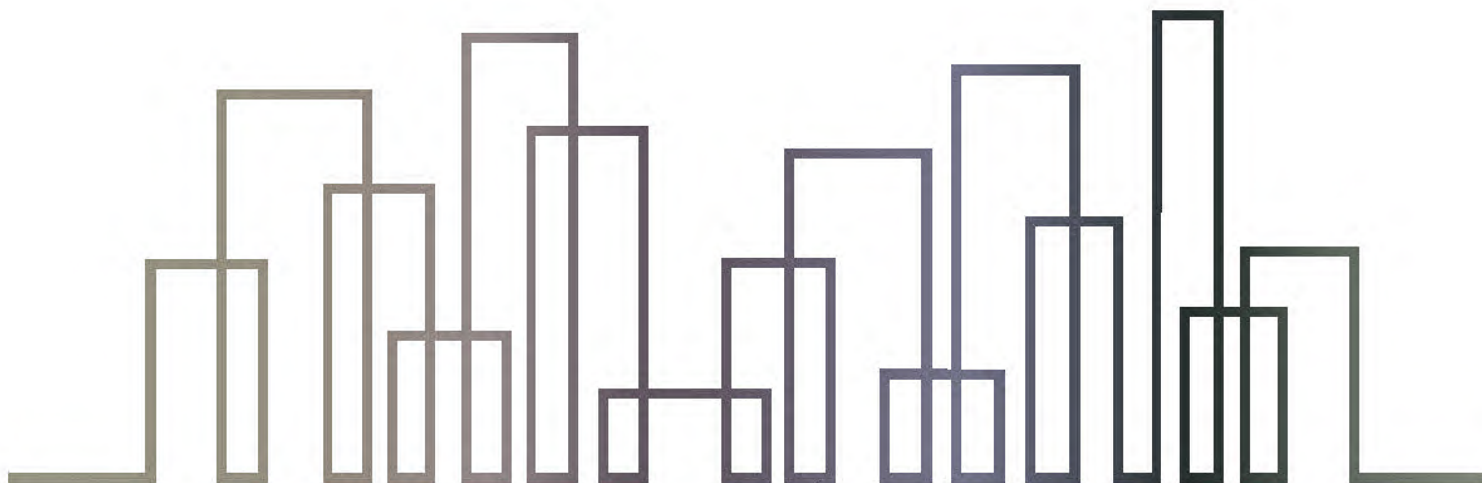




APR MODEVAL URBA 2015- convention n°1517C0030



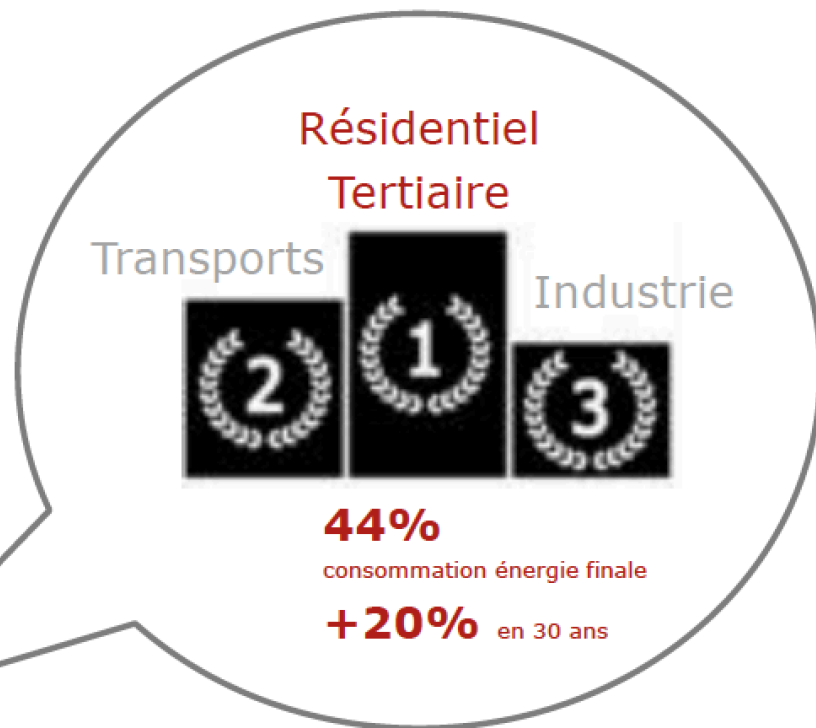
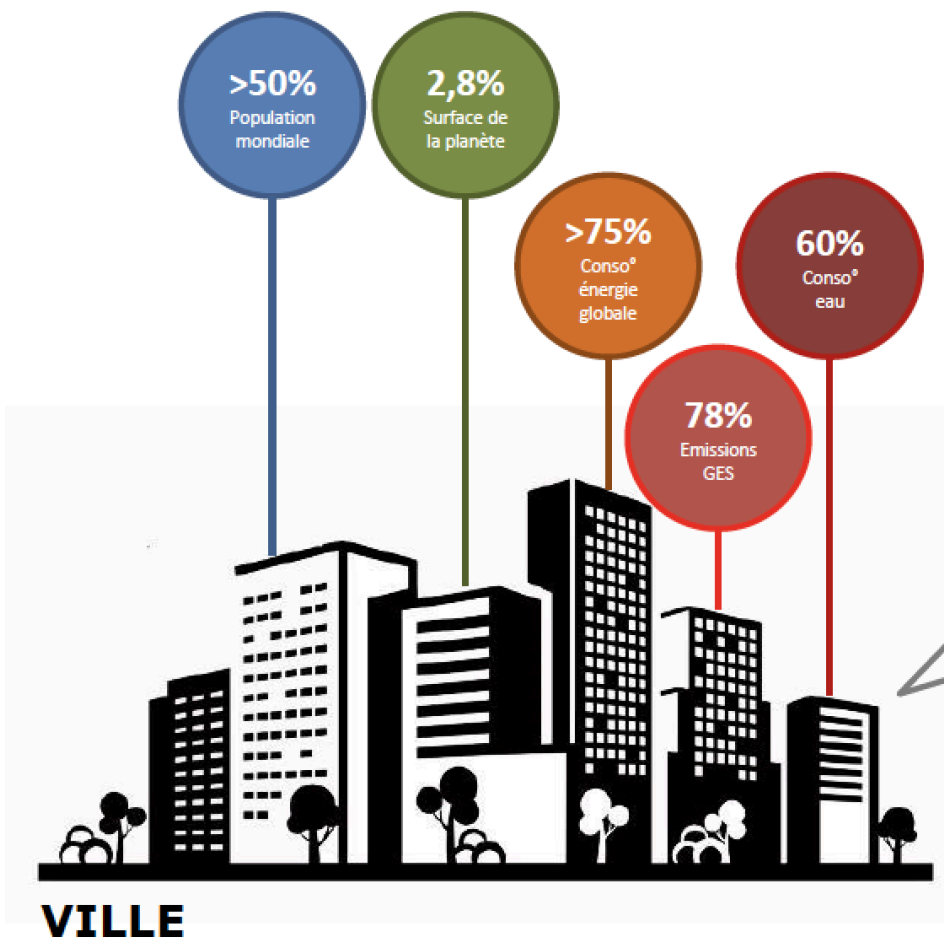
# multipl*C*ités

