 permettrait de dissiper la pollution et de favoriser l'inséquelement de la rue [8].

3. Impacts microclimatiques

Le prospect et le facteur de vue du ciel sont deux des indicateurs qui caractérisent la forme urbaine et ils jouent un rôle majeur quant à l'ampleur du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Par exemple, Oke donne une formulation de l'îlot de chaleur urbain qui dépend uniquement de leurs variations : **plus le prospect est élevé, (rue étroite et bâtiments hauts) plus l'îlot de chaleur est exacerbé** [8].

Ceci est en partie du au piégeage radiatif. Ce phénomène désigne de fait que dans une forme urbaine à fort prospect, les rayons solaires sont subis de multiples réflexions et sont réchauffés les surfaces qui composent la rue avant de ressortir partiellement vers l'atmosphère. La température à l'intérieur de la rue canyon s'en trouvera donc augmentée. Les rayons infrarouges émanant des matériaux urbains chauffés sont piégés de la même manière [4]. Par ailleurs, un prospect élevé va contribuer à ralentir le vent et donc diminuer la dispersion de la chaleur [7].



Illustration du piégeage radiatif [4]

Le potentiel d'action sur l'ICU par réduction du prospect reste modéré.

4. Interactions

Impact sur la consommation énergétique :

Le prospect a une influence sur la consommation énergétique de la ville puisqu'il modifie le rayonnement solaire reçu par les bâtiments.



Le prospect et l'énergie urbaine - représentation simplifiée

Interactions avec les autres variables :

- densité
- emprise au sol - avec les mêmes types de rues et de prospect l'orientation de celles-ci a une influence majeure.

Agir sur l'ICU par ce levier d'action consiste à limiter le prospect (rue large et bâtiments bas). Cela implique des effets négatifs, notamment ceux liés à l'augmentation de l'énergie dans les transports (étalement urbain) et au confort dans les espaces intérieurs (plus de rayonnement solaire).

5. Bibliographie

- [1] ADEME, 2013. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [2] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [3] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [4] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [5] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [6] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [7] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [8] Oke, T.R. 1989. « The urban climate ».
- [9] Oke, T.R. 1989. « The urban climate ».

8. CAPTATION

SOLAIRE

Emission de chaleur anthropique

* Indicateur simplifié

1. Généralités, définition

Les capteurs solaires sont des systèmes techniques permettant la récupération d'énergie solaire dans l'objectif de générer de la chaleur ou de l'électricité. Ils sont aujourd'hui de plus en plus présents sur les toits ou façades des bâtiments. Cette présence est aussi très marquée en secteur urbain.

Leur fonctionnement est principalement basé sur deux technologies :

- **Capteurs solaires thermiques** (plan, à concentration, sous vide, etc.). Le capteur solaire thermique est constitué d'un coffre rigide et vitré à l'intérieur duquel une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbants), qui reçoivent l'énergie solaire chauffent un liquide caloporteur. Il permet de produire de l'eau chaude sanitaire et peut être utilisé pour le chauffage.
- **Capteurs solaires photovoltaïques (PV)** : le capteur solaire photovoltaïque qui compose les panneaux solaires, permet de récupérer la lumière du soleil pour la transformer en électricité.

Suivant leur intégration à l'architecture (intégrée ou décollée de la toiture, en brise soleil, séparé, etc.), leur impact sur les températures des surfaces peut varier et influencer l'ICU.

■ Pour caractériser la présence de capteurs dans un quartier on peut calculer la **surface de capteurs sur la surface totale de plancher des bâtiments du quartier**.

2. Valeurs de référence

Évolutions historiques :

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années 1940 dans le domaine spatial pour alimenter les satellites. En 1973 le choc pétrolier a permis à l'énergie solaire un essor considérable. Cette année-là fut construite la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

Différentes technologies :

Il existe trois types de capteurs solaires thermiques :

- les « **serpentes** » solaires capteurs plans dans lesquels le fluide passe dans un serpentin, très peu coûteux mais rendement faible,
- les capteurs plans dans lesquels le fluide passe dans un serpentin sous une vitre, peu coûteux mais fonctionnement seulement pendant l'été,
- les capteurs à tube sous vide dans lesquels le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide, le vide étant un très bon isolant, ils fonctionnent à toutes les saisons.

Les panneaux photovoltaïques sont élaborés à base de silicium, il existe trois principaux modules de cellules photovoltaïques :

- silicium monocristallin : très bon rendement et coût élevé, mais filière économique développée,
- silicium polycristallin : bon rendement et coût intermédiaire,
- silicium amorphe : rendement faible et coût faible.

Production :

L'ADEME estime qu'en France, une installation photovoltaïque peut produire, en moyenne, **300 kWh par an et par m² de capteur** (pour une installation classique de 0,1 kWh/m²) [3]. Ce chiffre varie bien sûr en fonction du type de capteur et de la région (entre 80 et 130 kWh/an/m², voir carte d'ensoleillement).

En France, d'après un retour d'expérience mené par le CSTB, la production moyenne des panneaux solaires thermiques destinés à l'eau chaude sanitaire est de **200 kWh par an et par m² de capteur**. En fonction du type d'installation et de la région, cela permet de couvrir en moyenne 70% des besoins énergétiques pour ce poste de consommation [2].

Les panneaux solaires thermiques destinés au chauffage produisent quand à eux entre **300 et 500 kWh par m² de capteurs par an**, selon les départements [3]. Ces installations sont cependant plus coûteuses.

Exemples concrets de dispositifs d'aménagements :

La solution « parkings centres commerciaux équipés en capteurs photovoltaïques » est parfois avancée pour lutter contre les ICU (exemple de la CUB) l'exemple de l'éco-quartier de Borne à Grenoble montre des objectifs ambitieux : (a) pour les bureaux une énergie positive ; (b) pour les commerces pas de climatisation. Pour cela, il est fait recours aux énergies solaires :

- 1 m² de capteur solaire thermique par logement
- 1000 m² de panneaux photovoltaïques sur la toiture du centre commercial
- 430 m² de panneaux photovoltaïques sur le toit du bâtiment de bureau à énergie positive

La façade de l'Hôtel de la Communauté Urbaine Bordeaux et ses panneaux solaires



Carte d'ensoleillement (kWh/m²)



3. Impacts microclimatiques

Les capteurs solaires qui équipent les façades équipées de capteurs solaires sont en partie absorbés par les capteurs qui transforment le rayonnement en chaleur ou en électricité. A ce titre, ils contribuent au rafraîchissement urbain [4], [5].

Dans le cas de la transformation en chaleur pour l'eau chaude sanitaire, cet effet peut être limité du fait qu'une fois que le stockage est rempli à 100%, l'évacuation de chaleur ne se fait plus. Cet effet de rafraîchissement urbain est accentué si les capteurs sont décollés de la toiture des bâtiments, agissant ainsi comme des protections solaires.

La génération d'énergie solaire électrique ou thermique directement à partir de rayonnement solaire ne requiert aucun type de combustion, et donc aucune émission de gaz à effet de serre. Dans le cas de la transformation en électricité, il faut noter le faible rendement de ce type de capteur, qui de plus est fortement influencé par la température de l'air qui l'entoure [6].



Immeuble logements Lyon confluence P. Bollet : Les capteurs photovoltaïques jouent le rôle de protections solaires

Le potentiel d'action sur l'ICU par augmentation de la surface de capteurs reste modéré.

4. Interactions

Impacts sur la consommation énergétique :

Les panneaux solaires, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques, ont bien évidemment un impact positif sur la consommation énergétique d'un bâtiment, d'un quartier ou d'une ville puisque l'énergie produite peut compenser les consommations.

Par ailleurs, la diminution de l'effet d'îlot de chaleur urbain a également une influence sur les consommations énergétiques des bâtiments (économies sur les consommations d'énergie de rafraîchissement de ces bâtiments [5]) et sur le confort thermique.

Interactions avec d'autres variables :

- densité - une ville dense ne peut pas développer de façon importante l'utilisation de capteurs solaires en comparaison avec une ville étale.
- revêtement des murs, toitures et sols - la qualité architecturale des sites interdit parfois leur utilisation, seuls certains revêtements sont autorisés dans les zones classées.
- végétation - la présence de ces capteurs solaires se fera au détriment de toitures végétalisées, ou d'autres types de revêtement. Il faut prendre en compte les pertes par ombrage. L'environnement d'un module solaire inclut des arbres, montages, murs ... qui provoquent des ombres sur le module et affecte l'énergie collectée.
- Emprise au sol / Prospect - la forme urbaine régit l'utilisation et la disposition des capteurs solaires qui doivent être orientés au sud avec une inclinaison de 30°.

Les effets négatifs induits par ce levier d'action sur l'ICU sont principalement liés à l'énergie grise nécessaire sur le cycle de vie.

5. Bibliographie

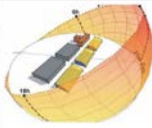
- [1] ADEME, 2013. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [2] Benoit, C., et al. 2006. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [3] ADEME, 2013. « L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, retour d'expérience en France du Projet Européen Hip-Hip Avancées et réalisations ».
- [4] Masson, V., M. Borhomme, J. Salagnac, X. Briotter, et A. Lemonsu. 2014. « Solar Panels reduce both global warming and Urban Heat Island ». *Water: Frontiers in Environmental Science* 2: 14.
- [5] A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures, *Solar Energy*, Volume 81, Issue 7, July 2007, Pages 872-883, Jay S. Golden, Joby Carlson, Kamel E. Kaloupek, Patrick Phelan.
- [6] Modeling of natural convection in vertical and tilted photovoltaic applications, *Energy and Buildings*, Volume 55, December 2012, Pages 810-822, G.L. Lau, E. Sanicriste, G.L. Yeh, V. Timchenko, M. Fossa, C. Molino, S. Giroux-Julien.
- [7] Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment, *Building and Environment*, Volume 46, Issue 12, December 2011, Pages 2542-2551, Adam Scherba, David J. Sailor, Todd N. Rosemeier, Carl C. Warner.
- [8] Effect of building integrated photovoltaics on microclimate of urban canopy layer, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 5, May 2007, Pages 1891-1901, Wei Tian, Yiping Wang, Yiyang Xie, Danzhu Wu, Li Zhu, Jianbo Ren.
- [9] Grand Urbanisme Urbain, Identification des îlots de chaleur de l'agglomération lyonnaise, vulnérabilité des populations et mesures envisageables de réduction, octobre 2010.

9. ORIENTATION FACADES

Forme urbaine / Forme architecturale

1. Généralités, définition

L'orientation des façades est primordiale sur la captation du rayonnement solaire et de la lumière, ainsi que sur la ventilation des bâtiments par la perméabilité de l'enveloppe. Nous nous concentrons ici sur la captation du rayonnement solaire. Dans l'hémisphère Nord, nous favoriserons des façades orientées Sud, susceptibles, hiver comme été, de recevoir les flux solaires directs maximum. Ces façades seront largement ouvertes et vitrées, peu susceptibles d'ombres portées par les bâtiments ou arbres voisins. Par contre, il y a lieu de protéger en été ces façades du rayonnement direct par des protections solaires adaptées ou de la végétation à feuille caduque (voir fiche 10). De même, il y a lieu de réduire, du point de vue énergétique, les surfaces Nord. Pour qualifier cette propension à favoriser les surfaces Sud, on utilise l'Indicateur Surface Sud Équivalente, qui correspond à une surface pondérée d'enveloppe, pour laquelle les poids notés C1, sont décroissants quand on passe de l'orientation Sud, à la toiture, aux orientations Est ou Ouest, et enfin à l'orientation Nord.



Le coefficient d'orientation est donné dans le tableau suivant en fonction de l'orientation de la paroi et de son orientation :

C1	C2	C3	C4	C5	C6
Orientation de la paroi (°)	0	30	60	90	120
Orientation de la paroi (°)	150	180	210	240	270
Orientation de la paroi (°)	300	330	360	390	420

Pour une paroi horizontale : C1 = 0,8.

2. Valeurs de référence

Pour les façades, il faut privilégier les orientations permettant l'accès à la lumière, au soleil et à l'air, notamment les façades Sud. Mais pas uniquement, dans la mesure où il est intéressant de privilégier les orientations Est pour profiter de l'énergie et de la lumière du matin, qui pénétrera très profondément dans les bâtiments, ou de l'Ouest pour les pièces de vie, le soir.

Les potentialités de captation solaire en ville varient de manière importante en fonction de ces contraintes d'orientation.

Augmenter le facteur d'obstruction amène à augmenter le chauffage surtout au Sud.

Une obstruction de 30° sur une façade Sud pour une maison largement vitrée (type bioclimatique) en France, peut amener à une augmentation de l'ordre de 20% de la facture de chauffage et une réduction du même ordre de l'éclairage naturel.

Les surfaces de toiture sont des surfaces captatrices intéressantes (voir fiche 8), à la fois par leur taille, quand l'emprise bâtie (le C2 - voir fiche 2) est importante, et parce que les flux solaires reçus y sont relativement importants et stables, dans la journée comme dans l'année, par rapport à ceux reçus sur les façades.

10. PROTECTIONS SOLAIRES

Forme urbaine / Forme architecturale

1. Généralités, définition

Pour améliorer les performances des systèmes de rafraîchissement et pour éviter des problèmes de surchauffe estivale, il est indispensable de prévoir lors de la conception du bâtiment, des protections solaires. Ces protections solaires peuvent, en outre, servir à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain.

■ Pour caractériser ces protections solaires on peut calculer le **pourcentage de protection des parois** (surfaces de parois protégées / surfaces de parois totales). Notons cependant qu'il est nécessaire de travailler avec des parois dites « Sud équivalentes ». Les parois orientées au Sud étant les plus soumises au rayonnement solaire, on va appliquer des pondérations aux différentes surfaces pour donner plus d'impact à la protection de ces façades (des pondérations varient entre 1 pour les façades verticales orientées au sud, et 0,2 pour les façades nord).

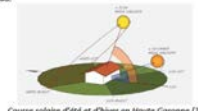
2. Valeurs de référence

Proportions de surfaces vitrées :
Les protections solaires servent à protéger surtout les surfaces vitrées exposées au soleil mais également les murs. Une première possibilité consiste à respecter les ratios de surface de fenêtres par rapport aux surfaces de plancher du local correspondant. Au Sud, le ratio surface fenêtre/surface plancher est de 25 à 35 %. À l'est et à l'ouest, le ratio est de 10 à 25 % et au Nord le ratio est de 0 à 10%. La RT 2012 impose une surface minimale de parois vitrées de 1/10 [2].

Les types de protection solaire pour le bâtiment :

Une bonne protection solaire doit intercepter le rayonnement incident et ne pas trop l'absorber afin d'éviter tout échauffement de la protection elle-même. Le plus souvent, ils font partie des ouvrages de maçonnerie et sont situés autour des baies vitrées que l'on désire protéger.

Le soleil est plus ou moins haut ou bas dans l'horizon selon les orientations, les heures et les saisons. Pour chaque situation, un type de protection est à privilégier. L'hiver la course solaire se fait sur un quart de tour avec un angle zénithal très bas dans l'horizon. Selon les orientations, on a donc : un rayonnement quasi vertical l'hiver, mais proche de l'horizontale l'été sur les façades sud.



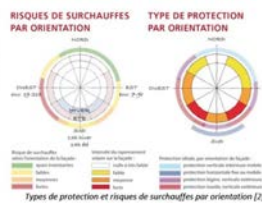
Course solaire d'été et d'hiver en Haute Garonne [2]

Les protections verticales sont idéales à l'Est et à l'Ouest, elles permettent de stopper un rayonnement de soleil bas dans l'horizon. Les protections horizontales se retrouvent sur les façades sud à plus ou moins 30°. En effet, l'été une avancée relativement faible permet de protéger les façades sur une hauteur importante, tout en permettant un réchauffement passif l'hiver.

Exemple de protections solaires :

Parmi les protections solaires fixes, on distingue : les casquettes (horizontales), les flancs (verticales), les loggias et les patios (mixtes), les brises soleil (horizontales ou verticales). Les brise-soleil peuvent être fixes ou mobiles, horizontaux ou verticaux. Leur principal avantage est d'ordre esthétique puisqu'ils peuvent être l'opportunité d'une valorisation architecturale du bâtiment. En revanche leur dimensionnement est délicat car ils atténuent la transmission lumineuse globale.

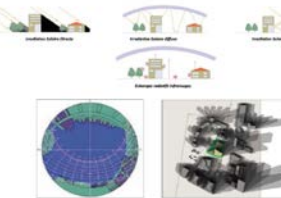
Parmi les protections solaires mobiles, on distingue : les volets, les stores extérieurs ou intérieurs (en toile ou à lames - orientables ou pas), les clausures, les panneaux coulissants... Certains de ces dispositifs peuvent se trouver à l'intérieur (où ils demandent moins d'entretien), cependant une fois que les rayons ont traversé le vitrage, un effet de serre se produit.



Types de protection et risques de surchauffes par orientation [2]

3. Impacts microclimatiques

FLUX RADIATIFS URBAINS

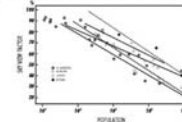


L'impact microclimatique de l'orientation des façades sur les flux solaires incidents est complexe, car il va interférer avec les irradiances solaires directes, diffusées, réfléchies et infrarouges. Cette dernière valeur varie avec l'albedo des revêtements urbains (voir fiche 11).

4. Interactions

Impacts sur la consommation énergétique :

L'impact de l'orientation des façades est en relation directe avec les ombres portées sur ces façades, mais aussi la réduction de l'angle sous lequel on voit la voûte céleste (le facteur de vue du ciel) qui aura une influence directe sur l'énergie diffuse incidente. Certains auteurs ont montré que la taille des villes et la densité humaine sont en relation directe avec ce facteur.