**Optimisation énergétique multi-échelle et modélisation multicritère des formes urbaines**



# CONTEXTE ET ENJEUX

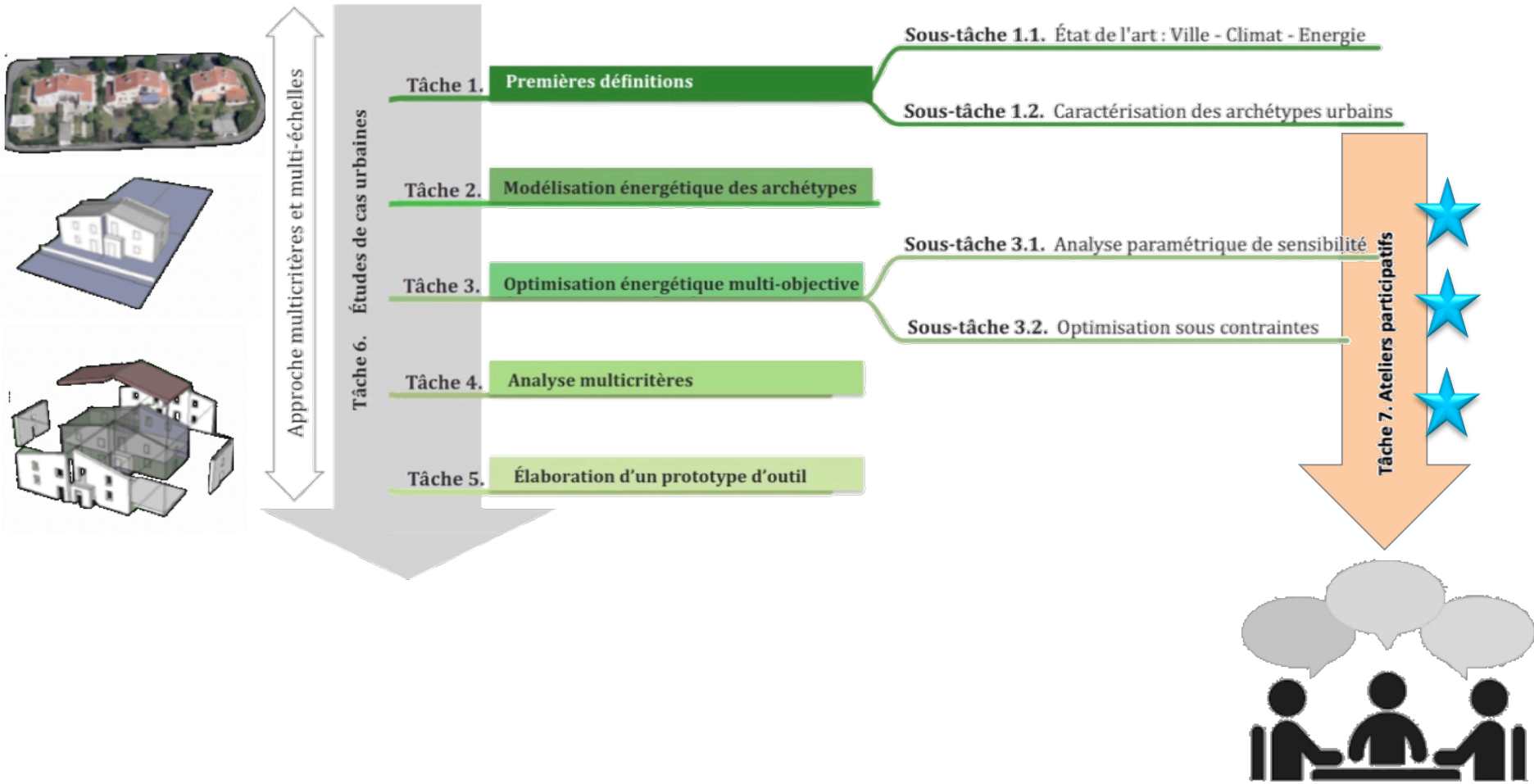
Problématique énergétique et environnementale :



Trois enjeux principaux :

- **Optimisation énergétique de la ville et du bâtiment :**  
deux approches dissociées
- **Simulation et modélisation de la ville et du bâtiment :**  
des outils distincts
- **Optimisation multicritères et multi-acteurs :** faible lien  
entre recherche et pratique

- **Identifier et caractériser des archétypes** de quartiers représentatifs de la ville européenne traditionnelle à Toulouse,
- Etablir le **bilan énergétique** de ces archétypes urbains,
- Evaluer **l'impact relatif des attributs typo-morphologiques** dans les réponses énergétiques,
- Générer des **archétypes énergétiques urbains « optimaux »**,
- **Analyse multicritère** de scénarios énergétiques,
- Développer une **base de données et de connaissances** sur les variantes « optimales ».

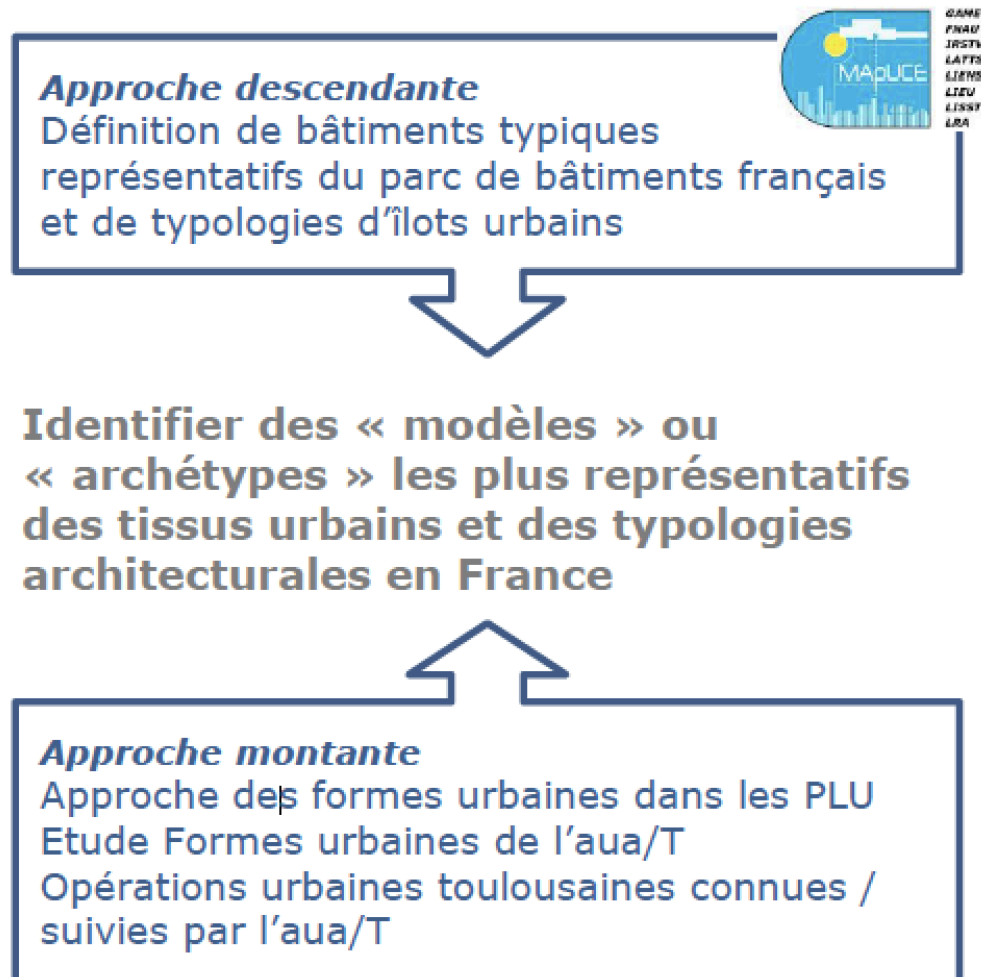


**UNE METHODE MULTI-ÉCHELLES, MULTI-CRITÈRES ET MULTI-ACTEURS**

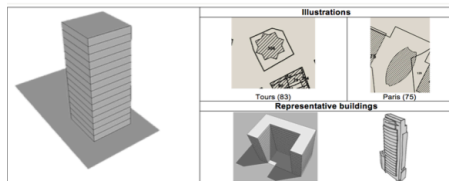
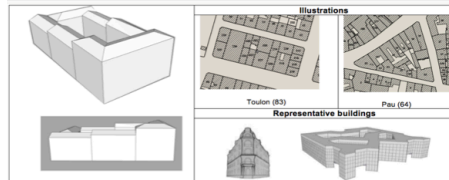
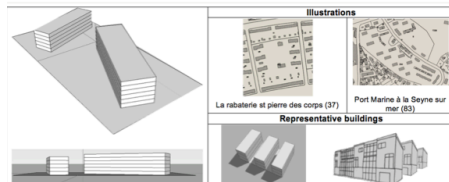
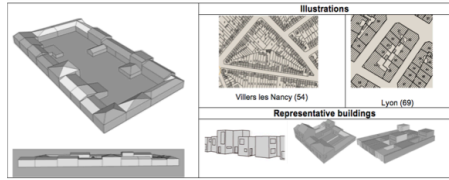
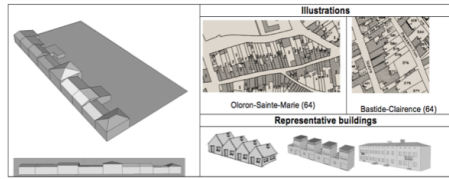
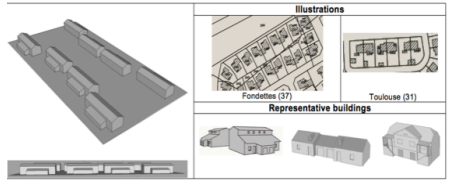
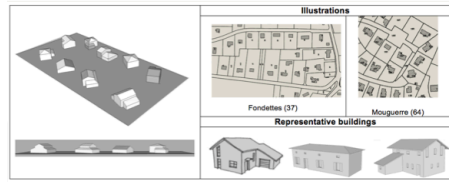
# LES ETUDES DE CAS ET ARCHETYPES

## Tâche 1

Définition des archétypes urbains transposable pour d'autres villes européennes



## PAVILLON



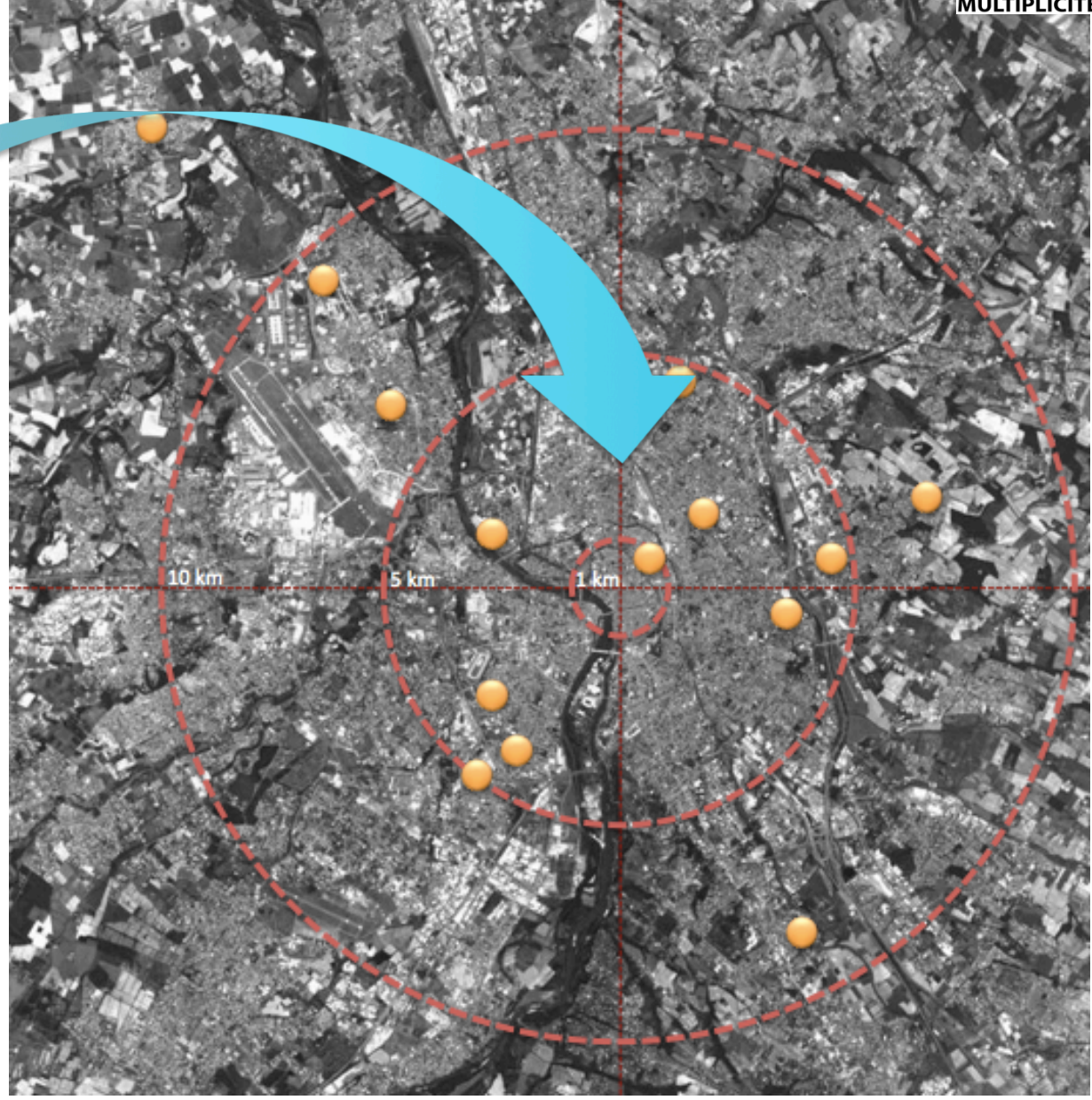
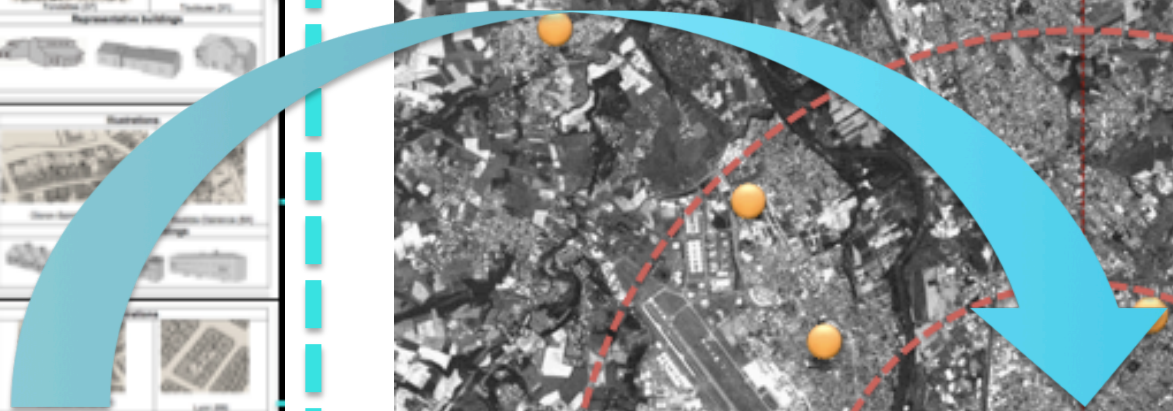
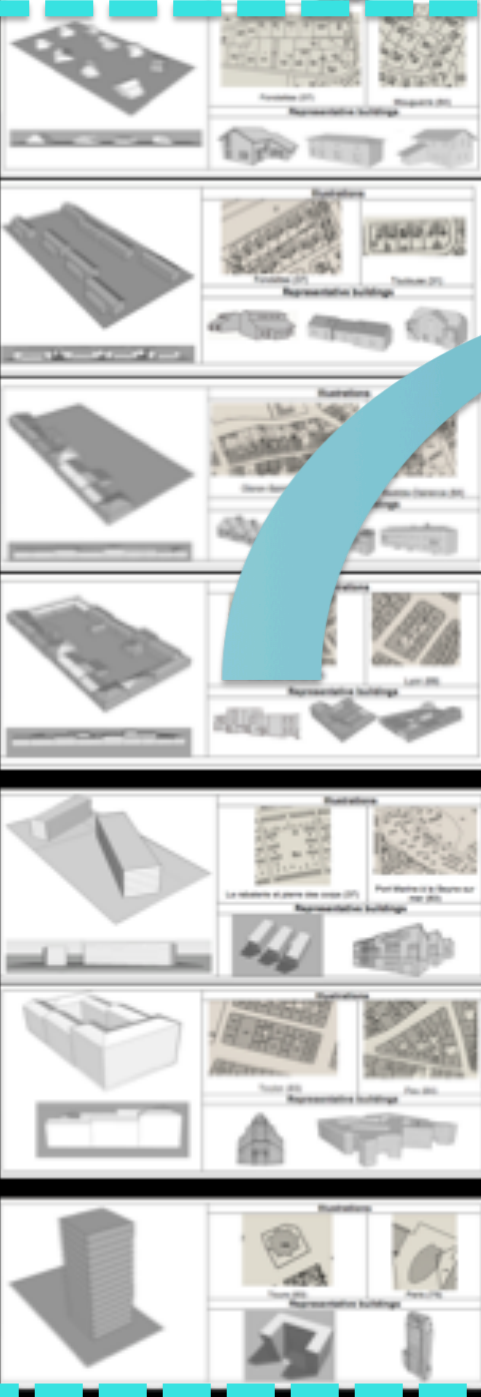
## IMMEUBLE