Interactions avec les autres variables :

- prospect
- emprise au sol.

5. Bibliographie

- [1] Steven Steemers, Sustainable Urban and Architectural Design, 2006.
- [2] Luc Adolphe, Énergétique du Bâtiment dans son Environnement, Cours EMP-SUPRE, 2000.
- [3] R. Banham, The architecture of the well-tempered environment, Chicago, 1969.

Exemple de réalisation :

L'architecte Lionel Dunet a réalisé un bâtiment de bureaux dans la baie de St Bréac. Afin de gérer la lumière et les apports solaires pour le confort de travail, l'architecte a intégré un système de protection solaire Renson. Le silicium limite l'impact de la lumière solaire sur le bâtiment et évite la surchauffe. Malgré un surcoût par rapport par rapport à une façade classique les avantages du concept sont nombreux. Le système permet de limiter la surchauffe des bâtiments pendant les mois d'été et de réduire au maximum le refroidissement artificiel. Pendant les mois d'hiver, l'utilisation d'énergie pour le chauffage est limitée car les rayons du soleil peuvent pénétrer à l'intérieur.

Bâtiment de bureaux, baie de St Bréac, Lionel Dunet

Source : http://www.lesnouvellesimages.com/produit_288

Protections solaires urbaines :

La protection solaire des espaces publics ou privés permet d'améliorer le confort des piétons en été et de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. On en trouve trois grands types :



3. Impacts microclimatiques

Les protections solaires limitent la montée en température des surfaces urbaines en bloquant une partie du rayonnement solaire et en le renvoyant directement vers l'atmosphère. Cela contribue en outre à limiter la montée en température de l'air ambiant par échange convectif avec les surfaces urbaines. Ces deux phénomènes contribuent à limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain. En contrepartie, des protections solaires fixes peuvent réduire les apports solaires en hiver, alors qu'ils sont utiles pour le confort des piétons et pour limiter les besoins de chauffage et d'éclairage des bâtiments.

Le potentiel d'action sur l'ICU par protections des façades exposées (et des parcours urbains) est important.

4. Interactions

Impact sur la consommation énergétique :

Les protections solaires bloquent une partie du rayonnement atteignant les bâtiments. Ainsi, cette réduction des apports permet de diminuer les besoins de climatisation et/ou d'améliorer le confort thermique en été. Les protections sont d'autant plus indispensables que le projet architectural contient de nombreux procédés dits passifs qui valorisent l'ensoleillement hivernal tels que les serres ou les murs capteurs.

Le taux de surface vitrée en façade ainsi que la qualité et l'utilisation de la protection solaire sont les éléments qui ont le plus d'impact sur la température intérieure l'été. Cependant, si les protections ne sont pas amovibles, cela entraîne une augmentation des besoins de chauffage en hiver. Dans tous les cas, les occultations peuvent conduire à une augmentation des besoins d'éclairage artificiel.

Interactions avec d'autres variables :

- végétation – les plantations de végétaux sous forme diverses (arbres, alignement d'arbustes, plantes grimpantes...) aux endroits appropriés, permettent d'ombrager les constructions. De plus, la plantation d'une pelouse face aux ouvertures limite la réflexion du rayonnement par le sol (le gazon absorbe 80 % du rayonnement) [2].
- capteurs solaires – vers une possibilité de combiner les capteurs et les protections solaires
- climatisation – diminution de son utilisation
- prospect – en milieu très urbanisé, le prospect et la forme urbaine participe à la création de masques solaires, d'où la non nécessité des protections solaires

Les effets négatifs induits par ce levier d'action sur l'ICU sont liés aux consommations d'énergie pour l'éclairage artificiel.

5. Bibliographie

- [1] KAZUO, "Contributions au confort d'été, Protections solaires", <http://www2.adema.fr/revue/03adema/revue/03adema>
- [2] David Wright, "Manuel d'architecture naturelle", Adéma parisiennes, 2004.

13. Ratio vitrage / Facteur solaire / Transmittance vitrage Matériaux

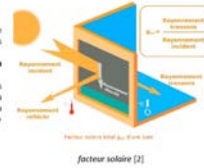
1. Généralités et définitions

Le **ratio vitrage** se définit par la surface des baies (moins la largeur des châssis) sur surface habitable.

Caractéristiques lumineuses
Lorsque la lumière visible du soleil est interceptée par une paroi, une partie de la lumière est réfléchie vers l'extérieur, une partie est absorbée par les matériaux, une partie est transmise à l'intérieur.

Le pourcentage de lumière transmise est appelé **transmission lumineuse de la paroi**, T_l (les sigles $T_{l,0}$ ou $T_{l,\infty}$ sont également employés).
L'éventuel air chaud emprisonné entre la protection solaire et le vitrage n'a pas d'impact sur la quantité de lumière transmise à l'intérieur d'un local. Dans la description des différents types de protection, on considère donc la transmission lumineuse de la protection seule et non de l'ensemble vitrage + protection.

Le facteur solaire (facteur g)
Le pourcentage total d'énergie transmise à travers d'une paroi (simple ou composée), à l'intérieur du local est appelé **facteur solaire** de la paroi. Les lettres FS.



facteur solaire [2]

2. Valeurs de référence

La transmission lumineuse et le facteur solaire [4] sont souvent liés dans le sens où un vitrage sélectif, par exemple, permet de réduire la transmission de la composante IR du rayonnement solaire au prix du placement d'une ou plusieurs couches d'oxyde métallique en surface de vitrage. Cette ou ces couches influencent la transmission lumineuse du vitrage.

Exemple (ci-dessous) de transmission lumineuse d'un simple vitrage clair + 0,9.
le facteur solaire d'un simple vitrage = 0,86.

La transmission lumineuse de la protection doit être suffisamment faible pour supprimer l'éblouissement des occupants et suffisamment élevée pour que la diminution de la quantité de lumière pénétrant à l'intérieur du local ne rende pas obligatoire l'utilisation de la lumière artificielle. La possibilité de vue de l'intérieur vers l'extérieur sera en outre souvent recherchée [3].

Éclairage recommandé :

Type d'activité	Éclairage
Travail de bureau (attention soignée).	min. 500 lux
Activité ne demandant pas une attention soignée (ex : un séminaire).	min. 200 lux
Travail sur ordinateur.	max. 1 000 lux

Tableau de l'éclairage recommandé selon le type d'activité [2]

Le choix du facteur solaire minimum à rechercher est fonction de chaque cas. Il n'est donc pas possible de citer un chiffre unique. Voici des ordres de grandeur par un exemple [5].

- Dans les immeubles de bureaux, on peut estimer qu'un refroidissement devient nécessaire en été lorsque la somme des apports internes et externes atteint **60 W/m² au sol du local**. Si on estime d'une manière générale les apports internes d'un bureau moyennement équipé comme suit : un ordinateur (= 150 W/ordinateur), une personne (70 W/person.), l'éclairage (10 W/m²) et 1 personne/13 m² au sol, les apports internes totalisent 27 W/m². Pour éviter le recours à la climatisation, il est donc nécessaire de limiter les apports solaires à 33 W/m² au sol.

- apports thermiques : le tableau suivant représente pour une journée ensoleillée du mois de juillet, la puissance énergétique maximum due à l'ensoleillement, réellement transmise à l'ambiance d'un local de 30 m² au sol, en fonction de l'inertie du bâtiment. La fenêtre du local est équipée d'un double vitrage clair (de 6 m²) orienté respectivement à l'est, au sud et à l'ouest.

	Bâtiment lourd		Bâtiment moyen		Bâtiment léger	
Est	245	49	267	53	351	70
Sud	198	40	210	42	252	50
Ouest	250	50	263	53	356	71
	W/m² de vitrage	W/m² au sol	W/m² de vitrage	W/m² au sol	W/m² de vitrage	W/m² au sol

Facteur solaire recommandé

	Bâtiment lourd		Bâtiment moyen		Bâtiment léger	
Est	0.51	0.47	0.47	0.36	0.36	0.36
Sud	0.63	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
Ouest	0.50	0.47	0.47	0.35	0.35	0.35
	FS	FS	FS	FS	FS	FS

Facteur solaire minimum de l'ensemble vitrage + protection nécessaire pour limiter les apports solaires à 33 W/m² au sol

3. Impacts microclimatiques

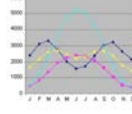
Sensibilité aux masques solaires

Toutes les conclusions tirées ci-dessus sont en partie dépendantes de la présence d'un masque solaire éventuellement créé par les bâtiments voisins. Par exemple, le bilan énergétique du dernier étage est sensiblement différent de celui du rez-de-chaussée. On peut donc imaginer que le choix du vitrage puisse évoluer en fonction de l'étage.

Influence de l'orientation de la façade

Lorsque l'apport solaire est recherché (bâtiment avec faibles apports internes), il est important de sélectionner une surface vitrée dont l'efficacité est maximale : capter un maximum d'énergie en hiver et un minimum en été [6].

La lettre indique l'orientation et le nombre est l'inclinaison. Les orientations ouest et sud-ouest correspondent approximativement aux orientations est et sud-est.



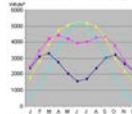
À première vue, la surface vitrée verticale orientée au sud (= 5 90) paraît très intéressante, puisque plus d'apports en mi-saison qu'en été.

À l'opposé, on trouve la surface horizontale (coupe en toiture) dont la spécificité est de capter très peu d'énergie en hiver et de provoquer de la surchauffe en été.

Les surfaces à l'est et à l'ouest (= + E 90) présentent également un bilan contraire à l'évolution des besoins du bâtiment.

Gains solaires par ciel serein en Belgique, à travers un double vitrage[5].

Influence de l'inclinaison de la façade



Ce diagramme montre l'évolution de l'énergie captée par une surface orientée au Sud en fonction de l'inclinaison [5].

Cela tend vers la limitation des surfaces vitrées horizontales (coupe, toiture d'atrium, ...) aux seuls besoins d'éclairage naturel des locaux situés en rez-de-chaussée.

4. Bibliographie

- [1] La transmission lumineuse : Définition in <http://www.energiesplus.be/index.php?id=11213>
- [2] confort thermique in http://www.texteinterieur.org/pdf/interieur_de_base.pdf
- [3] « L'éclairage naturel des bâtiments » de A. DE HERDE ET S. REITER
- [4] quelle transmission lumineuse faut-il choisir ? in <http://www.energiesplus.be/index.php?id=15429>
- [5] quel facteur solaire faut-il atteindre ? in <http://www.energiesplus.be/index.php?id=15428>
- [6] Concevoir : les fenêtres, in <http://www.energiesplus.be/index.php?id=15425>
- [7] « Guide de l'architecture bioclimatique » de M. BOGART
- [8] « L'éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment. » De M. DERIBERE

9.4. Annexe 4 : Productions graphiques Ateliers 1 et 2

9.4.1. Atelier 1



Photos Atelier 1

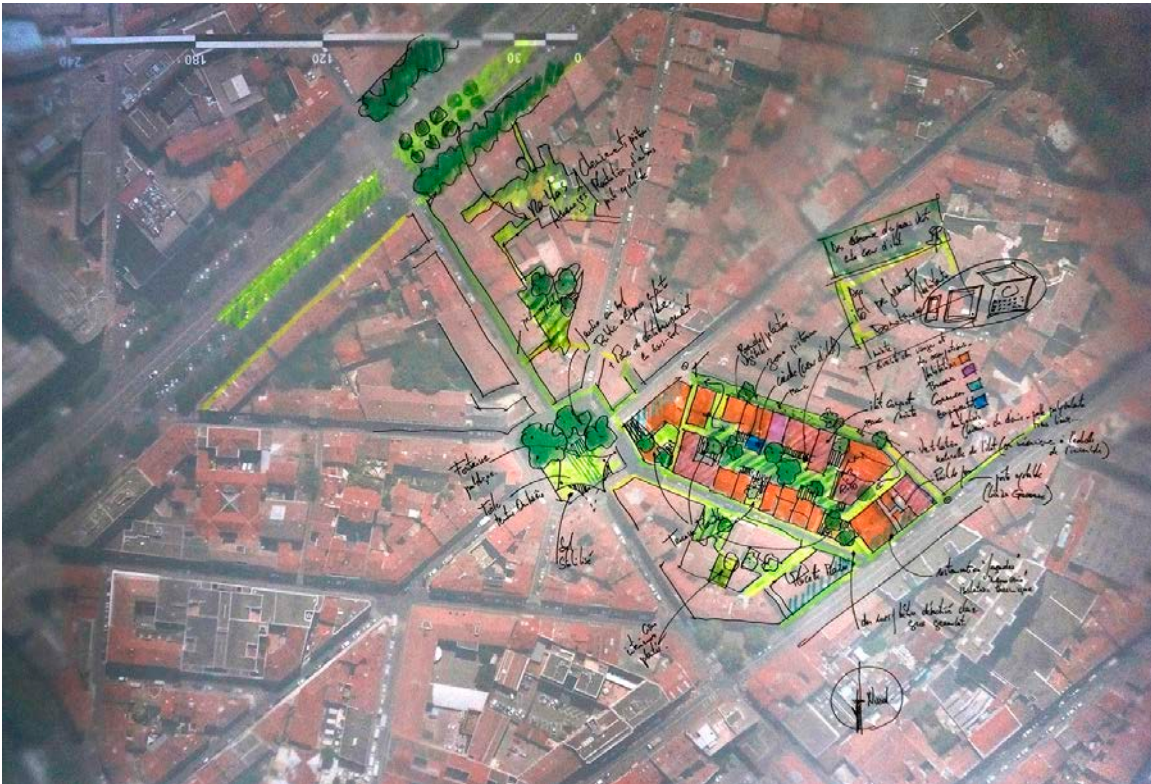


Photos Atelier 1

9.4.2. Atelier 2



Photos Atelier 2



Plan Groupe Belfort - Atelier 2



Plan Groupe Castors - Atelier 2



Plan Groupe Hers - Atelier 2

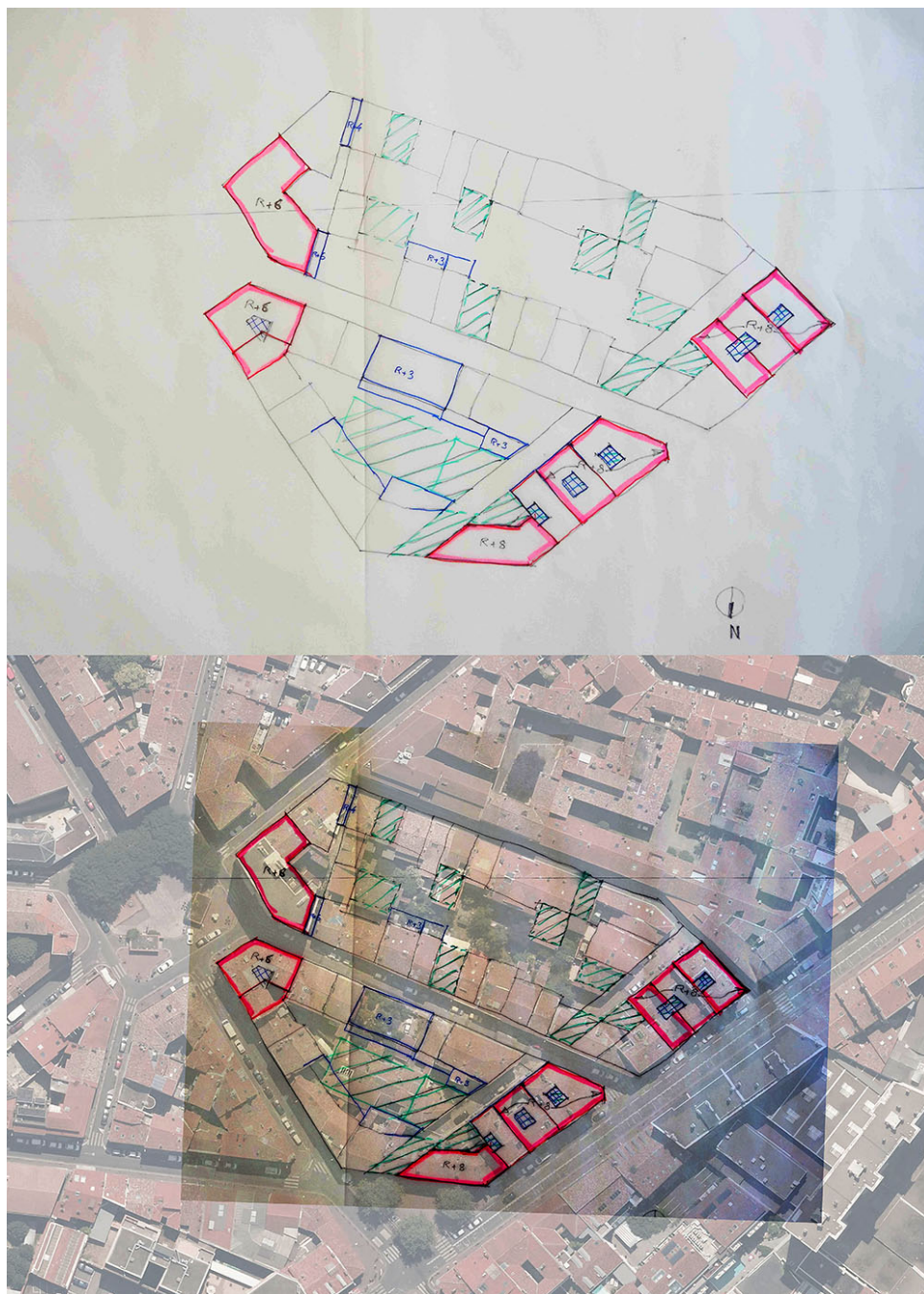
[illegible]