## IMMEUBLE DE GRANDE HAUTEUR

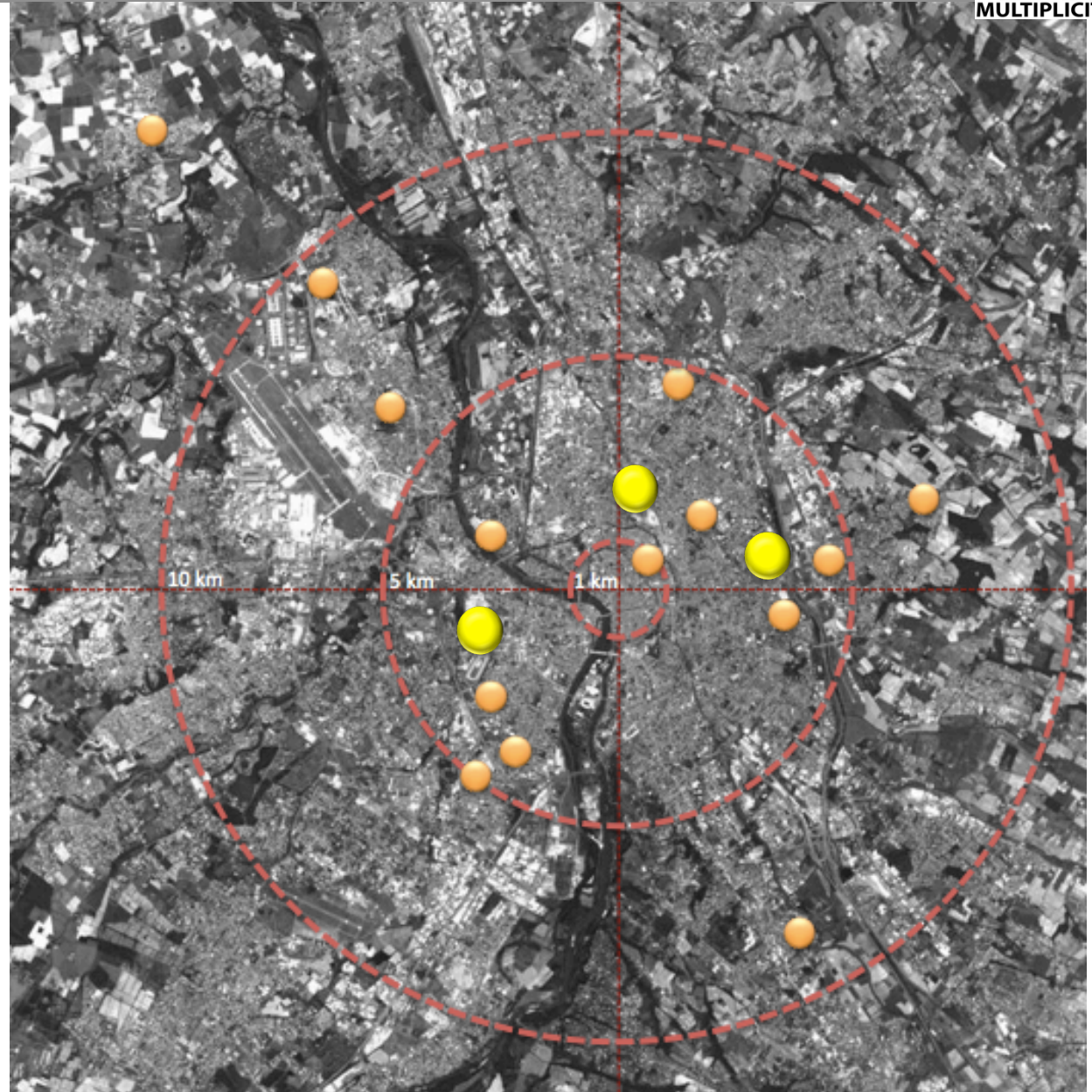
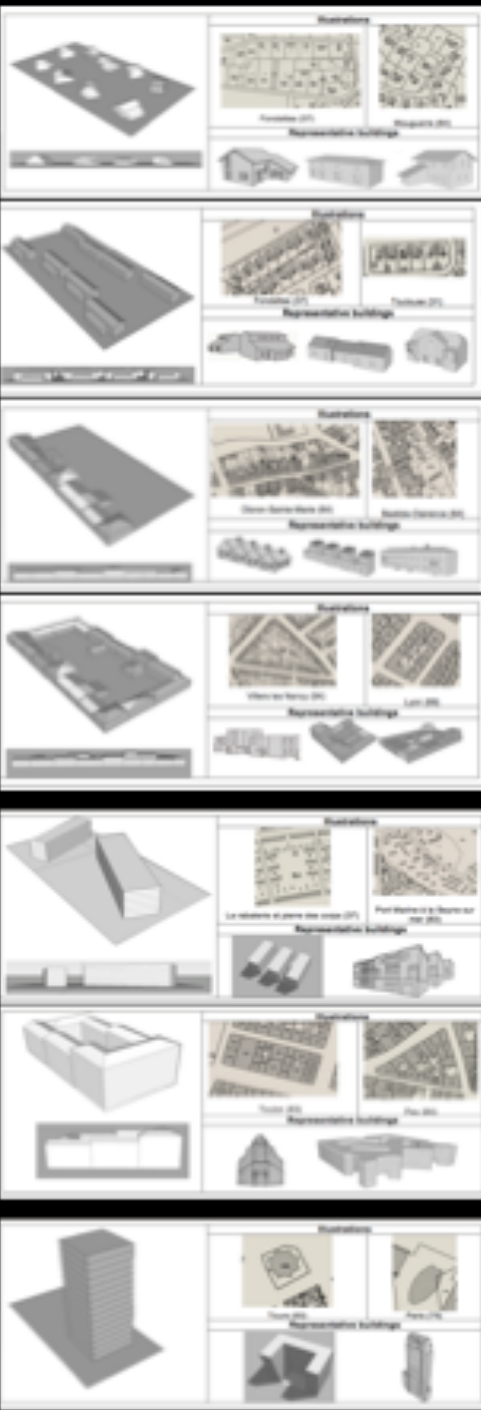
TPOLOGIES  
URBAINE et  
ARCHITECTURALE





















# ETUDE DE CAS



# ETUDE DE CAS



|   | <b>Bagatelle<br/>(1955)</b>   | <b>Belfort (av 1945 à<br/>1980)</b>   | <b>Château de l'Hers<br/>(1970)</b>   |
|---|---|---|---|
|   | Pavillon semi continu<br>(42 400 m <sup>2</sup> )                                   | Immeuble sur ilot<br>fermé (6 100 m <sup>2</sup> )                                    | Immeuble sur ilot ouvert<br>(72 000 m <sup>2</sup> )                                  |
| Localisation du<br>quartier étudié<br>(en rouge)      |    |     |    |
| photographies   |    |     |    |
| Hauteur des<br>édifices                               |   |    |   |
| Hauteur des<br>édifices du<br>contexte<br>environnant |  |   |  |
|   |  |    |  |
|   |   |  |  |
|   |   |   |  |

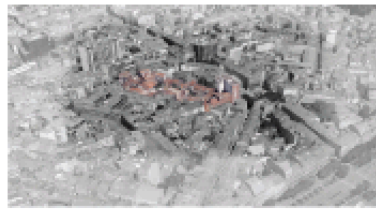
# ETUDE DE CAS

## BAGATELLE CITE CASTORS



Maisons jumelles composées de plusieurs îlots. Architecture commune des années 1950/1955, caractérisée par les premières auto-constructions.

## CENTRE ANCIEN ILOT BELFORT



Cité composée de maisons en bande indépendantes de la voirie. Architecture commune des années 1970/75.

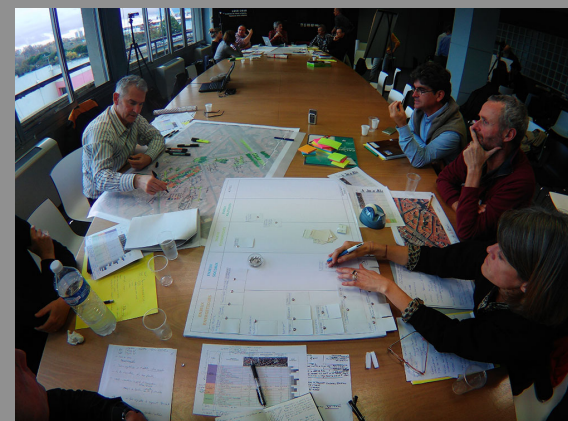
## CHÂTEAU DE L'HERS



Cité composée de maisons en bande indépendantes de la voirie. Architecture commune des années 1970/75.

# CO-CONSTRUCTION et ATELIERS PARTICIPATIFS

COMMENT LE PROJET DE RECHERCHE A ASSOCIÉ LE PUBLIC VISÉ ? QUEL FORMAT ? QUEL  
RÉCURRENCE ? QUEL EFFICACITÉ ? QUELS VECTEURS UTILISÉS ?



**ATELIER 1 :**  
production du  
projet urbain**Éléments de départ :**

- 3 études de cas contrastées (1, 2 et 3)
- mise en situation de projet

**Objectifs :**

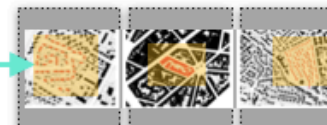
- prise de connaissance
- sensibilisation

**Attentes :**

- analyse des enjeux énergétiques
- analyse des critères retenus
- production de projets urbains (1.1, 2.1 et 3.1)



études de cas



productions du projet urbain

## ATELIER 1 : production du projet urbain

### Eléments de départ :

- 3 études de cas contrastées (1, 2 et 3)
- mise en situation de projet

### Objectifs :

- prise de connaissance
- sensibilisation

### Attentes :

- analyse des enjeux énergétiques
- analyse des critères retenus
- production de projets urbains (1.1, 2.1 et 3.1)



études de cas



productions du projet urbain

## ATELIER 2 : évaluation du projet urbain

### Eléments de départ :

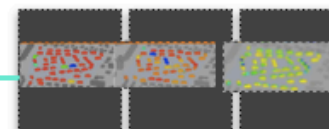
- 3 productions de projets urbains (1.1, 2.1 et 3.1) analysées
- mise en situation de projet

### Objectifs :

- appropriation des questionnements de l'évaluation énergétique

### Attentes :

- production de 3 scénarios d'évaluation (1.2, 2.2 et 3.2) pour chaque étude de cas



productions analysées



scénarios d'évaluation

## ANALYSE DE SENSIBILITÉ 1

**ATELIER 1 :**  
production du  
projet urbain

**Éléments de départ :**

- 3 études de cas contrastées (1, 2 et 3)
- mise en situation de projet

**Objectifs :**

- prise de connaissance
- sensibilisation

**Attentes :**

- analyse des enjeux énergétiques
- analyse des critères retenus
- production de projets urbains (1.1, 2.1 et 3.1)



études de cas



productions du projet urbain

**ANALYSE DE SENSIBILITÉ 1**

**ATELIER 2 :**  
évaluation du  
projet urbain

**Éléments de départ :**

- 3 productions de projets urbains (1.1, 2.1 et 3.1) analysées
- mise en situation de projet

**Objectifs :**

- appropriation des questionnements de l'évaluation énergétique

**Attentes :**

- production de 3 scénarios d'évaluation (1.2, 2.2 et 3.2) pour chaque étude de cas



productions analysées



scénarios d'évaluation

**ANALYSE DE SENSIBILITÉ 2**

**ATELIER 3 :**  
optimisation  
projet urbain

**Éléments de départ :**

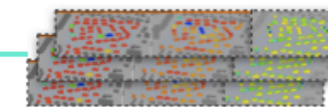
- 3 scénarios d'évaluation (1.2, 2.2 et 3.2) analysés
- mise en place d'un questionnaire

**Objectifs :**

- intégration des questionnements d'optimisation énergétique

**Attentes :**

- production d'analyses d'optimisation (1.3, 2.3 et 3.3)



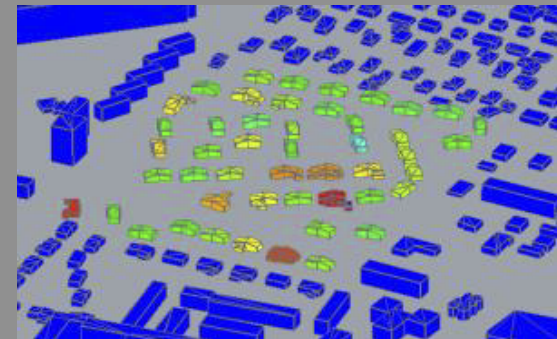
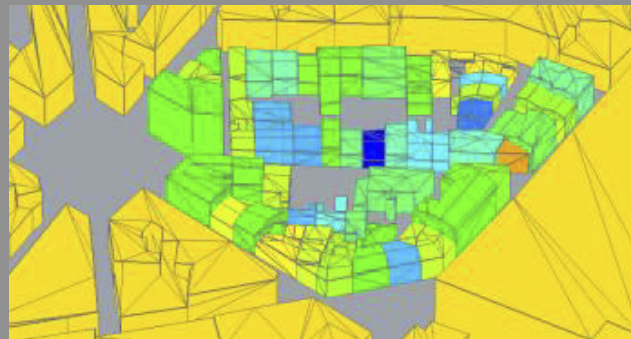
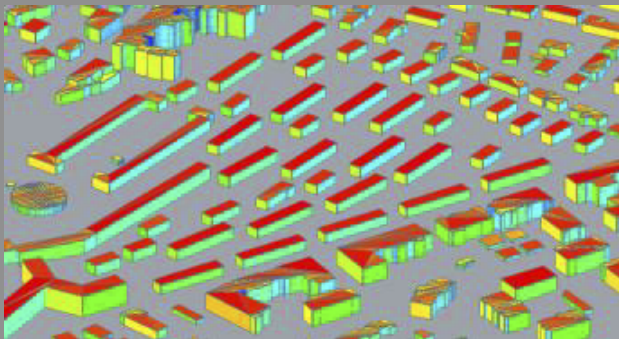
scénarios d'évaluation analysés

**CO-PRODUCTION DE  
CONNAISSANCES**



# EVALUATION ENERGETIQUE DES ARCHETYPES et ANALYSE DE SENSIBILITÉ

QUELS ETAIENTS LES ATTENDUS?  
QUELS RESULTATS ATTENDUS ?