Tableau Groupe Belfort - Atelier 2

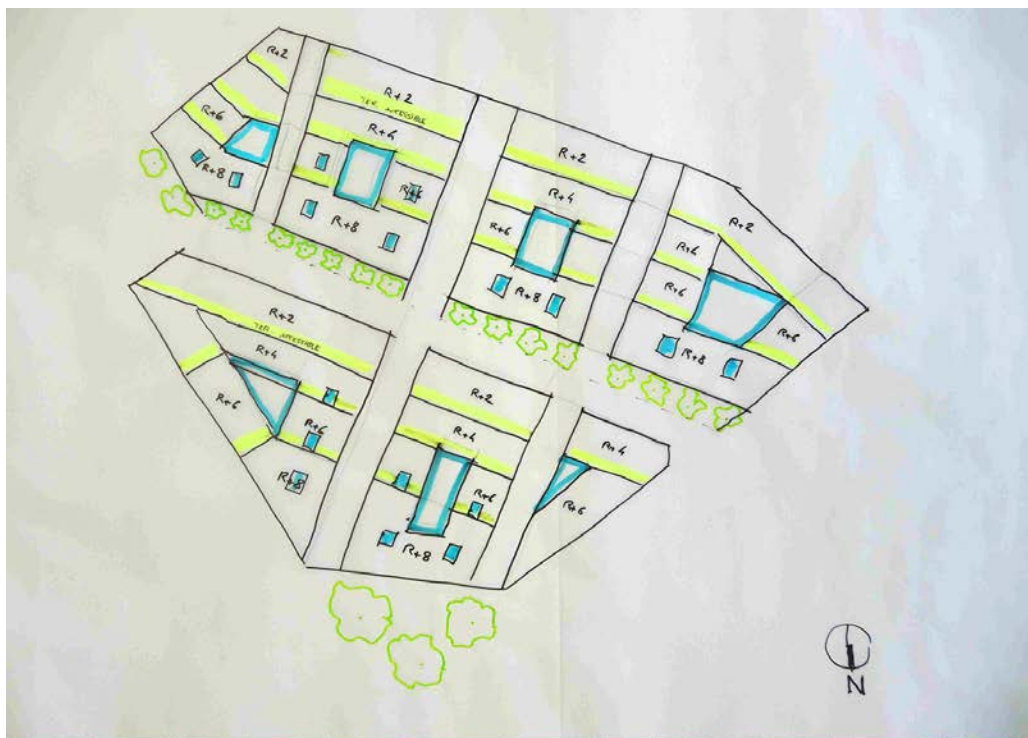
[illegible]

Tableau Groupe Castors - Atelier 2

[illegible]



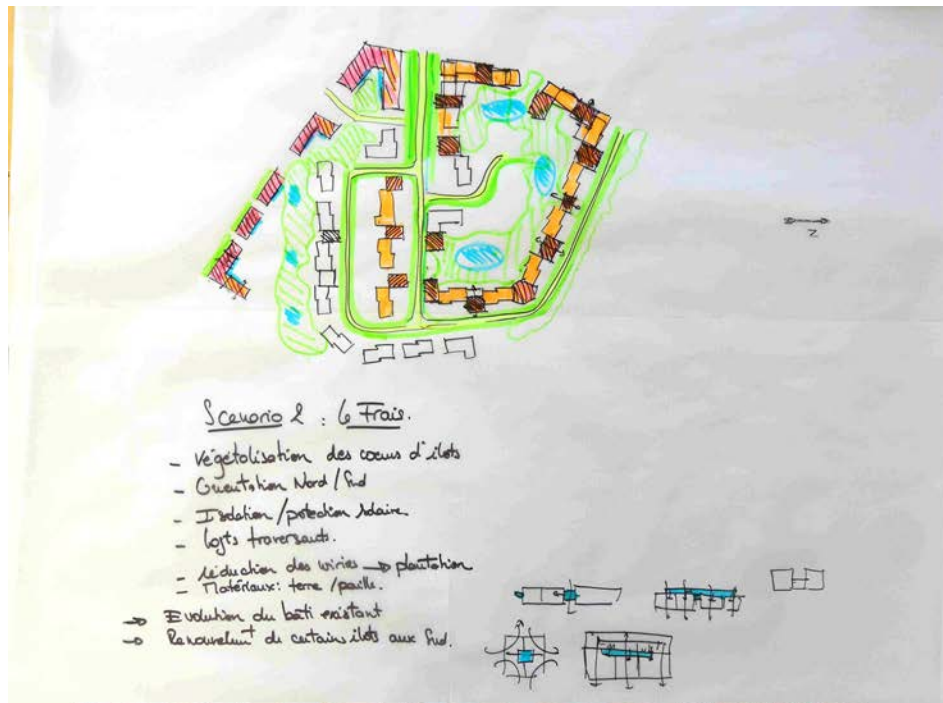
Scénario 1 - Groupe Belfort - Atelier 2



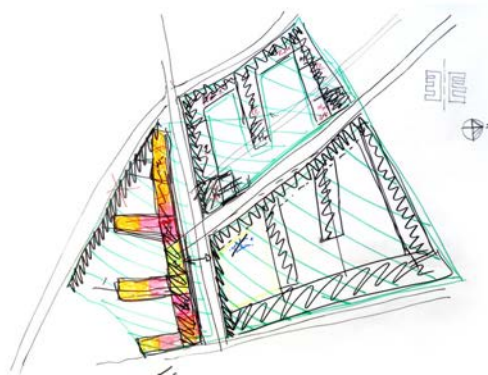
Scénario 2 - Groupe Belfort - Atelier 2



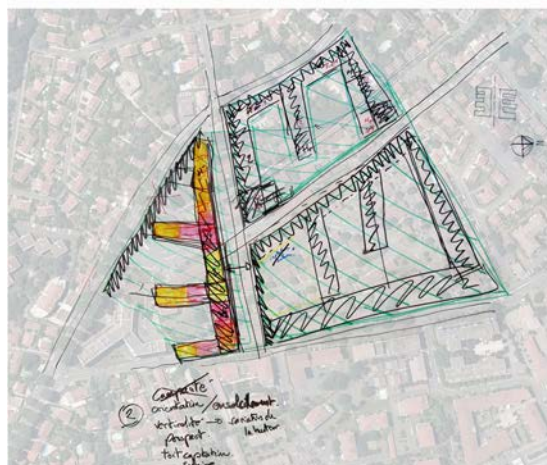
Scénario 1 - Groupe Castors - Atelier 2



Scénario 2 - Groupe Castors - Atelier 2



② *Composé*
orientation / orientation
extérieur - intérieur
projet
taille planim.
selon
très large traversants
régulation générale
cadastre en noir et blanc.



② *Composé*
orientation / orientation
extérieur - intérieur
projet
taille planim.
selon
très large traversants
régulation générale
cadastre en noir et blanc.

Scénario 2 - Groupe Hers - Atelier 2



PLEA 2017 EDINBURGH

Design to Thrive

“multipliCities” : multi-scale energy modelling of urban archetype buildings, case-study in Toulouse

Tathiane A.L. Martins¹, Serge Faraut¹ Luc Adolphe² Nathalie Tornay¹ Marion Bonhomme¹ Genevieve Bretagne³ Patrice Contart³ and Geraldine Casaux-Ginestet²

¹ LRA, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, Université Fédérale de Toulouse, Toulouse, France, email : tathiane.martins@toulouse.archi.fr;

² LMDC, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Université Fédérale de Toulouse, Toulouse, France, email : ladolphe@insa-toulouse.fr

³ AuaT, Agence d'Urbanisme et de l'Aménagement Toulouse aire métropolitaine, Toulouse, France, email : genevieve.bretagne@aua-toulouse.org

Abstract: Given the complexity of urban systems, it becomes essential to integrate different disciplines as well as to fit the different spatial and temporal scales of the urban planning in order to produce useful knowledge for planners. To face this challenge, the national French research project, called “multiplicities”, proposes a prospective contribution to support energy-based urban renewal for European cities focused on the built urban forms and their materiality at three nested spatial scales: the urban district, the building and the building envelope. In this context, this paper focus on the methodology proposed for identifying urban typology representative cases in the city of Toulouse and for evaluating the energy demand of buildings based at three nested spatial scales simultaneously: the urban district, the building and the building envelope. This methodology allows treating with various levels of details of urban typologies: from a very detailed approach for building materials to a simplified approach for the urban neighbourhood “horizon”. From a set of energy-related indicators of the urban morphology and of its materiality, three French representatives urban archetypes have provided the basis to this analytical study. A multi-scale modelling strategy is developed and integrated in an energy simulation tool. A comparative analysis of the buildings energy performance between a single scale and a multi-scale approach is drawn.

Keywords: Urban archetypes, multi-scale modelling, energy, temperate climate.

Introduction

Building is the largest energy-consuming sector in urban areas today. In France, buildings are responsible for a fraction of 46% of all final energy demand, and far more pollutant than transportation and industry (ADEME 2011). Even if civil engineering construction is a very dynamic economic sector in France (INSEE 2010), it has suffered for many years from structural weaknesses, particularly in terms of energy and environmental impacts. Over the last thirty years, the final energy consumption of urban buildings has increased by more than 20% (ADEME 2011). In this context, evaluating the potential energy demand and production of buildings at the urban scale is a crucial starting point for optimizing cities energy.

In the sustainable urban development perspective, the built morphology plays crucial role on the global energy demand of cities (Owens, 1986) (Williams, Burton, & Jenks, 2000). By urban morphology, we refer here to the complex shape, dimensions and materiality of buildings. At this scale, city configurations directly affect the indoor and outdoor climates of inhabited areas and have a direct impact on embodied energy of buildings and on their use and occupancy (Ratti, Raydan, & Steemers, 2003).

Many efforts have been made in recent decades in order to promote the energy efficiency of the built environment in many cities, but most of them have been mainly applied to the building scale. An increasing number of researches have recently tried to measure and demonstrate the impact of urban densities and different urban forms on the energy performance of buildings individually (Martins, Bonhomme, & Adolphe, 2013) (Boyeur, Inard, & Musy, 2011), and also on the local renewable energy production such solar energy (Compagnon, 2004) (Montavon, 2010) (Kampf, Montavon, Bunyesc, & Robinson, 2010). Nevertheless, an analysis of the urban morphology integrity, based on a reasoned evaluation of its different scales and levels of details on the reduction of energy demand of buildings and also the maximization of the local production of energy has not yet been further developed.

Today, the energy impact of urban configurations has been well stated in various ways. Many studies have proceeded to evaluate and compare the energy performance of different urban typologies at many different urban and climate environments (Arantes, Bucchianeri, Quenard, & Baverel, 2014) (Rode, Burdett, Robazza, & Schofield, 2014) (Martins, Adolphe, & Bastos, 2014). To do so, for instance, researchers have developed methodologies aiming at extracting homogenous representative urban typologies from different urban fabrics at the urban block or at neighbourhood scales (Rode, Burdett, Robazza, & Schofield, 2014) (Martins, Adolphe, & Bastos, 2014). Others have simplified and studied archetypal generic urban forms out of real urban landscape context (Ratti, Raydan, & Steemers, 2003) (Arantes, Bucchianeri, Quenard, & Baverel, 2014).

However, cities are complex systems composed of mixed heterogeneous geometries and textures, which induce complex climatic phenomena at various scale levels simultaneously. Though, multi-scale modelling of urban form and its wide effect in climate variables and energy demand in building is still a complex task to achieve.

To study the impact of urban form on buildings' energy and to optimise their performance, we have developed a methodological approach aiming at reasonably integrate the different levels of details in the energy modelling process of built environments. Although great progress has been made on building simulation in urban scale, energy multi-scale analysis remains a challenge (Nouvel, Kaden, Bahu, & Kampf, 2015).

Many studies have presented different methodologies out to define physical properties of spaces at different scales, but not much work can be found to date on an urban multi-scale integrated approach.

In the urban scale, we should deal with the modelling of multiple and complex urban forms. Today, 3D modelling offers an enormous technical potential but is still constrained by computational cost limits. The number of calculations increases with the number of objects to model or with more precisely facets involved. The level of details should then follow with the relevance of geographical scale.

"multipliCities" is a French national research project that searches to optimise urban built environments in the European urban landscape context in terms of potentially consumed and produced energy of buildings. The challenge of this project lies essentially in composing the optimisation problem from a multi-actor, multi-criteria and multi-scale point of view.

Objective

This paper presents a methodological approach for multi-scale modelling of urban buildings in regards to energy demand and solar potential optimisation of cities. It draws a comparison between current single-scale procedures against the proposed multi-scale modelling.

Development

To do so, three main methodological steps were taken and are thoroughly described as follows:

- a. Definition of urban building archetypes for the study city area of Toulouse, France.
- b. Characterization of the three main scales and levels of details applied to a case study in the city of Toulouse.
- c. Multi-scale evaluation of buildings energy demand through a comparison analysis.

Urban archetypes for Toulouse

There are many different ways of describing an urban archetype. Number of authors has used this concept to model and assess energy and other environment impacts as well as to predict future energy of cities at a regional scale (Lechtenböhrer & Schüring, 2010) and at the urban scale (Firth, Lomas, & Wright, 2009) (Shimoda, Fujii, & Mizuno, 2004).

At the urban block scale, Ratti, Raydan & Steemer (2003) examine environmental performance of a few generic urban archetypes, such as pavilions, slabs, terraces and courts. Arantes et al. (2013) applied six different generic urban blocks based on a density definition (number of habitat/ha) to analyse energy performance of built urban forms. Cheng et al. (2006) studied the impact of randomness in the plot layout and height of

buildings at high urban densities forms. Rode et al. (2014) created five idealised samples, based on the most generic features of the building configurations of the four biggest cities in Europe. Although the foremost interest of comparing energy performance of different geometries for a given climate, most of the cited research works does not take into account the real urban immediate and near context-related characteristics that mostly coexist with the assessed urban form or archetype of interest and that should interfere the energy analysis.

Together with the Urban Association of the Toulouse Area (auaT), an interdisciplinary methodological approach has been carried out. Urban archetypes have been defined based on four main principles: historical diversity of urban form and construction; national representativeness (so that the study could be easily transposed), local urban regulation limits and geographical situation (e.g. varied types of urban fabric). The different levels of this methodological approach allowed a better integration of the multi-scale modelling.

Eight urban archetypes have been carefully identified from different architectural periods as well as different centralities (e.g. downtown, inner suburbs, ZAC, etc.) for the city of Toulouse and that could be easily applied for the other French traditional cities (Table 71). The extension of each archetype is determined individually according to its local urban regulation limits.

Working precisely on these archetypes using various key parameters defined by our research team as well as professional urban designers will allow to link these results with other urban projects with similar parameter values.

Table 71: urban archetypes methodological approach for French cities.

Level 0 Historical period	Level 1 Major Types	Level 2 Architectural Typology	Level 3 Urban Archetypes
Housing of the 50s/60s	Individual houses	Detached houses	Discontinuous pavilions
Housing of the 30s /40s		Semi-detached houses	Semi-continuous pavilions
Market gardening (“Maraîchère”)			Continuous pavilions into open city block
Ancient / medieval downtown	Semi-collective houses	Terraced houses	Continuous pavilions into closed city block
Hausmann inner suburbs		Townhouses	Continuous building into closed city block
Housing complexes of the 60s/70s	Collective houses	Tall buildings	Vertical city blocks
		Mixed buildings	Grouped city blocks

Multi-scale modelling

In order to take into account the energy impact related to the urban form complexity of a large scale without diminishing the building archetype resolution, a reasoned multi-level multi-scale modelling is proposed. For modelling purposes, only one archetype of Toulouse will be used here: the semi-continuous pavilions into open city block “Cité Castors” (Figure 72).



Figure 72: The studied city block “cité castors” in Toulouse.

From a set of georeferenced urban data (SIG) available for most of the French cities in a 2.5D format (BD-TOPO), the urban archetype at its neighbourhood scale is extracted in a dxf format and the block scale complemented with 3D data obtained with the city administration of Toulouse (Toulouse Métropole).

Three nested scales are then determined:

- a. *The urban archetype city block* – This urban zone consists of a set of buildings presenting a remarkable homogeneity in its morphological traits. This scale should be studied in a detailed three dimensions, the building resolution. The actual dimensions of this scale can vary according to this homogeneity characterisation. At this scale, the architectural type is very important (form, period, materiality). In the case of the “Cité Castors”, few detailed parameters should be modelled: the roof slope, the openings displacement, the wall and roof composition and its users profile.
- b. *The surrounding neighbourhood* – Beyond the archetype block perimeter, a ‘buffer’ area corresponding to the nearby urban zone is created. This intermediate zone comprises varied built typologies and characterizes the neighbourhood scale. At this scale, the urban form can be sufficiently modelled in 2.5D (buildings footprint and height). The definition of the building compositions is way less detailed. The modelling hypothesis consists of asserting that most of the surrounding urban blocks impact is defined by the major obstructions and solar reflexions to the main urban scene. In the case, of the “Cité Castors”, the varied large and tall buildings are well pronounced.
- c. *City skyline* – If we zoom out of the neighbourhood of the “Cité Castors”, one may observe numerous obstacles that might as well impose a non-negligible influence to the urban scene of interest. A third and larger scale is then modelled. A second “buffer” from the centre of our archetype is defined. To obtain a good trade-off between modelling a larger urban scale and keep a low computational cost on the energy calculation, we have reasonably simplified the urban form considering its relative influence. For this, an urban horizon line has been defined. This skyline is determined by both an azimuthal angle (Φ), and the maximum height angle of far field buildings (ϑ) inside each angular step, as shown in Figure 73.

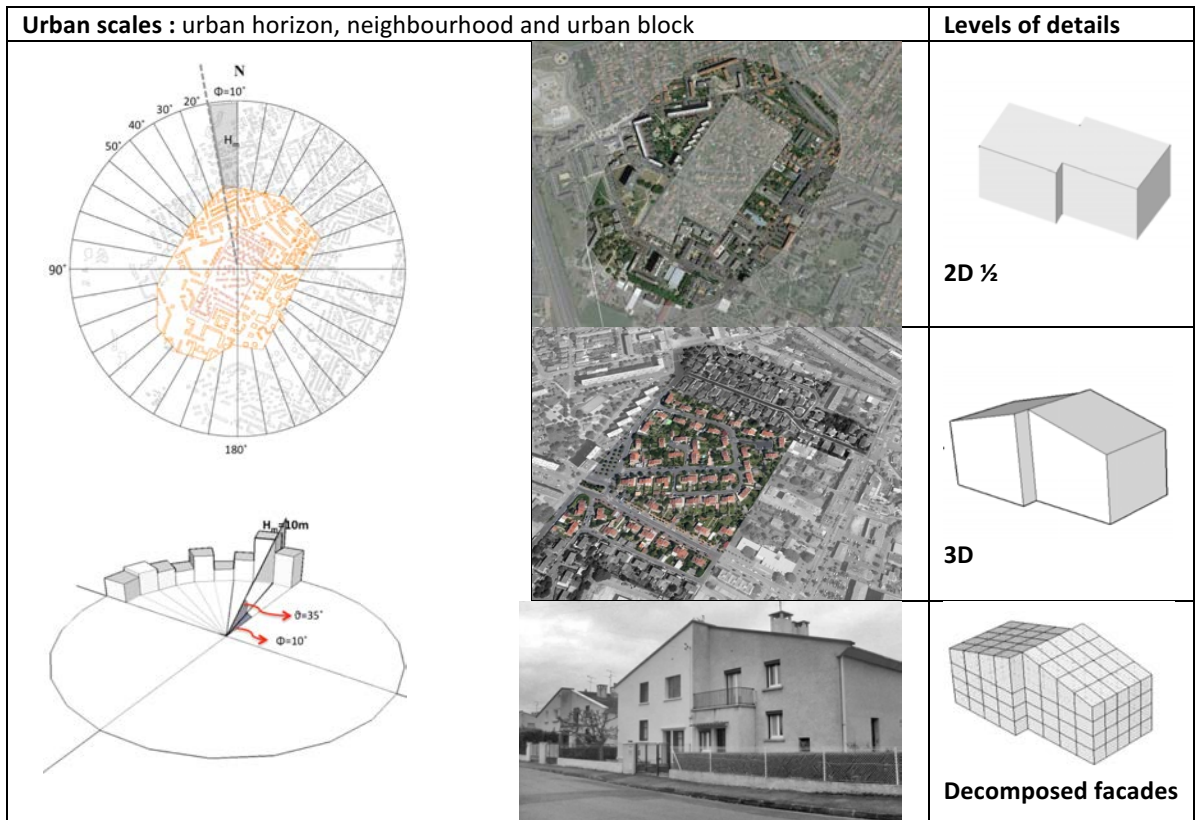


Figure 73: The three scales and levels of detail.

This multi-scale approach allows evolving the most representative urban forms reasonably and simply regarding their belonging to a particular urban fabric and their capacity to renew themselves in the future.

Similarly to the description of 3D environment engines used in video games, this multi-scale multi-level approach, allows reducing the amount of input information in simulation software, thus reducing the power required and the computation cost. This will reduce the time needed to assess urban fabrics, and their morphological-technical variants.

Multi-level energy modelling

The recent developments of computer modelling has profoundly impacted the field of urban morphology research, especially at the neighbourhood scale where significant macro scale data can be difficult to obtain and sufficient micro scale data (defining building form) becomes too compute-intensive to analyse when scaled beyond the plots of one or two buildings (Rode, Burdett, Robazza, & Schofield, 2014). With computer automation, more complex geometries could be explored and calculations could be rapidly repeated for many buildings in order to expand the analysis to the neighbourhood scale. For this to be useful, new data to feed such models is required. Many developments have also been done notably in the satellite imagery and GIS field that can be used to automatically generate extruded or “2.5D” massing models of whole cities such as the one used in this research. However, when working with urban block scale, we need to simultaneously integrate some important level of building information

(e.g. envelope shape, roof slope, openings displacement, etc.) and nearby and surrounding buildings at the neighbourhood scale that interfere with the assessed urban form but need way less detailed data.

To predict the energy demand and the solar irradiation availability on building surfaces, at a large urban scale, a simplified energy model was applied. The Citysim software (Robinson, 2011) couples together models predicting radiant energy flux reaching and emitted by any shape of building, accounting for the effects of urban obstructions in reducing direct and diffuse radiation, and contributing to reflected radiation. A nodal thermal model based on analogy with an electrical circuit (resistor-capacitor network) is considered (Robinson, 2011). Citysim is currently one of the few models that allows, on one hand, robustness on modeling the complex solar behavior in the urban district scale of hundred of buildings and, on the other, fast computer simulation.

In order to model the 2.5D and 3D geometry, Citysim allowed importing it in a regular 3DFACE dxf file. The software offers a plugin to SketchUp to create it. To enhance the 3D geometry, a new plugin that allows creating automatically decomposed facades to our 3D model is proposed here.

For the city horizon, a skyline tool support by ArcMap (ArcGIS) has been applied and the results were transposed to the far field obstruction input file of CitySim.

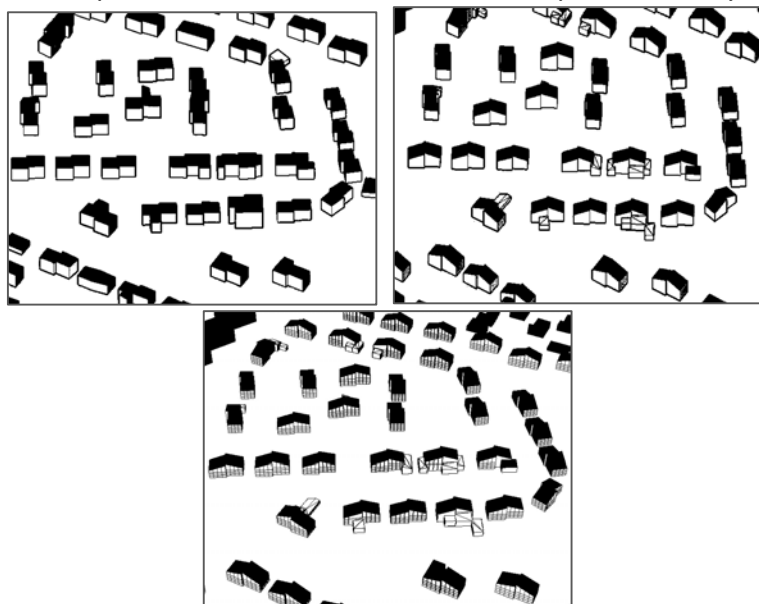


Figure 74: Three different geometry models for the urban block of “Castors City” in Toulouse.

Results

The results of various simulations using Citysim are presented below, according to three criteria: irradiation availability on building surfaces, cooling and heating demand.

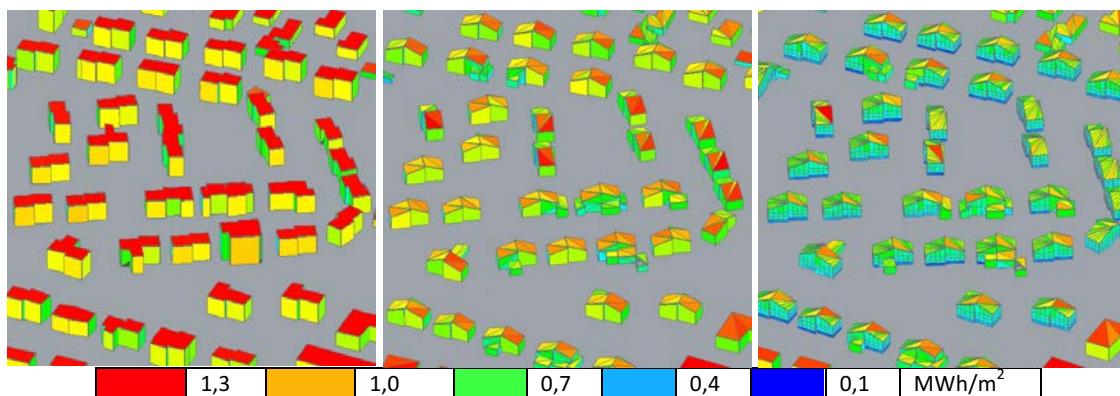


Figure 75: solar irradiation on the surfaces of the three modelled urban geometries.

For all the geometries studied, an important variation of the solar irradiation levels over facades was found, due at the same time to their orientation and to the multiple inter-reflexions between buildings. Facades with the same orientation can also have very different levels of irradiation.

By considering the proposed multi-scale multi-level approach, an improved assessment of the direct and reflected solar radiation is consequently obtained. The solar irradiation is calculated for the roof slope and for a larger number of facade patches. In addition, the shadow effects due to near and far-field obstructions of the district is also decisive. Only by adding surrounding buildings and 3D features to our city block, such as the roof slope, less 25% can be found in the irradiation levels of roofs compared to the single 2.5D scale geometry.

As one can observe in Figure 75, a single 2.5D scale of an urban environment overestimates solar potential over building surfaces compared to the multi-scale urban geometries proposed. For the third mode complex input geometry proposed, a gradient of solar potential is precisely calculated to the city block envelope of interest, which allows better sizing and allocating solar panels.

Consequently, the heating and cooling loads of these buildings in this particular city block are also largely affected. A single scale geometry evaluation underestimates in 18% the heating load and overestimate in 40% the cooling demand compared to a reasoned multi-scale configuration. This can be easily explained by two major factors: the changes observed on the incident solar radiation (reduced solar heat gain of buildings) and the displacement of windows glazing. For the 2.5D and 3D urban geometry, a glazing ratio is considered for each façade, while in the proposed approach, the multi-patched facade allows placing more precisely the glazing fraction of the wall.

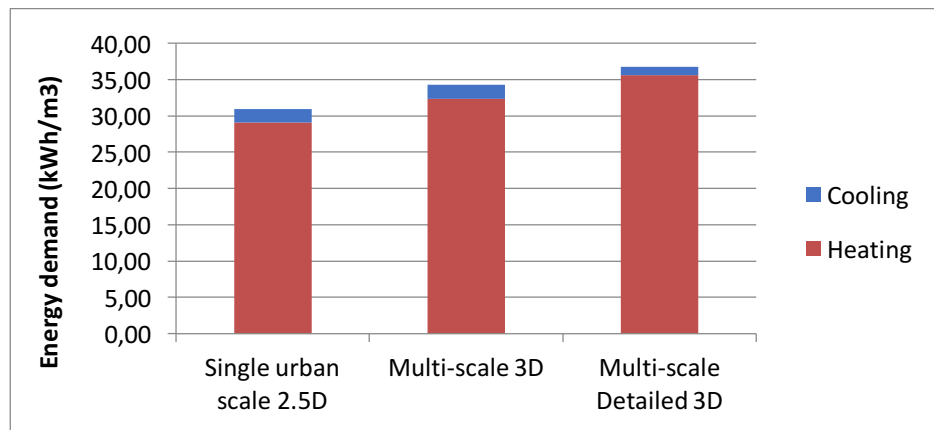


Figure 76: heating and cooling loads both the three urban geometries input.

Conclusions

Most of the urban energy analysis is based on morphological and technical simplification allowing a simplified assessment of a complex reality. In this context, this work aims to automate geometrical data entry for urban energy modelling, adapting the level of detail to the relevance of the urban scale of analysis. This allows finding a reasonable trade-off between accuracy and computational cost.

Between the single 2.5D and the multi-scale 3D model approach, we have obtained on a specific district of Toulouse, France, differences of about 20% and 40% for the heating and cooling loads, respectively, and important variations in the distribution of solar irradiation over facades.

This multi-scale multi-level approach can be of great interest for consideration in the energy balance analyses can support early and late urban design stage (feasibility analysis).

References

- Arantes, L., Bucchianeri, X., Quenard, D., & Baverel, O. (2014). Étude énergétique d'une conception rationalisée de la façade : le concept Core-Skin-Shell. *IBPSA*. Arras-FR: Université d'Artois.
- Boyeur, J., Inard, C., & Musy, M. (2011). Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *ENergy and Buildings*, 43, 1549-1559.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban form, density and solar potential. *PLEA* (p. 10). Geneva: University of Geneva.
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36, 321-328.
- Firth, S., Lomas, K., & Wright, A. (2009). Investigating CO2 emission reductions in existing urban housing using a community domestic energy model,. *Building Simulation* , (p. 7). Gasglow.

- Kampf, J., Montavon, M., Bunyesc, J., & Robinson, D. (2010). Optimisation of buildings solar irradiation availability. *Renewable Energy*, 596-603.
- Lechtenböhrer, S., & Schüring, A. (2010). The potential for large-scale savings from insulating residential buildings in the EU. *Springer Science+Business Media*, 1-14.
- Martins, T., Adolphe, L., & Bastos, L. (2014). DOE sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar irradiation on buildings envelope in the Brazilian tropical context. *PLEA* (pp. 1-8). Ahmedabad: CEPT University.
- Martins, T., Bonhomme, M., & Adolphe, L. (2013). Análise do impacto da morfologia na demande estimada de energia das edificações: estudo de caso na cidade de Maceió-AL. *Ambiente Construído (online)*.
- Montavon, M. (2010). *Optimisation of urban form by the evaluation of the solar potential*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, PHD Thesis. Lausanne: EPFL.
- Nouvel, R., Kaden, R., Bahu, J.-M., & Kampf, J. e. (2015). Genesis of the CityGML Energy ADE. *CISBAT* (pp. 1-10). Laussane: EPFL.
- Owens, S. (1986). *Energy, Planning and Urban Form*. London: Pion.
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building Form and Environmental Performance: archetypes, analysis and arid climate. *Energy and Buildings*, 49-59.
- Robinson, D. (2011). *Computer modelling for sustainable urban design*. London, UK: Earthscan.
- Rode, P., Burdett, R., Robazza, G., & Schofield, J. (2014). *City and Energy: Urban morphology and heat energy demand*. The London School of Economics and Political Science. London: LSECities / EIFER.
- Shimoda, Y., Fujii, T., & Mizuno, M. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, 959-967.
- Williams, K., Burton, E., & Jenks, M. (2000). *Achieving Sustainable Urban Form*. London, UK: E&FN Spon.

9.6. Annexe 6 : Comptes rendus des réunions Multiplicités sur l'année 2

9.6.1. CR réunion du 11 Octobre 2016

RAPPORT INTERMEDIAIRE

Exhaustif, pédagogique : s'en servir « modestement » lors de l'atelier participatif, notamment grâce à une plaquette synthétique (un A4 plié en 2 pages RV) (Nathalie- Tathiane)

ATELIERS PARTICIPATIFS

Atelier Capacités présenté. A retenir pour notre projet : aspect ludique- jeux et jeux de rôles, mettre les participants dans l'action, enregistrer tout (vidéo, dessins, textes, post-it...), regrouper l'ensemble des participants en 3 groupes de cinq personnes travaillant sur le même projet...

PRINCIPES RETENUS :

2 ateliers séparés de quelques mois avec un même public d'une quinzaine de personnes d'horizons variées (voir PUBLIC).

Premier Atelier PRODUCTION DE PROJETS URBAINS :

Dates retenues : Jeudi 24 Novembre ou 1^{er} Décembre : selon disponibilités grande salle auaT – Geneviève)

Durée : une longue matinée + repas pris en commun.

Scénario retenu :

1. Plénière introductive (1/2h) : présentation du projet (avec plaquette), présentation des concepts sous-jacents, sous forme de jeux- quizz, présentation de l'atelier.
2. Répartition en 3 groupes mixtes de 5 personnes travaillant tous sur un même archétype urbain localisé et son évolutivité, en 3 étapes (2h) :
 - a. Définition par chaque groupe d'une hiérarchie d'enjeux fondamentaux liés à l'évolutivité « réaliste » de l'archétype (par exemple, énergie, cohérence aménagement- transport, accueil population, respect histoire du quartier ...). Notre équipe pourra en suggérer certains, l'énergie est un enjeu « obligatoire ».
 - b. Définition par chaque groupe d'orientations fondamentales (par exemple, évolution des matériaux ou de la forme urbaine, génération de l'hétérogénéité, évolution par taille de parcelle...),
 - c. Définition par chaque groupe d'actions fondamentales permettant l'évolutivité de l'archétype.
3. Restitutions flash en plénière (1/2h) par un(e) représentant(e) de chaque groupe du travail.
4. Repas pris en commun (plateau repas).

La production de « matière » sera accompagnée par un ensemble de données/ connaissances disponibles (rapport 1, simulation énergétique de l'archétype, à compléter par tous).

Des plans, calques, feutres, post-it seront disponibles (à compléter par tous).

L'ensemble du travail des ateliers sera enregistré (vidéo). Voir matériel disponible à l'ENSA (Nathalie, Maja)

Second Atelier EVALUATION DES PROJETS URBAINS :

Dates retenues : Jeudi 23 Février ou 2 Mars: (Trouver une salle en ville – tous).

Durée : deux heures en soirée + Apéritif.