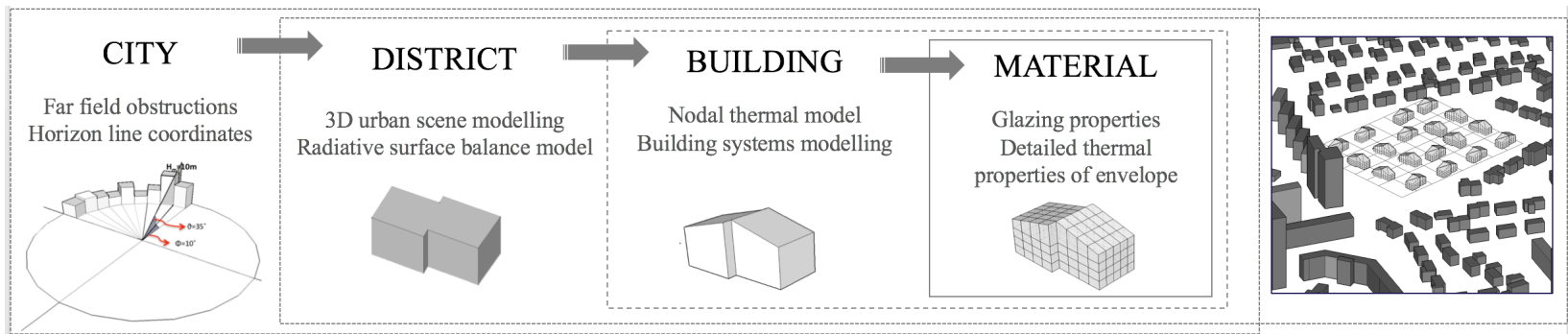
# EVALUATION ENERGETIQUE



## Tâche 2

### Une évaluation énergétique multi-échelle et multicritères

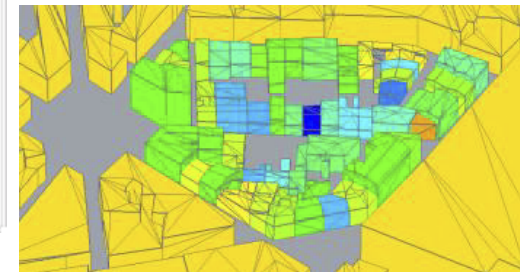
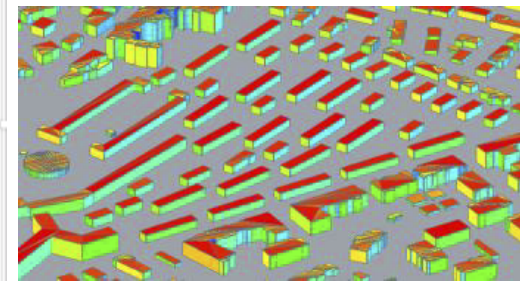
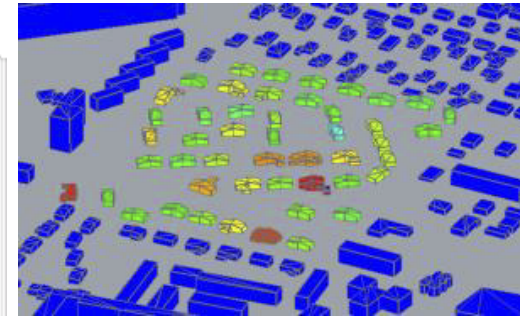
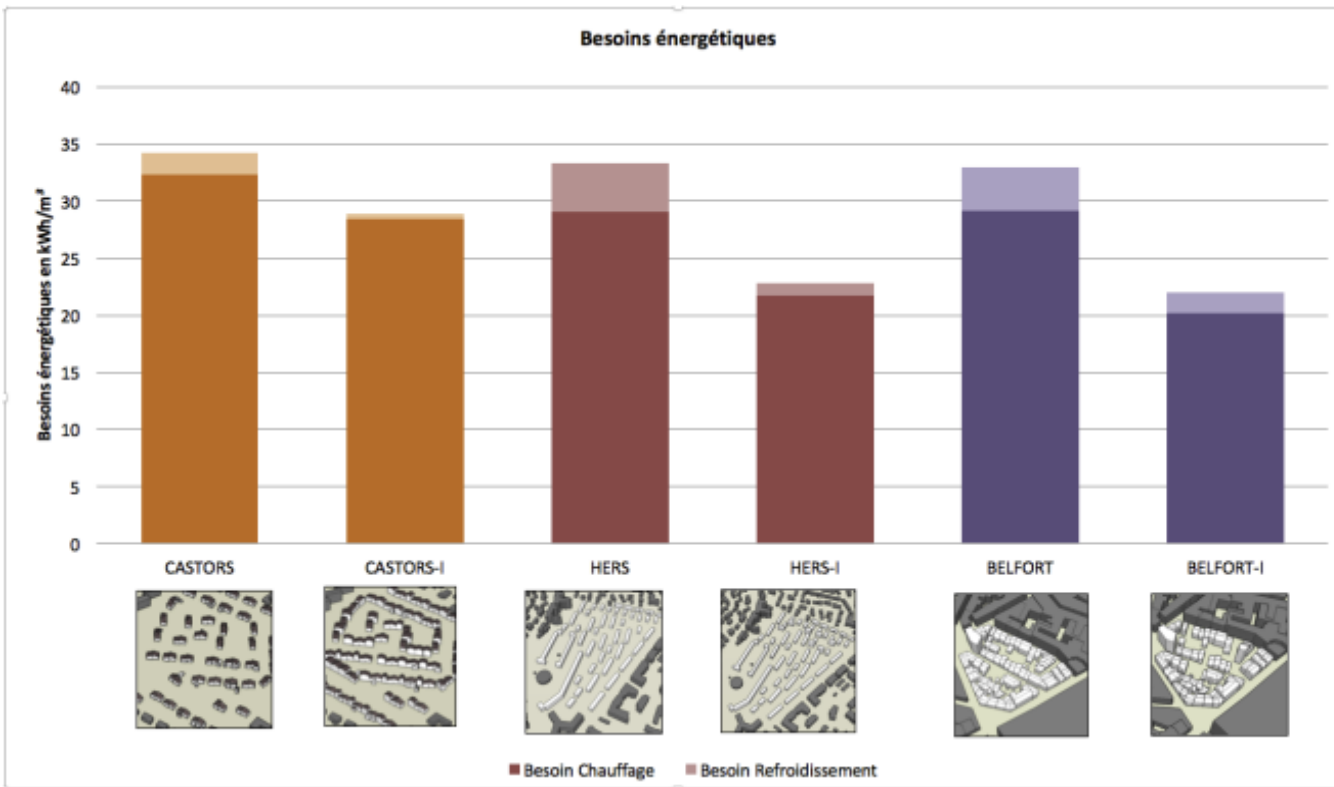
- **Le potentiel solaire** des formes urbaines,
  - La **performance des enveloppes** quant aux apports solaires et les déperditions thermiques liées aux caractéristiques de leur matérialité.
  - Utilisation d'un outil de simulation énergétique.
- => **Approche adaptée dans CitySim** pour une modélisation multi-échelle :



## Tâche 2

### Une évaluation énergétique multi-échelle et multicritères

→ Les besoins énergétiques des archétypes toulousains existants et modifiés par les acteurs urbains



# ANALYSE DE SENSIBILITE

## Tâche 3

Une étude de sensibilité multi-échelle et multicritères énergétiques

→ **Evaluer l'influence relative des facteurs** typo-morphologiques (définissant les archétypes urbains) sur le potentiel solaire, l'éclairage naturel et sur les besoins énergétiques;

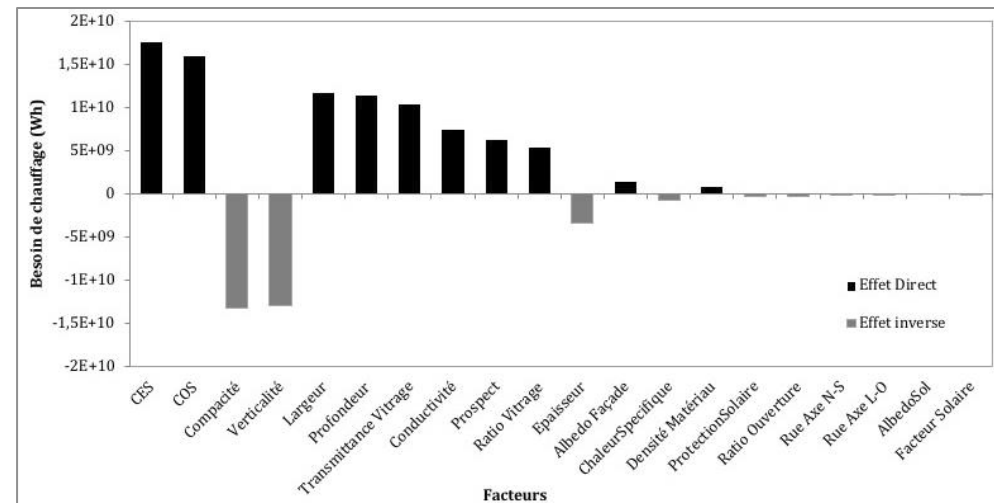
→ **Hiérarchiser les facteurs influents**

→ **Conserver les plus significatifs** dans l'étude d'optimisation

**1<sup>e</sup> temps** : étude de sensibilité sur un modèle de forme urbaine générique soumis au climat de Toulouse.

**Résultats** : dû à la grande liberté des facteurs variant sous une grille urbaine générique, les indicateurs de densité et de forme bâtie (compacité et verticalité) s'imposent sur tous les autres facteurs au regard de toutes les réponses énergétiques.

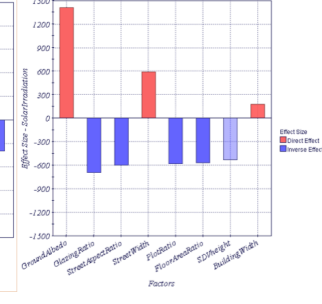
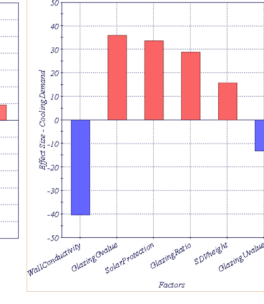
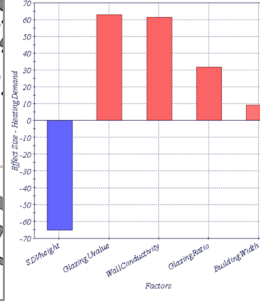
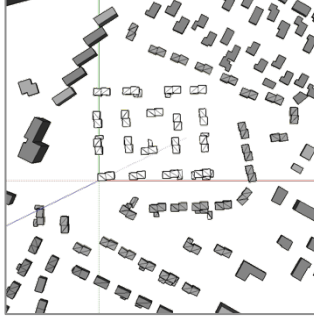
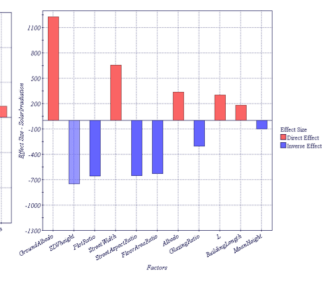
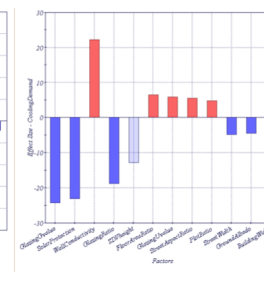
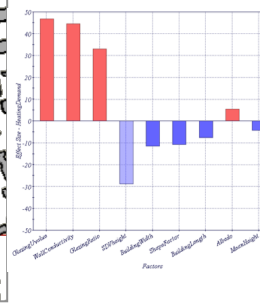
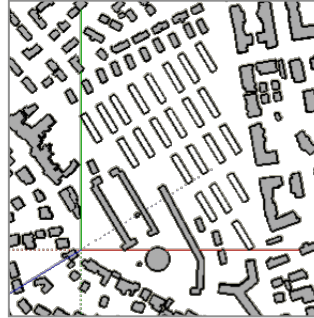
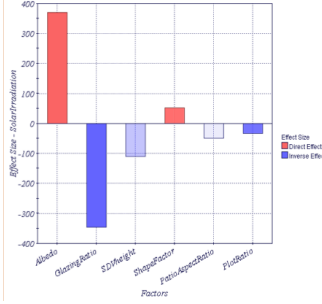
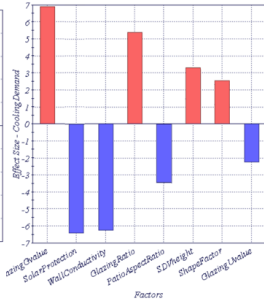
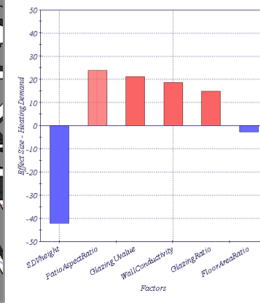
| Rue Axe E-O | Largeur (X) | Profondeur (Y) | Rue Axe N-S | Facteur Solaire(Fs) | Coefficient Transmission thermique des vitrages | Albédo Sol | Coefficient: Transmission thermique des parois | Ratio vitrage | COS  | CES  | Compacité | Verticalité | Prospect moyen | Albédo Façade | Epaisseur murs |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



# ANALYSE DE SENSIBILITE




**2<sup>e</sup> temps** : étude de sensibilité réalisée par quartier a permis de mettre en avant une hiérarchisation fine des indicateurs par rapport à chaque contexte urbain.

**Résultats** : on obtient de grandes variations dans l'hiérarchisation des facteurs par quartier. Par exemple, les indicateurs de forme tels que l'écart-type de la hauteur et le prospect du patio produisent plus d'effet sur les besoins de chauffage pour Belfort que les paramètres physiques des matériaux tels que la conductivité et le coefficient de transmission thermique du vitrage. L'inverse est vrai pour les barres de l'Hers.



# ANALYSE DE SENSIBILITE

Hiérarchisation des facteurs typo-morphologiques selon leur influence relative dans les besoins de chauffage :

| SCALE       | TYPO-MORPHOLOGICAL FACTORS | Continuous buildings into close city block (Belfort)                              | Semi-continuous pavilion (Cité Castors)  | Continuous buildings into open city block (Château de l'Hers)                       |
|-------------|----------------------------|---|--|---|
|             |                            |  |  |  |
| Urban block | Floor Area Ratio           | 1,9 %   | 2,5 %  | 1 %   |
|             | Plot Ratio                 | 0,4 %   | 1,9 %  | 0,6 %   |
|             | Shape Factor               | 1,6 %   | 0,4 %  | 5 %   |
|             | Patio aspect ratio         | 17,7 % (2 <sup>nd</sup> )   | 0,0  | 0,0   |
|             | Aspect ratio               | 0,7 %   | 0,1 %  | 0,2 %   |
|             | Street Width (m)           | Constant  | 0,6 %  | 0,8 %   |
|             | SDV Height (m)             | 31,2 % (1 <sup>st</sup> )   | 23,6 % (1 <sup>st</sup> )  | 13,6 % (4 <sup>th</sup> )   |
| Building    | Building Width             | Constant  | 3,4 %  | 5 %   |
|             | Building Length            | Constant  | 0,0  | 5,3 %   |
|             | Solar protection device    | 0,8 %   | 2,2 %  | 1,8 %   |
|             | Openable ratio             | 0,1 %   | 0,4 %  | 0,1 %   |
|             | Height (m)                 | 1,4 %   | 0,3 %  | 2 %   |
|             | Glazing ratio              | 11 % (5 <sup>th</sup> )   | 11,5 % (4 <sup>th</sup> )  | 15,5 % (3 <sup>rd</sup> )   |
| Envelope    | Glazing G-value            | 1,3 %   | 2,1 %  | 1,8 %   |
|             | Glazing U-value            | 15,7 % (3 <sup>rd</sup> )   | 23 % (2 <sup>nd</sup> )  | 22,1 % (1 <sup>st</sup> )   |
|             | Insulant thickness         | 0,2 %   | 1,1 %  | 0,5 %   |
|             | Wall density               | 0,0   | 1,3 %  | 1,1 %   |
|             | Material Specific heat     | 0,6 %   | 1 %  | 0,1 %   |
|             | Albedo                     | 1,3 %   | 0,5 %  | 2,3 %   |
|             | Ground Albedo              | 0,1 %   | 2,1 %  | 0,2 %   |
|             | Wall conductivity          | 13,9 % (4 <sup>th</sup> )   | 22,5 % (3 <sup>rd</sup> )  | 21 % (2 <sup>nd</sup> )   |