Scénario retenu :

Introduction (1/4h)

Présentation à l'ensemble du groupe des trois variantes modélisées et évaluées énergétiquement (1/2h)
Organisation d'une évaluation des trois projets, type jury de concours d'architecture /urbanisme (1h)
Réflexion sur les enjeux les plus pertinents, les indicateurs associés, et leur pondération.
Conclusion (1/4h)
Apéritif pris sur place

PUBLIC

Public varié : aménageurs, promoteurs, bailleurs sociaux, BET, archis, pas d'élus mais services techniques.
Commencer à les contacter par téléphone, rapidement, puis leur passer par mail la plaquette dans un second temps (**tous**).
Première liste proposée par Patrice et à compléter (notamment avec membres ateliers Capacités (**Maja**) et réseau ENSA (**voir Anne Péré...**). Il faudrait 60 noms pour en retenir 15 :

Architectes travaillant à l'échelle urbaine : Alain Grimat- GGR ; Jean-François Marty, Stéphane Jacq-ARUA + Luc Neples
Urbanistes Erwan Marin - COT, Pierre Roca D'Huiteza, D'une Ville à l'Autre, Franck Hullard – Interland, Jean Pierre Hegoburu
CAUE : Françoise Favarel (31), CAUE 11 ?, Philippe Labaume - Union Régionale des CAUE.
Toulouse Métropole : Daniel Poulou, Vincent Toulza, Loïc Colas
OPPIDEA : Denis Depuis, Valérie Garrigue, Céline Gislar, Hélène Vandembavière
Promoteurs : Anne Roche – VINCI, Jean Macau- ADN Promotion, Stéphanie Aubay – Green City,
Bailleurs Sociaux : Pierre Marchal- Les Chalets, Sabine Veniel Le Navenec- USH
BET Environnement : Cécile Mapeu – Ecologie Urbaine, HOLISUD ?, IDE Environnement ?, Ectare ?
auaT : Jérôme Ionesco, Florence Garros

PUBLI

Préparer une publication sur première partie Archétype (**Nathalie-Tathiane**)

CONTACTS

A prendre rapidement :
Contact CEREMA - Dominique Hebrard (**Serge**)
Contact ONERA (**Luc**).

ORGANISATION DU PREMIER ATELIER

Plaquette

Disponible à l'adresse (http://www.aua-toulouse.org/sites/www.aua-toulouse.org/IMG/pdf/multiplicite_s-atelier-24_nov_2016-2.pdf).

Publicité

Site auaT (<http://www.fnau.org/fr/event/atelier-participatif-production-de-projets-urbains-le-24-novembre-2016/>)

News Letter auaT de Novembre.

Public

Liste jointe de personnes contactés par Patrice et Geneviève. Retour Anne Péré, Christophe Sonnendruker, Jean Pierre Hegoburu (**Luc**). Refaire un tour de piste pour confirmer les présents et motiver les hésitants (**Patrice**).

Architectes : Alain Grimat- GGR ; Jean-François Marty, Stéphane Jacq- ARUA

Urbanistes Erwan Marin - COT, **Pierre Roca D'Huiteza (Luc)**, Hervé Ambal, Thersile Dufaud, David Rupp- AR357, **Jean Pierre Hegoburu (Luc)**

CAUE : Françoise Favarel (31), Renaud Barres (11).

Toulouse Métropole : Samuel Roux, Edith Raillard.

OPPIEDA : Valérie Garrigue

Promoteurs : Jean Macau- ADN Promotion

BET Environnement : Cécile Mapeu – Ecologie Urbaine, **Alain Castells –ADDENDA (Luc)**

auaT : Florence Garros, Adeline Reilé, Agnès Domingo.

CerCAD : Pauline Lefort

Timing retenu :

1. Plénière introductive (1/2h) :

- présentation du projet et de l'atelier (**Luc**),
- présentation des îlots retenus (démarche – les 14 archétypes – les 3 îlots retenus à Toulouse – **Nathalie**)
- présentation des simulations énergétiques de 3 îlots Toulousains : Bagatelle/Castors, Belfort et Château de l'Hers (descriptif urbain/morpho+ tableau présentant les performances énergétiques hiver, été et l'ensoleillement sur les toitures , ainsi qu'une liste hiérarchisée d'indicateurs typo-morpho-énergétiques retenus – voir liste jointe- **Tathiane**).

* Liste indicative d'indicateurs proposés :

Matérialité : albédo (parois et sol), isolation, % Vitrage, orientation, facteur solaire, transmittance, capacité thermique...

Bâtiment : Pente toiture, orientation des façades principales, hauteur, profondeur, prospect, largeur de rue, protection solaire...

Formes urbaines : COS, Ces, compacité, contiguïté, densité humaine, taille parcelle, emprise espaces verts, qualité espace public... (**à amender- compléter par tous**)

2. Répartition en 3 groupes mixtes de 5 personnes (plan de table déjà effectué et quartier imposé à chaque groupe – **Geneviève-Patrice**), travaillant chacun sur un archétype urbain et son évolutivité, en 3 étapes (2h).

Etapas du travail:

- ½ h: Choix / hiérarchisation des enjeux et indicateurs énergétiques auxquels doit répondre le projet de renouvellement urbain, de manière générique (avant d'attaquer le quartier), à partir du grand tableau vierge fourni, tableau constitué de 4 colonnes Enjeux (1. Energie/ 2. Social / 3. Economie / 4. Politique), et de lignes correspondant aux indicateurs énergétiques. Quels sont les paramètres les plus significatifs d'un renouvellement énergétique? Quel degré de variation/liberté sur les indicateurs les plus importants ? Quels liens avec enjeux autres qu'énergétiques (sociaux, économiques, politiques) ?
- 1h1/4 : Production par le groupe d'un projet de renouvellement énergétique du quartier (niveau faisabilité) : réponses en terme de : gabarit/ principes volumétriques, principe de façades, choix matériaux, espace public/ espace vert... Discussion sur les différentes échelles d'intervention retenues et leur emboîtement (important pour le rendu final ADEME, en regard du prochain appel d'offres MODEVAL et de leurs attentes par rapport à notre projet !). A quels autres enjeux répond le mieux votre projet ? Un certain nombre de règles initiales pourraient être proposées (hauteur maximum sablière...).
- 1/4h : présentation aux autres groupes par un rapporteur

3. Repas (plateaux-repas pris sur place).

Matériel fourni à chaque groupe (**Luc** a réservé à l'ENSA):

- papeterie : calques de travail, feutres, post-it, feuilles A3, paperboard (**auaT**)
- un ordinateur avec Sketch-up installé et la maquette 2D1/2 du quartier (**Serge**),
- un plan au 2500^{ème} (A0 ?) du quartier (**Tathiane, Serge**)
- un tableau d'analyse de la performance énergétique et des indicateurs présentés en introduction (Tathiane, Nathalie)
- un grand tableau vierge A0, croisant enjeux et indicateurs et permettant choix, hiérarchisation , liens avec autres enjeux (**Nathalie, Tathiane**),
- autre : café, viennoiserie...

Chaque groupe est filmé et enregistré. Chaque groupe est encadré par une animatrice (ou animateur) et un(e) secrétaire.

Ordre du jour

- 1) Discussion sur les trois tableaux d'indicateurs correspondants aux trois étapes de diagnostic, prospective, et analyse multicritères (voir fichiers excel joints)
- 2) Discussion sur les résultats des simulations pour les trois scénarios proposés lors du premier atelier participatif. Quels autres scénarii possibles? (voir page 2)
- 3) Définition dates, programme et partage des rôles pour le deuxième atelier participatif. (voir ci-dessous)

POINT 1) Trois tableaux d'indicateurs diagnostic, prospective, et analyse multicritères

Tableau 1 : Tableaux diagnostics des trois quartiers à partir des indicateurs type morphologiques

Echelle	Indicateurs Type-morphologiques	Intensité contextuelle sur le terrain	Perforance contextuelle (Régionale)	Perforance contextuelle (Régionale)	Capacité à évoluer (Duo/Trio) (Forme/Régionale/Faible)
CONTEXTE	Coefficient de l'environnement				
	Coefficient de perméabilité urbaine				
	Intensité automobile				
	Intensité publique				
	Accessibilité aux aménités urbaines				
SOL	Fonctions urbaines				
	Accessibilité aux espaces verts				
	Présence de nuisances sonores				
	Liberté	0.15	0.25	0.25	
	Occupation / affectation du sol				
FORME URBAINE	Densité des espaces verts				
	Emploi par fonction urbaine				
	Densité				
	Ratio espace public / espace privé				
	COV	3.7	0.35	0.60	
BÂTIMENT	COV	0.65	0.17	0.29	
	Compacité	3	5	6	
	Centricité	1	0	0	
	Densité humaine	812	715	715	
	Taille parcelle (m) / Fragmentation	314	1739	9747	
ENVELOPPE	Emploi espace vert (m)	0	0	0	
	Emploi espace (m) / perméabilité	0	0	0	
	Profil	2.1	0.6	1.2	
	Longueur rue (m)	0	10	10	
	Cohésion / hauteur (m)	17	6	9	
BÂTIMENT	Forme type hauteur (m)	3	2	2	
	Régence				
	Intensité				
	Personne				
	Densité perso				
ENVELOPPE	Ratio espace public / espace privé				
	Ratio logements / propriétaires				
	Taux de stationnement				
	Forme (personne)				
	Forme de toiture / végétation urbaine				
BÂTIMENT	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				
	Profil de occupation				
ENVELOPPE	Forme de toiture / végétation urbaine				
	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				
BÂTIMENT	Forme de toiture / végétation urbaine				
	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				
ENVELOPPE	Forme de toiture / végétation urbaine				
	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				

Quels indicateurs retenir ? Quels intervalles ? Quels scénarios ?

Tableau 2 : Indicateurs type-morphologiques et les intervalles de variation pour l'étude prospective des trois quartiers

Echelle	Indicateurs Type-morphologiques	Intensité contextuelle sur le terrain	Perforance contextuelle (Régionale)	Perforance contextuelle (Régionale)	Capacité à évoluer (Duo/Trio) (Forme/Régionale/Faible)
CONTEXTE	Coefficient de l'environnement				
	Coefficient de perméabilité urbaine				
	Intensité automobile				
	Intensité publique				
	Accessibilité aux aménités urbaines				
SOL	Fonctions urbaines				
	Accessibilité aux espaces verts				
	Présence de nuisances sonores				
	Liberté	0.15 - 0.30	0.25 - 0.40	0.25 - 0.40	
	Occupation / affectation du sol				
FORME URBAINE	Densité des espaces verts				
	Emploi par fonction urbaine				
	Densité				
	Ratio espace public / espace privé				
	COV	3.7	0.35	0.60	
BÂTIMENT	COV	0.65	0.17	0.29	
	Compacité	3	5	6	
	Centricité	1	0	0	
	Densité humaine	812	715	715	
	Taille parcelle (m) / Fragmentation	314	1739	9747	
ENVELOPPE	Emploi espace vert (m)	0	0	0	
	Emploi espace (m) / perméabilité	0	0	0	
	Profil	2.1	0.6	1.2	
	Longueur rue (m)	0	10	10	
	Cohésion / hauteur (m)	17	6	9	
BÂTIMENT	Forme type hauteur (m)	3	2	2	
	Régence				
	Intensité				
	Personne				
	Densité perso				
ENVELOPPE	Ratio espace public / espace privé				
	Ratio logements / propriétaires				
	Taux de stationnement				
	Forme (personne)				
	Forme de toiture / végétation urbaine				
BÂTIMENT	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				
	Profil de occupation				
ENVELOPPE	Forme de toiture / végétation urbaine				
	Orientation façade				
	Longueur				
	Profondeur				
	Profil de occupation				

Quels indicateurs retenir ? Quels intervalles ? Quels scénarios ?

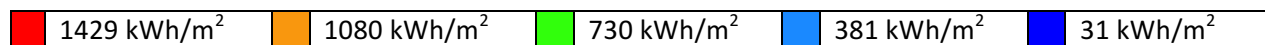
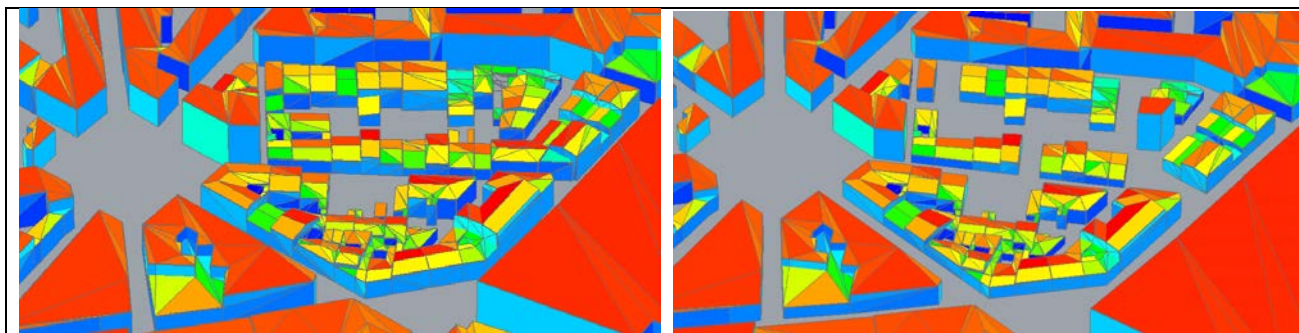


Figure 3 : irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Belfort.

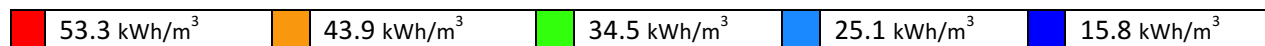
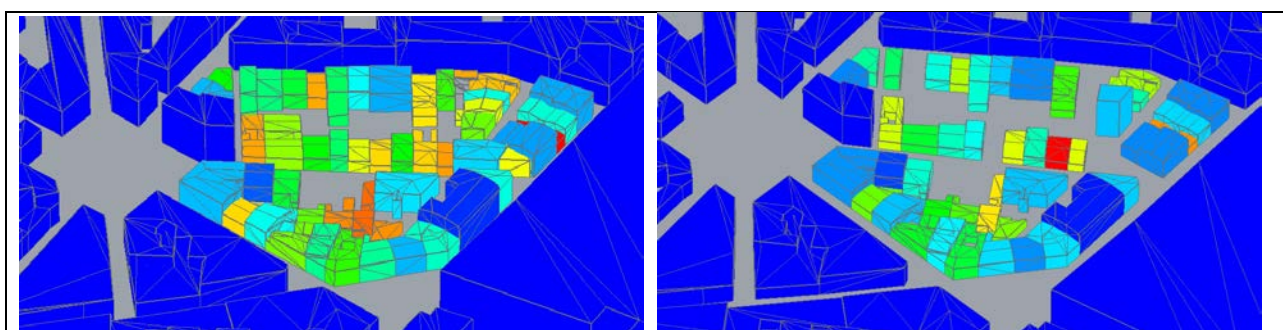


Figure 4 : besoins de chauffage par unité de volume bâti par an pour l'îlot Belfort.

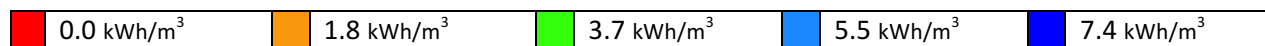
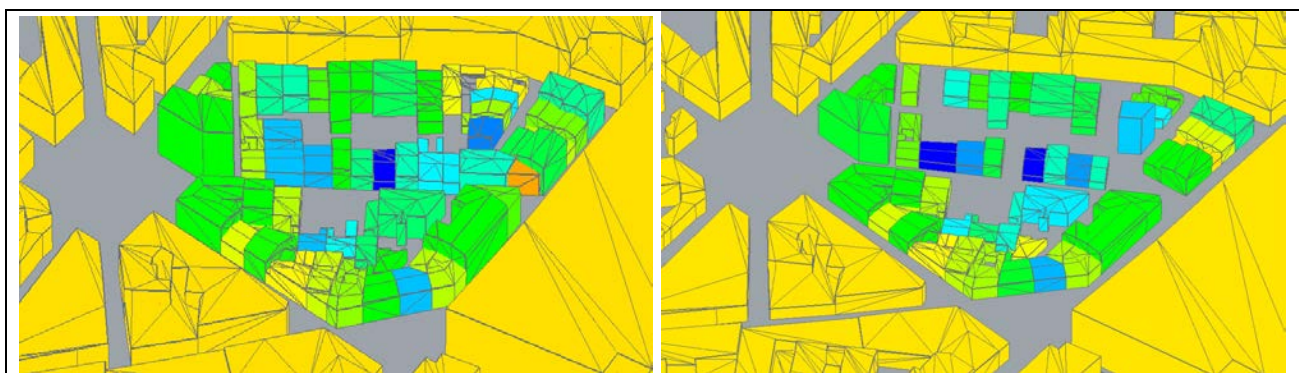


Figure 5 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Belfort.

2) CASTORS

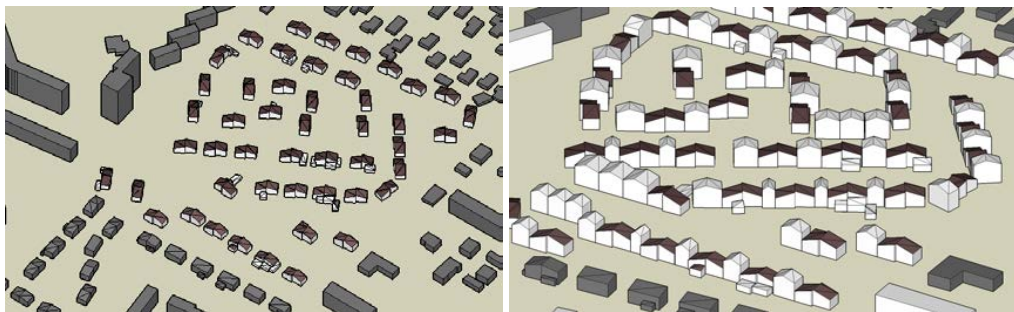


Figure 6 : morphologie pour l'îlot Castors existant (à gauche) et pour l'îlot Castors proposé par les aménageurs (à droite).



Figure 7 : schémas du scénario proposé pour l'îlot Castors (issus de l'atelier participatif I).

Synthèse des changements apportés :

Indicateurs typo-morphologiques	Existant	Scénario I
COS	0.35	
CES	0.12	0.20
Des bâtiments R+2 ont été ajoutés entre deux maisons jumelées. La composition des murs parpaing + isolant intérieur a été conservée.		

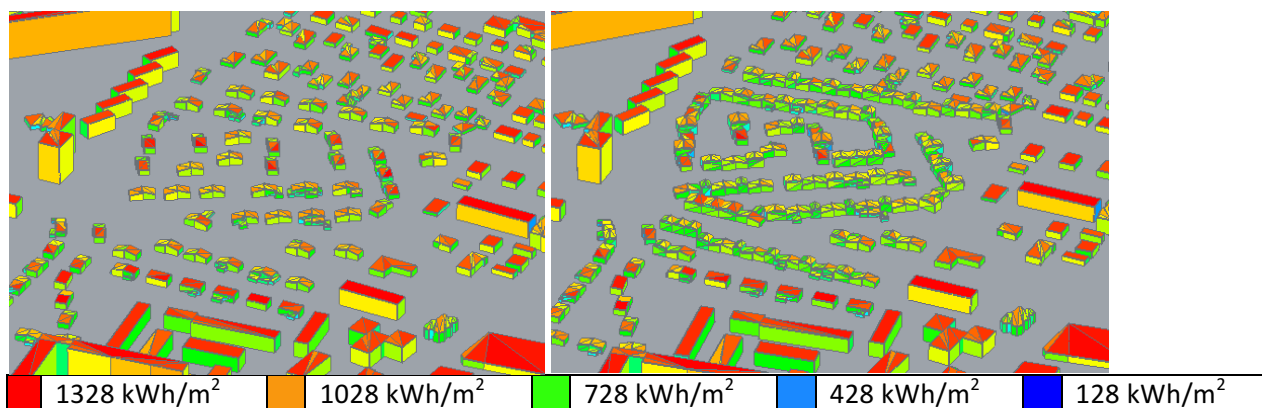


Figure 8 : irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Castors.

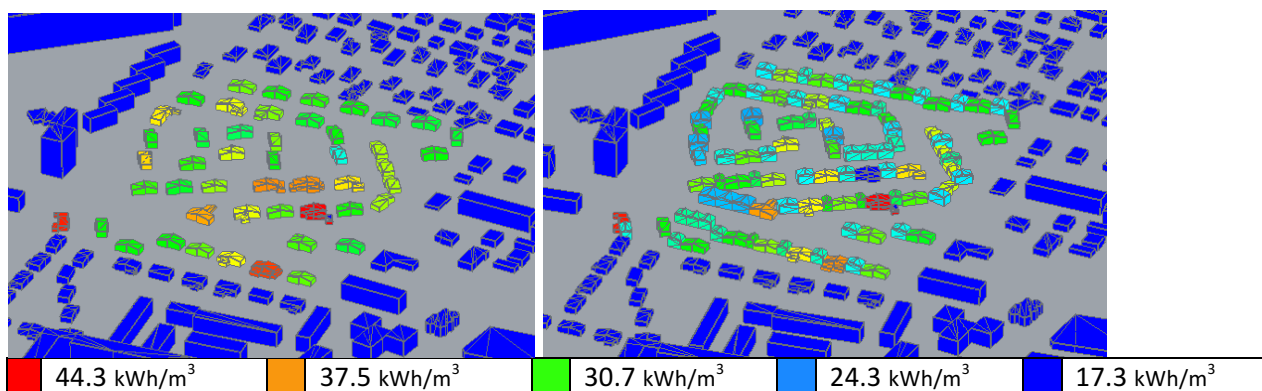


Figure 9 : besoins de chauffage par unité de volume bâti par an pour l'îlot Castors.

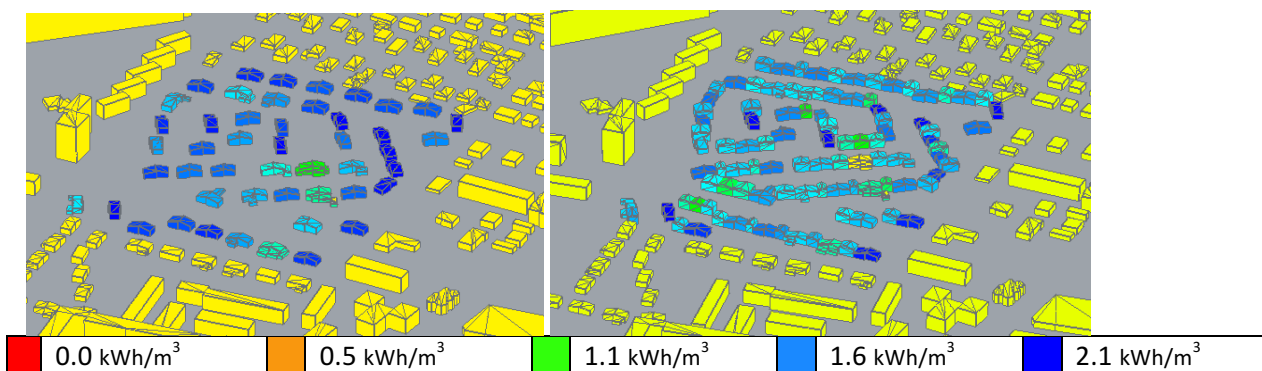


Figure 10 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Castors.

3) HERS

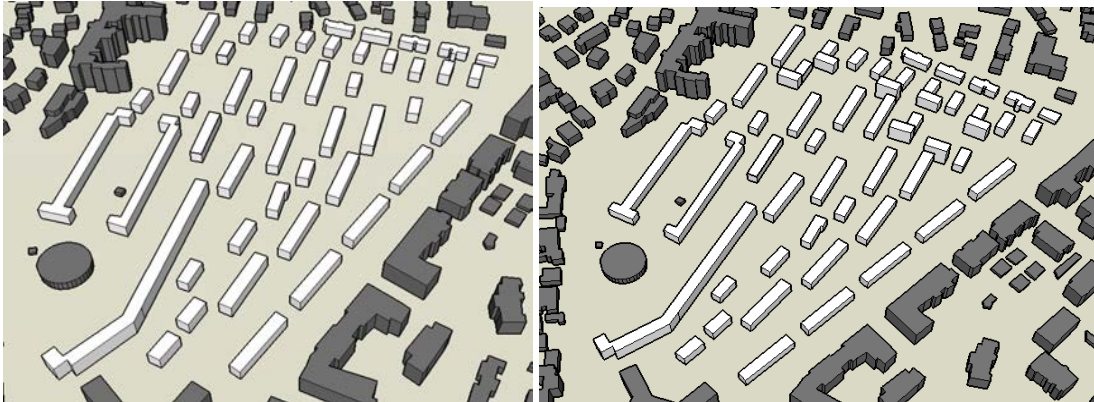


Figure 11 : morphologie pour l'îlot Hers existant (à gauche) et pour l'îlot Hers proposé par les aménageurs, le scénario 1(à droite).

Synthèse des changements apportés :

Indicateurs typo-morphologiques	Existant	Scénario I
COS	0.60	
CES	0.20	
Des bâtiments tertiaires R+3 et R+4 ont été ajoutés perpendiculaires et bord de certains barres résidentielles existantes. La composition des enveloppes a été modifiée. L'isolant a été placé à l'extérieur.		

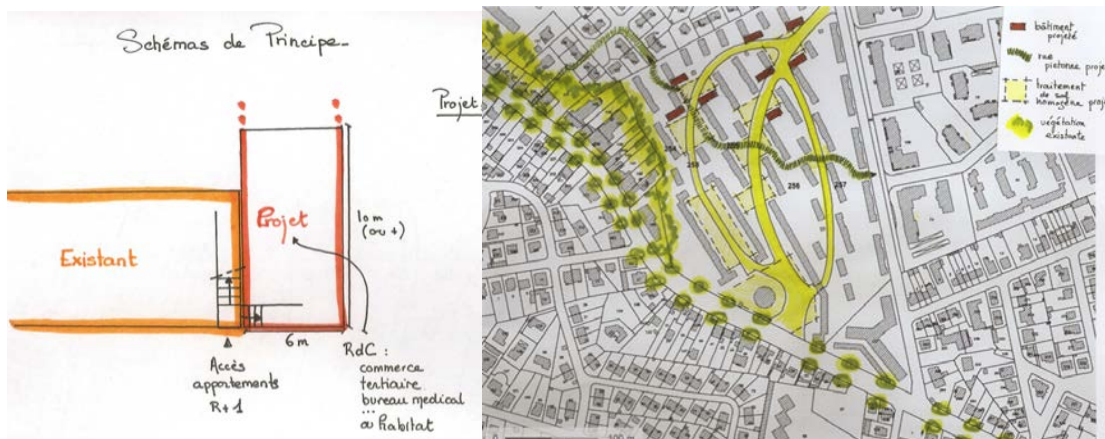


Figure 12 : schémas du scénario proposé pour l'îlot Hers (issus de l'atelier participatif I).

Evaluation énergétique pour l'îlot Hers :

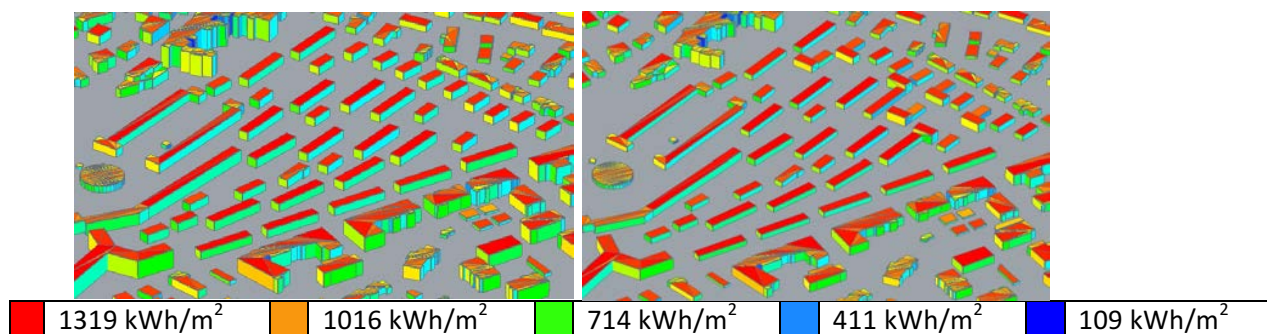


Figure 13 : irradiation solaire sur les surfaces bâties de l'îlot Hers.

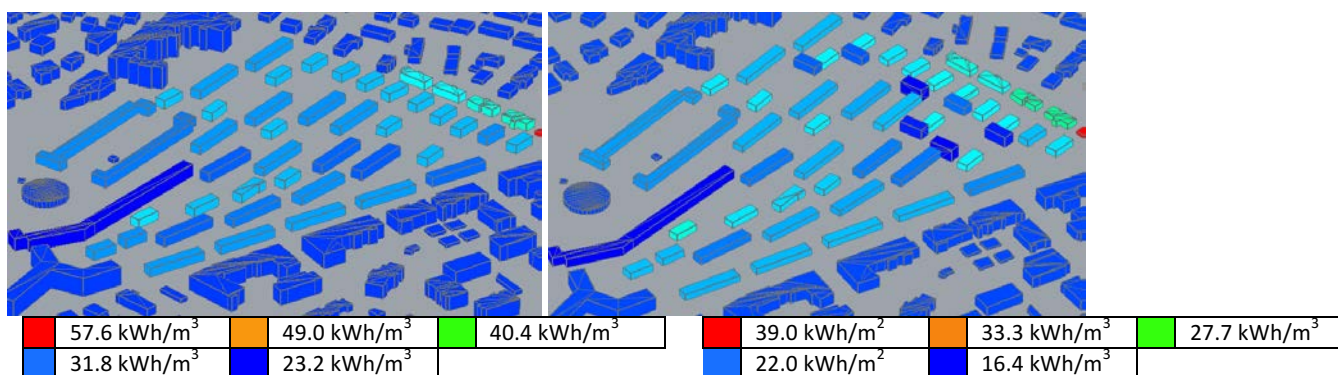


Figure 14 : besoins de chauffage par unité de volume bâti par an pour l'îlot Hers.

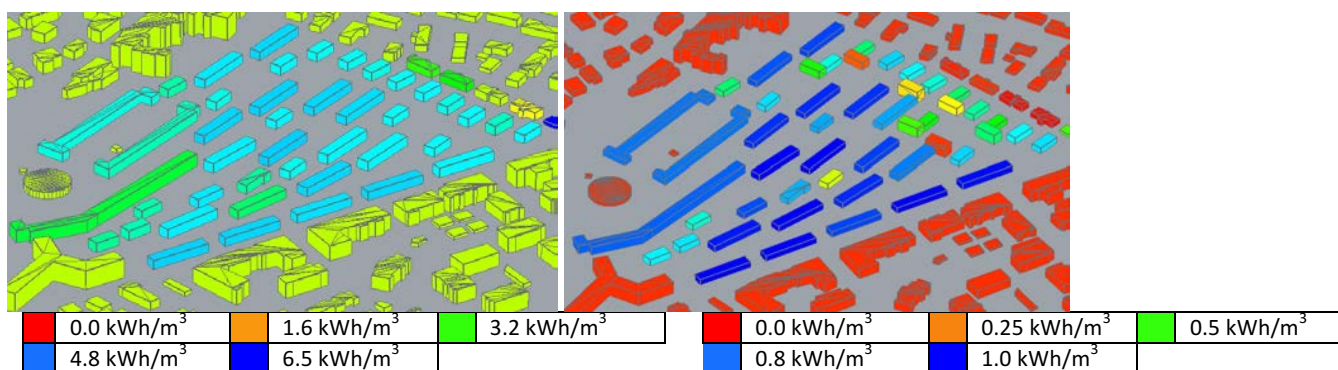


Figure 15 : besoins de refroidissement par unité de volume bâti par an pour l'îlot Hers.

Données pour l'analyse comparative :

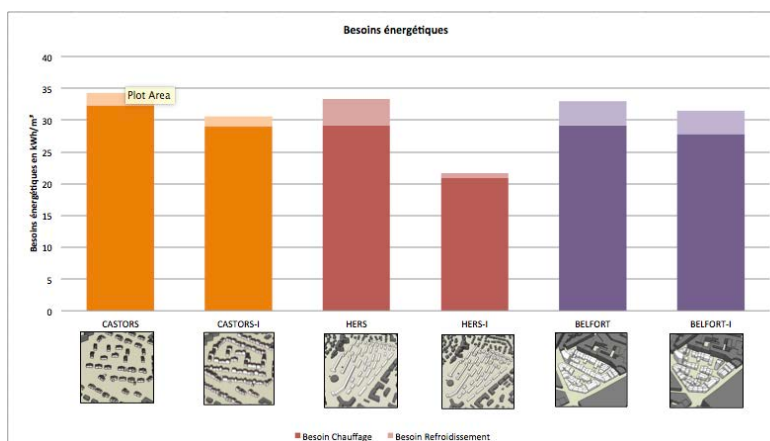


Figure 16 : besoins énergétiques pour les trois îlots de référence existants et les trois scénarios proposés.

Point 3) Propositions pour le deuxième atelier :

Objectif : définir intervalles de variations réelles afin de faire évoluer chacun des archétypes (phase d'optimisation).

Méthode : A partir d'une liste d'indicateurs/thèmes pré-hiérarchisés pour leur pertinence vis-à-vis des critères énergétiques (issus de l'analyse de sensibilité), chaque groupe de travail sera amené à produire (à partir de dessins, croquis, phrases, etc.) des scénarios pour leurs quartiers en fonction de chaque thématique.

Exemples de thèmes/indicateurs : quartier compact (compacité), quartier dense (prospect, COS, CES), quartier lumineux (ratio de vitrage, porosité façade)...

Le traitement de ces informations nous permettra de proposer des intervalles de variation.

9.6.4. CR réunion du 9 Mars 2017

Analyse Energétique :

Calculer les indicateurs manquants :

Serge : Densité humaine.

Nathalie : Type de liens avec le sol, Végétali-sation des toitures, perméabilité des façades –Robert Schoeter-.

Marion : Densité des espaces verts, Emprise par fonction urbaine, ratio espace public/ privé.

Geneviève, Patrice : Densité perçue, Ratio locataires/ propriétaires, Taux de rotation à l'îlot, Intermittence d'occupation.

Adélaïde : Energie grise.

Luc+ Marion : Rugosité, Sinuosité, Porosité, Accessibilité aux aménités, et aux espaces publics, à calculer sur Morphologic (Réunion 15 Mars).

Modifier l'analyse des simulations sur scénario de base et modifications, en :

- faisant apparaître les éléments modifiés (bâtiments en jaune dans vue 3D...) ,
- enlever dans les vues 3D les bâtiments hors îlot de base.
- dans évaluation énergétique comparative, faire apparaître une image chauffage, une image refroidissement, montrant les **écarts relatifs** entre base et variante. Compléter par compteur global , un chauffage, un refroidissement, pour base et variante
- vérifier que sur Belfort on a bien 30% de captation solaire en plus sur la variante (**Tathiane**)

Compléter les trois tableaux d'indicateurs par une colonne de définition (rapide) de chaque indicateur et par un sens de variation (**Luc**).

Compléter les trois tableaux correspondant aux variantes proposées dans l'atelier 1 (**Tathiane**)

Analyse de sensibilité :

Préparer l'analyse de sensibilité avant le deuxième atelier (**Serge et Tathiane**)

Expliquer la démarche : Diagnostic -> Plan d'Expérience / analyse sensibilité -> Optimisation. Plan d'expérience : « optimisation de l'optimisation » qui vise à choisir et classer les indicateurs les plus prégnants sur la performance énergétique d'un quartier générique, pour réduire le nombre d'indicateurs à « optimiser » aux 4 à 8 les plus influents (**Tathiane**).

Acheter une Licence ModeFrontier, d'abord mode test à renouveler puis pour un an (tarif doctorant ?) (**Tathiane**)

Continuer à tester l'environnement d'optimisation entre ModeFrontier et Rhinocéros+ Grasshopper + LadyBug + HoneyBee (**Serge**)

Propositions pour le deuxième atelier participatif :

Objectifs :

Proposer des solutions d'aménagement par groupe sur deux scénarios « transversaux » d'optimisation énergétique de leur quartier, respectivement parmi scénarii dense et compact et parmi scénarii lumineux, producteur et frais.

Déroulé :

1) **Introduction** : 45 minutes.

Présentation de l'analyse énergétique des trois quartiers et de leur variante (simulation thermique, captation solaire, analyse de sensibilité sur 4 à 8 indicateurs).

2) **Travail en groupe** (les mêmes groupes qu'au premier atelier), par quartier : 2 heures.

Concevoir deux projets dont un premier correspondant à un scénario, soit dense, soit compact , et un second correspondant à un scénario, soit lumineux, soit producteur, soit frais. Décrire pour chacun de ces deux projets, la stratégie d'optimisation calée sur un ou plusieurs indicateurs. Pour chacun, produire plans, morphologie des bâtiments et des voies, matériaux architecturaux et urbains, systèmes techniques.

3) **Présentation** à l'ensemble des participants des propositions par groupe.

Directives pour participants :

Lâchez-vous, ayez de l'ambition, ne tenez pas compte des contraintes réglementaires...

Supports à préparer :

PowerPoint présentation de l'analyse énergétique de l'atelier 1 (**Tathiane**), à présenter à 3 voix mini (**Luc** intro, **Tathiane + Géraldine+ ...**).

Deux documents A1 :

- Image Ilot, Cadastre, Bâtiment en blocs, et Voirie en perspective (3D ArcScene).
- Orthophoto (**Serge**).

Calques, Post-it, Feutres, Tableaux blancs, Caméras vidéo, Enregistreurs...

Retours sur participants :

9 réponses positives hors auaT et LRA... Luc contacte Pierre RdH. Relance téléphonique à prévoir (**Geneviève, Patrice**).

Echéancier

Envoyer une version complète de l'invitation vers **le 20 Mars**.

Réunion débriefing, **le Vendredi 31 Mars à 09h30 à l'auaT**.

Date Atelier :

Jedi 20 Avril, entre 14h30 et 18h00 + Apéritif.

9.6.5. CR réunion du 31 Mars 2017

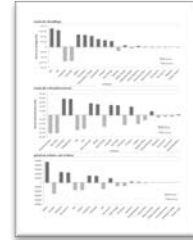
Travail sur les documents pour l'atelier :

Analyse de sensibilité :

Besoins avec un s.

Mettre toutes les flèches dans même sens, avec un code couleur bleu négatif, rouge positif.
Enlever les échelles (Wh) et remplacer par rien ou des %.

Préparer un argumentaire pour présenter le quartier générique et ses variations (**Tathiane**).



Analyse Energétique :

Analyse Energétique par quartier :

Données morphologiques : Rajouter une colonne définitions (**Luc**)

Faire ressortir les indicateurs les plus influents (Code couleur ou étoile), et si inchangé en gris.

Données énergétiques : Intervertir

Δ Proposé- original.

Intervertir échelle/code couleur pour cohérence entre chauffage et Refroidissement. Mettre en cohérence avec légendes.

Remplacer compteur global captation solaire par histogramme Projet/ Variante en valeur et écart en pourcentage.

Renvoyer sur chaque fiche la partie du comparatif global correspondante, en rajoutant la captation solaire et en montrant les deux autres quartiers en filigrane (**Tathiane**)

Rajouter un cartouche en bas avec une pré-analyse des 3-4 grandes tendances (**Luc**)



Préparer un argumentaire pour présenter les fiches (**Luc**)

Tableaux des indicateurs :

Compléter les trois tableaux correspondants aux 3 quartiers par le calcul des indicateurs manquant (principalement Mapuce + participation nouvelle stagiaire X) sous ARCGIS ou QGIS (**Marion –Serge**).

Mettre les unités à gauche et l'échelle de l'indicateur l Ilot –
Q Quartier.

Préparer un argumentaire pour présenter les tableaux (**Géraldine**)

Tableau des indicateurs avec des cellules colorées (jaune, gris) indiquant des données manquantes ou à compléter.

Préparation atelier participatif :

Participation :

9 réponses positives hors auaT et LRA... Luc contacte Pierre RdH. Relance téléphonique à prévoir (**Patrice**).

Objectifs :

Proposer par groupe deux scénarios d'optimisation énergétique de leur quartier, à choisir parmi les 3 scénarii suivant : **économe** (optimisation besoins chauffage), **frais** (optimisation besoins climatisation) ou **producteur** (captation solaire).

Déroulé Jeudi 20 Avril :

1) **Introduction : 14h30 – 15h30.**

Présentation de l'analyse de sensibilité sur indicateurs, puis ensuite de l'analyse énergétique + Calcul des indicateurs des trois quartiers et de leurs variantes (simulation thermique, captation solaire).

2) **Travail en groupe 15h30 – 17h30** (les mêmes groupes qu'au premier atelier), par quartier :

Un rapporteur par groupe choisi en début de séance de travail.

Préalable : travail premier atelier sur production de variante. Depuis bilan comparatif scénarii, réflexion sur sensibilité des indicateurs. Comment intégreriez-vous ces dernières analyses dans votre projet pour aller plus loin en poussant les contraintes aux limites, sans tenir compte des contraintes réglementaires ?

Attendu : Pour chaque variante choisie, rendu graphique (plans, morphologie des bâtiments et des voies) et technique (matériaux, dispositifs techniques) et argumentaire sur intentions : stratégie d'optimisation retenue, calée sur un ou plusieurs indicateurs.

3) **Présentation 17h30 -18h00**, à l'ensemble des participants des propositions par groupe.

Directives pour participants :

Lâchez-vous, ayez de l'ambition, ne tenez pas compte des contraintes réglementaires...

Supports à préparer :

PowerPoint (Tathiane, Luc, Géraldine)

Deux documents A1 : Image llot, Cadastre, Bâtiment en blocs, et Voirie en perspective (Google Earth)

Calques, Post-it, Feutres, Tableaux blancs, Enregistreurs (LRA)... Café (aueT) + Apéro (LRA)

Suites Atelier

Envoyer Sketch-Up Morphologies comparées entre original et variantes, et questionnaire sur attentes, en termes de résultats et d'adéquation aux pratiques.

Soirée de restitution des analyses croisées vers Septembre 2017.

Restitution croisée MapUce + Multiplicités aux Abattoirs ... de l'EEAM.

9.6.6. CR réunion du 3 Mai 2017

Débriefing sur l'atelier du 20 Avril 2017 (1^{er} jet à structurer à partir de trame à proposer par Léa) :



STRATEGIES MISES EN ŒUVRE DANS LES GROUPES

Analyse de sensibilité fondamentale. Temps d'appropriation long dans tous les groupes. Questionnement sur les unités, sur les sens de variation des indicateurs.

2 stratégies différentes :

- A Castors et Belfort, choix d'abord du scénario (économe, frais et captation) puis ensuite des indicateurs sur lesquels travailler en priorité : en priorisant pour le premier scénario, d'abord les indicateurs dont la place étonne le groupe, ou pour le deuxième scénario, en prenant les critères les mieux placés « à l'aveugle ».
- A l'Hers, choix des critères d'abord en regardant dans l'analyse de sensibilité ceux qui sont bons sur les trois scénarii, puis en choisissant ensuite les scénarii. Approche plus archi basée sur des critères plus réalistes, et une approche typomorpho.

Dans tous les groupes, l'action renforce l'adhésion, et les groupes se « lâchent » de plus en plus, au fur et à mesure de l'exercice et plus dans l'atelier 2 que dans l'atelier 1. Temps de l'appropriation de la démarche. Y réfléchir lors de la production du prototype d'outil final de Multiplicités, par exemple par rapport à des outils optimisation+ heuristique, ou l'utilisateur choisi parmi des optimum de Paréto (Travaux Xavier Marceau (Lyon) paru dans Scan)

Scénario Econome toujours le premier choisi avant Frais et Producteur.

Rôle modérateur de la végétation comme ombrage/ protection et pour son albédo dans tous les groupes, même en hypercentre.

Remarques sur indicateurs : Rajouter Indicateurs à l'habitant : Densité/hb, Kwh/hb

La participation dans chacun des groupes est liée aux compétences : chaque membre apparaît dans le travail du groupe selon ses compétences.

Le rôle du dessin et du dessinateur est important dans les groupes, rapport entre dessin – dessein et dessin- formalisation, à la fois outil de résolution de problème et de formalisation de solutions.

A harmoniser avec Impacts des travaux d'atelier sur la possibilité d'évolution des morphologies dans l'outil Multiplicités (p.6)

SPECIFICITES PAR GROUPE

1. BELFORT:

STRATEGIE

A Belfort, approche dictatoriale, poids hégémonique donné aux indicateurs dominants par rapport aux secondaires.

A Belfort, forte rotativité des participants entre les deux ateliers : lent démarrage de la mise en œuvre de la stratégie, autour de la seule personne ayant participé au premier atelier, et par analogie et réactions aux propositions faite dans le premier atelier.

A Belfort, choix d'abord du scénario (économe et captation) puis ensuite des indicateurs sur lesquels travailler en priorité : en priorisant pour le premier scénario, d'abord les indicateurs dont la place étonne le groupe, et pour le deuxième scénario, en prenant les critères les mieux placés « à l'aveugle ».

SCENARI

Scénarii retenus: Chauffage + Production Solaire

Econome

Indicateurs hiérarchisés

- Compacité
- Epaisseur
- Isolation
- Verticalité
- Albédo

Séparer Isolation intérieure sur rue et extérieure sur cour + atrium fermés

Minéralisation par castine blanche

Puits de jour pour bâtiments compacts

2 Variantes cœur d'îlot : végétalisé (boulot blanc ou platane taillé) et blanc



Production Solaire

Indicateurs hiérarchisés

- Albédo
- Prospect
- Albédo sol
- Rue Axe N-S

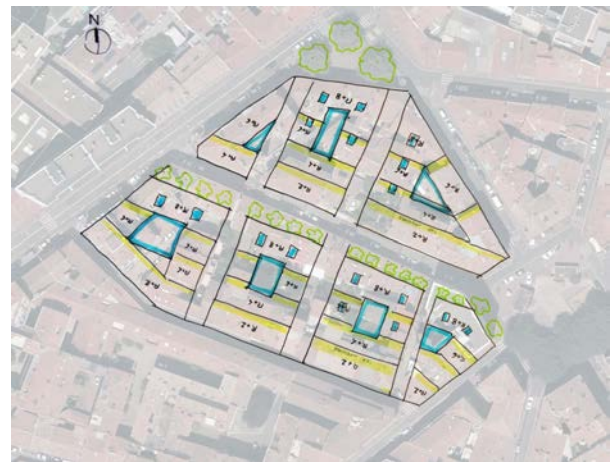
Immeubles en gradins en duplex R+2+4+6 avec capteurs sur façade Sud et partiellement sur toiture terrasse partiellement solarisées

Toiture terrasse partiellement végétalisées

Atrium couverture mobile et photovoltaïque

Albédo important façade Nord, faible en façade Sud

Plantations alignement côté Sud des rues



2. CASTORS:

STRATEGIE

A Castors

- scénarios
- économe (chauffage)
- frais (refroidissement)
- producteur (captation)
- placement du Nord sur la carte
- discussion sur les orientations (15h40)
- solution modérée malgré la présence d'un promoteur (Patrice) (référence atelier 1)
- évocation des quartiers BIMBY
- pas approprié à cette forme urbaine (Patrice)
- parcelles trop petites
- désignation du rapporteur (15h47)
- en binôme
- logique de rénovation urbaine
- discussion sur les unités (du graphique analyse de sensibilité) (15h55)

- distinction entre les indicateurs :
 - sur le bâti
 - sur l'urbain
- discussion sur l'impact des protections solaires → confort d'été

SCENARI

Scénarii retenus: Economie + Frais

Economie:

2 critères retenus

- compacité
- isolation

- conservation coeur (?)
- création de porosité, hauteurs R+1, R+2 en conservant la typologie (?)
- densification
- rénovation des îlots existants (16h05)
- aménagement de nouveaux îlots
- redéfinition de l'îlot (16h10)
 - limites
 - ouverture vers les grands axes
 - nouvel îlot intégrant la « raquette »
 - suppression des maisons mal orientées
 - définition d'un coeur d'îlot (16h12)
 - rues larges
 - alignements (16h15)
 - ajout habitations intermédiaires (idem atelier #1)
- îlots collés mais ouverts
 - pour casser l'effet de barre
- orientation Sud-Ouest → efficace thermiquement (17h17)
- assurer une continuité verte (16h20) → il faut reverdir/végétaliser !
 - coulée verte
- densification îlot « raquette »
 - proposition : logement social, orientation diago, R+3, étagé (?) (photo 16h35)
- coeur d'îlot :
 - passage en R+2, R+3 (16h45)
 - remplacement du R+1 par quelque-chose de plus haut (plus compact!)

Frais:

Un seul critère retenu

protection solaire

+ Rajout du critère Végétalisation non présent dans l'étude de sensibilité

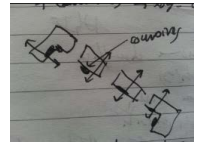
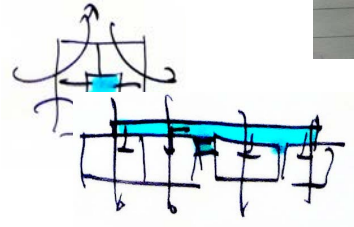
- végétalisation de tous les coeurs d'îlots + noues + réduction des voiries
- bâtiments traversants
- collectif traversant
- typologies:
 - coursives + escalier
 - plots + patios intérieurs
- expérimentation terre crue

- plantations pour végétaliser (16h47)
- pas hauts → pas d'ascenseurs → économie d'énergie
 - Rq : si (parking sous-sol) et (R+1) → ascenseur obligatoire !
- abandon de l'orientation N-S (?)
- introduction d'un grand bassin (rôle important de l'eau) (16h55)



- protections solaires qui se rétractent
 - Rq : entretien ? présence de moustiques ? (16h57)
- présentation d'un principe de patio + ascenseur (Patrice) (16h58)
 - Rq : SF : changement d'archétype (17h03)
- parking centralisé commun (économie de voirie et de surfaces minéralisée)

- création de noues (Rq : en bleue sur la carte)
- proposition de modification de l'albédo ? (SF) (17h15)
- isolation des murs extérieurs et des combles !
- logement traversant + coeur d'îlot vert
- construction dense en haut de rue (photo 17h16)
- + coursives → logements traversants
- travailler sur les jets d'eau (effets de rafraîchissement)
- murs végétalisés au Sud (17h21?)



- Discussion (sur principes constructifs) :
- construction en terre (Sophie?)
- ossature bois → Patrice
- sur-élévation bois (17h25)

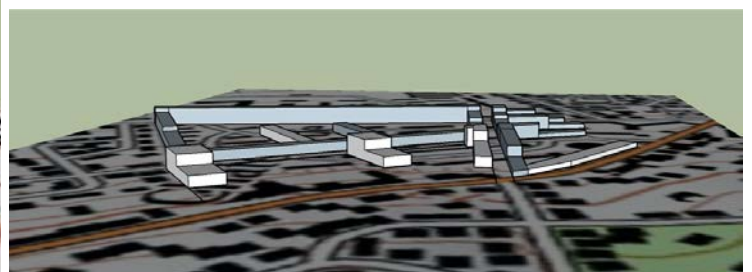
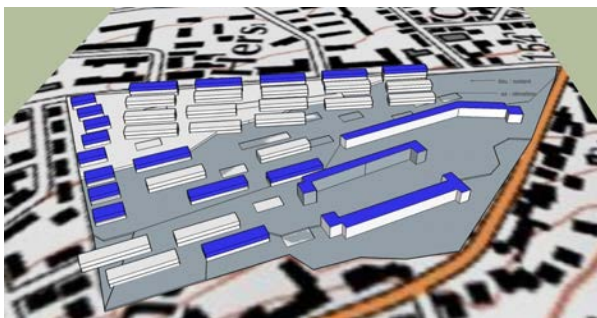
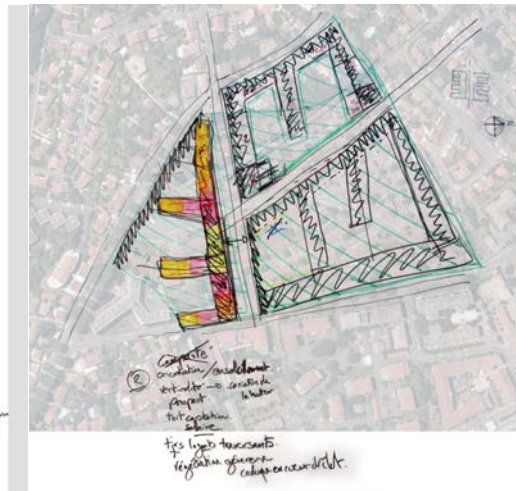
3. HERS:

STRATEGIE

A l'Hers, choix des critères d'abord en regardant dans l'analyse de sensibilité ceux qui sont bons sur les trois scénarii, puis en choisissant ensuite les scénarii. Approche plus archi basé sur des critères plus réalistes, et une approche typo morpho.

A Hers, le groupe a fait de analogies avec le travail sur les cubes de l'analyse de sensibilité, pour choisir des typologies optimales.

SCENARII (A compléter)



SUITES ATELIER

Journée de restitution des analyses croisées en Novembre 2017.

Réfléchir à opportunité restitution croisée MapUce + Multiplicités aux Abattoirs ... de l'EEAM ?

Déroulé restitution :

- Présentation 45 minutes à plusieurs voix (type conférences auaT-IdV-Codev)
- Débat par thématique transversale
- Synthèse
- Pot commun

Préparer plaquette de restitution (profiter PAO auaT), parallèlement à préparation rapport intermédiaire du 26 Septembre, article scientifique et article de vulgarisation.

Envoyer rapidement Sketch-Up Morphologies comparées entre original et variantes, et questionnaire sur attentes, en termes de résultats et d'adéquation aux pratiques + Save the Date pour restitution.

Impacts des travaux d'atelier sur la possibilité d'évolution des morphologies dans l'outil Multiplicités **Réunion travail, matin 3 Avril 2017**

On ne touche pas à l'environnement de l'archétype

on ne déplace pas (trop) l'axe d'une rue existante

on peut créer des rues, souvent ce sont des rues perpendiculaires aux grands axes (traversantes)

une rue peut être élargie ou réduite en largeur

surélévation surtout là où les largeurs de rues sont élevées

volonté de ne pas dépasser la hauteur des bâtiments environnants (Belfort)

épaississement des bâtiments existants

extension de bâtiments (contraint par le prospect)

suppression de bâtiments existants

création de nouveaux bâtiments

en alignement avec d'autres

en alignement avec les rues

parallèlement aux rues

ou orientation Nord/Sud

ou pas du tout !

possibilité de création de nouveaux bâtiments hauts

quand prospect sur rue faible,

quand prospect sur cour faible (voir linéaire de trou par rapport au linéaire de façade bâtie)

augmentation de la compacité des bâtiments

si ilot ferme, augmentation de profondeur,

si profondeur trop importante, création de patios ou puits de jour.

création de puits de lumière uniquement sur bâtiments hauts

à partir d'une certaine hauteur

création de végétation

rideau d'arbres au Sud des alignements de bâtiment (pavillons discontinus).

si pas possibilité de construction économe en énergie ou si prospect < Valeur on végétalise.

Dans ilot ouvert, nécessité d'avoir une emprise végétale > à %.

Ilots fractionnés (possibilité de couper ilots si ilot peu perméable- voir australiens) : Si emprise de l'ilot > XX ha, on peut le couper en plusieurs.

Le caractère fermé ou ouvert de la typologie persiste souvent

9.6.7. CR réunion du 1 Juin 2017

Rappel ordre du jour :

1. démo ModeFrontier (Tathiane)
2. démo Grasshopper (Serge) : repoussée.
3. Comment passer des recommandations des ateliers à des règles applicables à l'optimisation.

Règles d'optimisation retenues pour l'optimisation.

*Ne pas chercher à définir des règles génériques, mais traiter de manière différente chacun des archétypes : **Hers** parallélépipèdes rectangles ; **Castors** : rajouter deux pans (avec une variable pente de toiture) ; **Belfort** : 3D, mais en simplifiant géométrie des bâtiments d'angle.*

Concentrer l'optimisation sur les caractéristiques géométriques dans un premier temps, à partir de la hiérarchie des indicateurs de l'analyse de sensibilité. Les autres paramètres tels que le choix des matériaux, la végétation, etc seront ajoutés dans une seconde phase d'optimisation, en simulant par exemple sur ENVI-MET quelques optimums.

On ne touche pas à l'environnement de l'archétype.

Modélisation des bâtiments

- **Fusion parcelle** : possibilité de fusion des parcelles (sauf **Hers**)
- **Alignement** : Imposer l'alignement des bâtiments sur les axes routiers (**Belfort**), mais possibilité de pouvoir reculer l'ensemble des bâtiments (pour **tous**). On ne déplace pas l'axe d'une rue existante.
- **Création de rues** : Possibilité de créer des ruelles traversantes, perpendiculaires aux rues existantes (**Belfort**)
- **Possibilité suppression bâtiments** (?)
- **Possibilité création nouveaux bâtiments** : alignement avec d'autres, avec les rues ou orientation Nord-Sud (?)
- **Hauteur** variant de 0 à R+8 max (**Belfort**). De manière générale, la hauteur des bâtiments varie de 0 à la hauteur maximale rencontrée parmi les bâtiments voisins. (*Compacité, verticalité*).
- **Épaisseur**. Elle varie de 0 jusqu'au premier contact avec un autre bâtiment.
- **Étage** : Possibilité de couper un bâtiment en tranches de profondeur de 7m (selon orientation du bâtiment), en faisant varier la hauteur de chaque partie. L'épaisseur peut aussi être modélisée grâce aux vides de la zone : en faisant varier la surface des cours (voir *puits*). Pour tranches de hauteur supérieure à R+2, puits de lumières ; pour R+4 : patios.
- **Présence de puits** : Définir une borne minimale de profondeur et une borne minimale de hauteur à partir desquelles on insère un puits. Ce puits sera « standardisé » (mis au centre, avec superficie définie par exemple 2m* 2m) (*compacité, épaisseur*). Même procédure pour l'insertion de patios par homothétie de la forme initiale du bâtiment. (*Épaisseur, verticalité*).
- **Largeur** (**Belfort**) conserver largeur bâtiments.

- **COS** : possibilité de surCOS de 25% de la surface de plancher, possibilité de sousCOS. (*verticalité*)
- **Orientation** : A **Belfort** pas possible de changer l'orientation des bâtiments. Pour **Hers**, possibilité de changer la direction (par variation 30°). Pour **Castors**, possibilité de changer uniquement orientation des additions
- **Inclinaison toiture** : Faire varier l'inclinaison des toitures (sauf **Hers**).
- **Ratio vitrage** : Réparti par étage ?
- **Captation Solaire** : Faire varier le pourcentage de toiture solaire et le pourcentage de toiture accessible.
- **Protection solaire** : Faire varier les protections solaires : intégrées, modifications façade – joues, casquettes-, patio protégé. (*Protection solaire*)
- **Thermique** : Modéliser les bâtiments avec deux zones thermiques (espace vie, toiture) *à tester à petite échelle (thermique)*.
- **Ventilation** : Imposer une ventilation minimale. (*Ventilation*)
- **Isolation** : Isolation extérieure sur cour, isolation intérieure sur rue (**Belfort**) . Isolation extérieure partout (**autres**) (*isolation*)

Modélisation des matériaux

- Faire varier la couleur des matériaux des bâtiments. (*Albédo*)
- Faire varier le type de matériaux des bâtiments.
- Faire varier les couleurs et les types pour les matériaux des sols. (*Albédo*)

Modélisation de la végétation

- **Emprise végétale** : Supérieure à Valeur mini si ilot ouvert (Hers, Castors).
- Faire varier le type de végétation : masque + transparence.
- Faire varier le ratio densité plantation arbres d'alignement, à distance des façades Sud.

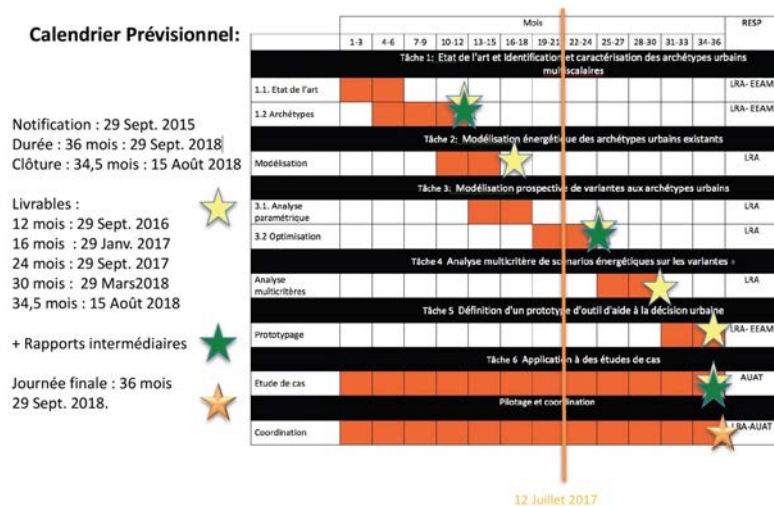
Tester rapidement découpage bâtiments mitoyens, avec deux bâtiments, 4 ou 6 coordonnées

9.6.8. CR réunion du 12 Juillet 2017

Ordre du jour :

Etat d'avancement du projet
Valorisation par publications
Bilan Financier
Etat d'avancement de la tâche optimisation
Préparation du rapport intermédiaire.
Journée de restitution des ateliers
Journée de restitution finale.

Avancement



Nous sommes dans les clouds, sauf léger retard dans l'analyse paramétrique !

Publications envisagées dans revues internationales

- 1 Ateliers+ Optimisation (Serge + Tous)
- 2 Multiscale (Serge principal) à partir de papier PLEA
- 3 Plan d'expérience contextualisé (Tathiane pr.)
- 4 Comparaison des modèles (Tathiane pr., Serge pr.)

Imaginer article vulgarisation dans Belvédère ?

Bilan Financier

BUDGET INITIAL :

Budget par partenaire

ENSA Toulouse Eligible 212.780 € Alloué 107.815 € (env. 50%)
 dont EEAM et IdV

AUAT Eligible 34.508 € Alloué 20.705 € (env. 60%)

Budget éligible /type (€)	Equipement	Personnel	Fonctionnement	Forfaitaire
	14.100	173.715	37.500	21.973

BUDGET RESTANT :

- Equipements – Logiciels :	3 600 €
- Frais déplacements:	1 850 €
- Colloque Clôture:	5 000 €

Les dépenses doivent être effectuées avant le 29/09/2018

Le budget auaT a été débloqué à 50 %, et 50% au solde.

Etat d'avancement de la tâche génération d'archétypes optimum

2 voies en parallèles en cours :

- Approche vectorisation d'une géométrie simplifiée 2D1/2 sous Mode Frontier (**Tathiane**) : approche fiabilisée dans travail de thèse, adaptée à des archétypes simplifiés des trois quartiers. Présentation des simplifications apportées à Belfort.
- Approche d'une géométrie 3D sous GrassHopper (**Serge**) : réunion de rentrée présentation début Septembre, pour fin de tâche début Octobre.

Pour cette optimisation, l'effet de la végétation ne sera pas modélisé, mais pour chacun des trois quartiers, nous retiendrons 4 à 5 archétypes optimum, et nous y modéliseront l'effet de la végétation. (EnviMet ?).

Rapport intermédiaire 2, au 29 Septembre 2017

Proposition de sommaire non finalisée. Version finale envoyée par **Luc** et **Tathiane** prochainement.

Tache Optimisation – génération d'archétypes urbains optimaux :

Approche vectorisation d'une géométrie simplifiée 2D1/2 sous Mode Frontier



RESUME / ABSTRACT

EQUIPE

1. CONTEXTE ET ENJEUX PRINCIPAUX DU PROJET
2. RAPPEL DES OBJECTIFS
3. METHODE

4. AVANCEMENTS

- 4.1. Introduction
- 4.2. Définition des archétypes
- 4.3. Définition et imbrication des échelles spatiales
- 4.4. Mise au point d'un outil d'évaluation énergétique multi-échelle
- 4.5. Evaluation énergétique multiscalaire d'un l'archétype urbain
- 4.6. Evaluation énergétique et solaire des archétypes initiaux
- 4.7. Premier atelier participatif : « production de projets urbains »
- 4.8. Evaluation énergétique et solaire des archétypes modifiés
- 4.9. Analyse de sensibilité énergétique des indicateurs typo-morphologiques
- 4.10. Deuxième atelier participatif : « évaluation et production de projets urbains »
- 4.11. Analyse de sensibilité énergétique contextualisée
- 4.12. Cahier de charges pour l'optimisation

5. CONCLUSION GENERALE

6. COMMUNICATIONS
7. PILOTAGE DU PROJET / PLANNING
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
9. ANNEXES

Rédacteurs principaux :

Partie Atelier : **Nathalie, Luc, auaT**

Partie Modélisation : **Tathiane et Serge**

Relecture tous.

Partie Atelier

Introduction **Luc**

Concepts à mettre en avant : Objectifs / Adéquation aux objectifs de recherche et Intégration dans le processus de recherche, processus d'appropriation, préparation du travail, retour critique, transfert vers professionnels<- Choix des points critiques)

Faire apparaître notre souci de transférabilité aux acteurs du territoire / partenaires techniques, ainsi que nos méthodes pour faire adhérer les participants...

Bien faire apparaître le pourquoi de deux ateliers + une restitution ciblée. Faire une présentation séparée de chacun des ateliers montrant les évolutions entre 1 et 2.

Essayer d'extraire des phrases clés des restitutions des groupes en ateliers à partir des enregistrements audio – vidéo :

Tathiane, Belfort1 ; Luc, Belfort 2 ; Léa, Castors 1 ; Serge, Castors 2 ; Nathalie, Hers 1 ; Geneviève & Patrice, Hers 2

En profiter pour repérer des extraits vidéo exploitables pour restitution finale.

Journée Restitution Ateliers en Janvier – Février 2018

Annonce auaT Save the Date en Septembre 2017 en même temps que questionnaire sur attentes, en termes de résultats et d'adéquation aux pratiques.

Déroulé :

- Présentation 45 minutes à plusieurs voix (type conférences auaT-IdV-Codev)
- Débat par thématique transversale
- Synthèse
- Pot commun

Préparer plaquette de restitution (profiter PAO auaT), à partir (et après) du rapport intermédiaire du 26 Septembre.

Journée Restitution Finale en Septembre 2019

Tables rondes plutôt que conférences

Déroulé :

Plénière de restitution

3 focus (5 à 6 animateurs par focus) :

- Rôle des professionnels : Appropriation professionnelle
- Éléments de langage : Appropriation technique
- Apports de la modélisation à la conception

Public ciblé différent de la restitution des ateliers : scientifiques, urbanistes, techniciens, promoteurs, société civile (CeRCAD, Fédération Bâtiment, Association de quartiers...).

9.6.9. CR réunion du 13 Septembre 2017

Ordre du jour :

Préparation Rapport Intermédiaire 2.

Proposition de sommaire et répartition des tâches

MULTIPLICITES - RAPPORT INTERMEDIAIRE 2

Table des matières

RESUME	6
ABSTRACT	8
EQUIPE	10
1. CONTEXTE ET ENJEUX PRINCIPAUX DU PROJET (Luc)	12
1.1. Optimisation énergétique de la ville et du bâtiment : deux approches dissociées	12
1.2. Simulation et modélisation de la ville et du bâtiment : des outils distincts.	14
1.3. Enjeux énergétiques dans les projets urbains et architecturaux : des visions fragmentées	15
2. RAPPEL DES OBJECTIFS (Luc).....	16
3. METHODE (Luc+ XXX)	17
4. AVANCEMENTS	22
4.1. Introduction (Luc).....	22
4.2. Synthèse du rapport intermédiaire 1 (Luc)	23
4.3. Evaluation énergétique et solaire des archétypes initiaux (Tathiane)	24
4.4. Premier atelier participatif : « production de projets urbains » (Nathalie).....	24
4.6. Analyse de sensibilité énergétique des indicateurs typo-morphologiques (Tathiane) ...	24
4.7. Deuxième atelier participatif : « évaluation et production de projets urbains » (Auat) .	24
4.8. Analyse de sensibilité énergétique contextualisée (Tathiane + Serge)	24
4.9. Cahier de charges pour l'optimisation (Tathiane + Serge)	25
5. CONCLUSION GENERALE (Luc)	25
6. COMMUNICATIONS (tous dans journaux scientifiques et sur Belvédère, Télégramme...) 25	
7. PILOTAGE DU PROJET / PLANNING (Luc).....	26
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES (tous + Optimisation, Sensibilité, Ateliers P.).....	27
9. ANNEXES.....	30
9.1. Annexe 1 : Transcriptions (reste Castors#1 par Léa)	30
9.2. Annexe 2 : Productions graphiques Ateliers 1 et 2 (Nathalie et Serge)	30
9.3. Annexe 3 : Publication PLEA 2017 (Tathiane)	30
9.4. Annexe 4 : Compte-rendus des réunions Multiplicités sur l'année 2 (Luc)	30

Luc envoie les transcriptions existantes sauf Castors 1 (**Luc ou Léa**)

Luc joint les trois fiches de restitution de l'Atelier 2

Dans les productions graphiques, lister en introduction les documents fournis (Orthophotos, fond Plans, ...) et Atelier 2 (Résultats Atelier 1 et Analyse de sensibilité...)

Echéancier pour envois documents :

20 Sept. Ateliers 1et 2, Optimisation Tathiane, Communications, Bibliographie, Annexes

22 Sept. Optimisation Serge (principes de génération, et pistes GrassHopper et Opencity)

24 Sept Renvoi à tous patr Luc pour relecture

26 Sept Dernières modifs

27 Sept. Envoi postal à l'ADEME

29 Sept Envoi Internet à l'ADEME

Possibilité de répondre à ESOF 2018 sur le Festival Science dans la Ville (sur notre projet ou à une échelle plus large sur projets multi-partenariaux Auat- IdV et sur des thématiques médiatisées...) A creuser, appel joint.