# OPTIMISATION MULTIOBJECTIVE

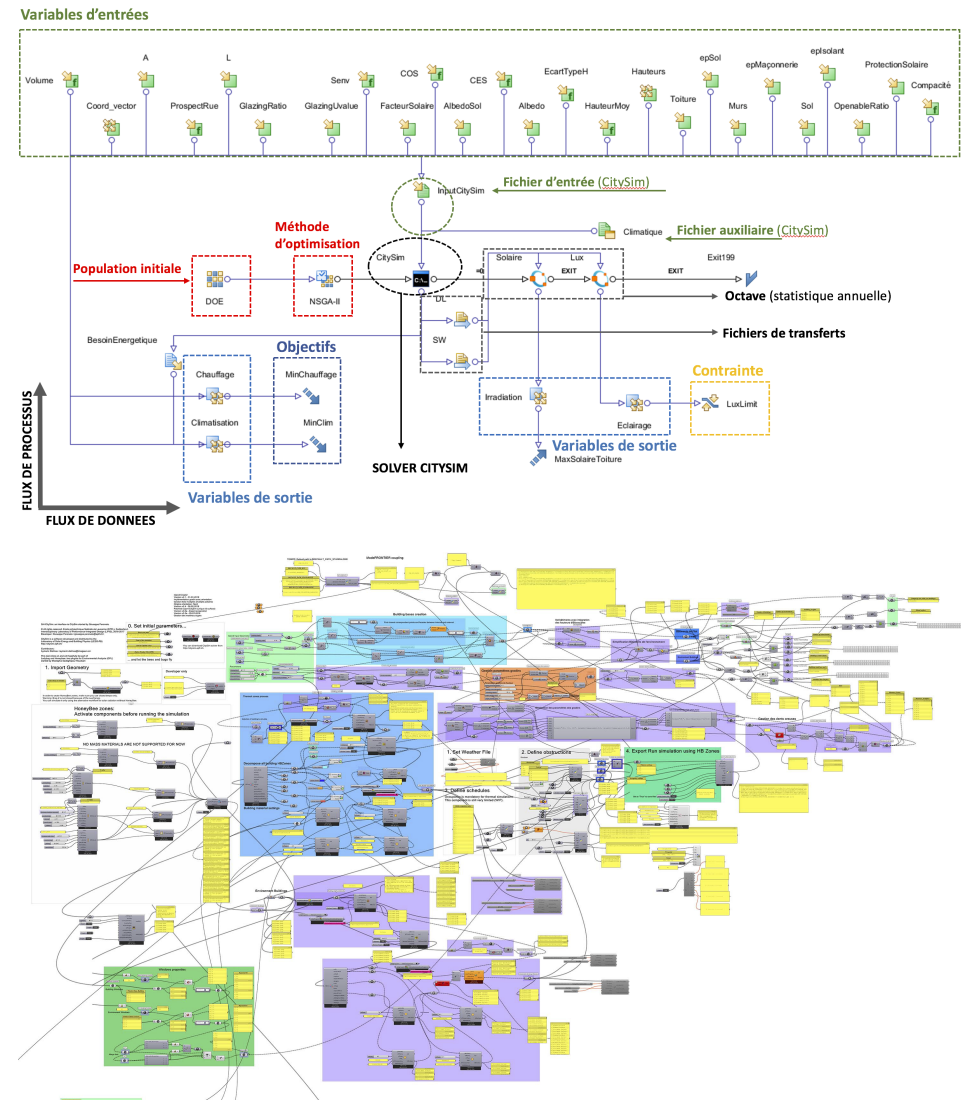
QUELS ETAIENTS LES ATTENDUS?  
QUELS RESULTATS ATTENDUS ?

# OPTIMISATION MULTICRITERES

## Tâche 3

### Une optimisation énergétique multi-échelle et multicritères

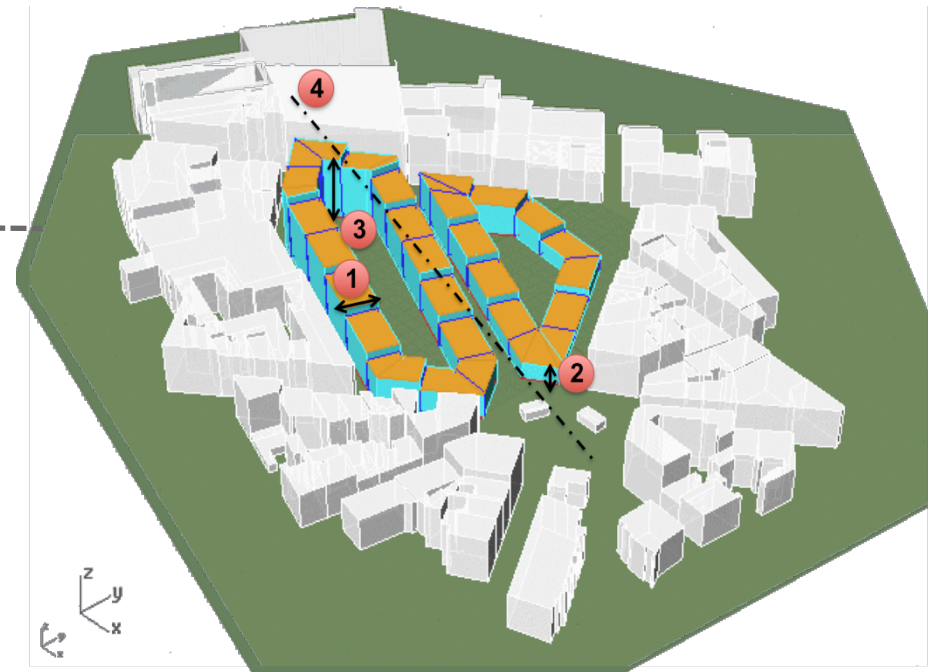
- Identifier les meilleures solutions de projet permettant de minimiser les besoins énergétiques des bâtiments, tout en maximisant leurs potentiels de production d'énergie de source solaire
- Autoriser plusieurs critères à satisfaire simultanément, permettant un compromis entre des objectifs potentiellement contradictoires
- Exécuter un cycle de tâches qui se répètent jusqu'à ce que des configurations optimales soient atteintes, en tenant compte du plus grand nombre possibles de critères et de contraintes
- Utilisation de méthodes d'optimisation multi-objectives évolutionnaires (algorithme génétique NSGA-II codé dans l'environnement de modeFRONTIER) couplé avec Rhino/Grasshopper (modélisation paramétrique de la forme urbaine) et CitySim (calcul énergétique).





## Tâche 3

Une optimisation énergétique multi-échelle et multicritères



## BELFORT

Immeuble continu  
sur îlot fermé

## BELFORT

Géométrie simplifiée

Caractéristiques principales de  
l'archétype ont été conservées

## Tâche 3

Une optimisation énergétique multi-échelle et multicritères

# BELFORT

| Largeur bâtiments | Profondeur bâtiments | Hauteur minimale | Hauteur maximale | Orientation gradin (par rapport S-N) | Ratio d'emprises libres | Ratio vitrage   | Albédo Façade   | Épaisseur maçonnerie | Protection solaire | Coefficient Transmission thermique des vitrages | Facteur Solaire(FS) | Épaisseur isolant | Albédo Sol      |
|-------------------|----------------------|------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|---|---------------------|-------------------|-----------------|
| m                 | m                    | m                | m                | °                                    | %                       | %               | /               | m                    | /                  | W/m <sup>2</sup> K                              | /                   | m                 | /               |
| 21                | 12<br>↓<br>22        | 3<br>↓<br>30     | 3<br>↓<br>30     | -90<br>↓<br>+90                      | 0,0<br>↓<br>0,5         | 0,1<br>↓<br>0,9 | 0.1<br>↓<br>0,9 | 0,1<br>↓<br>0,4      | non                | 1,0<br>↓<br>5,0                                 | 0,1<br>↓<br>0,9     | 0,02<br>↓<br>0,3  | 0,1<br>↓<br>0,9 |

## Paramétrisation

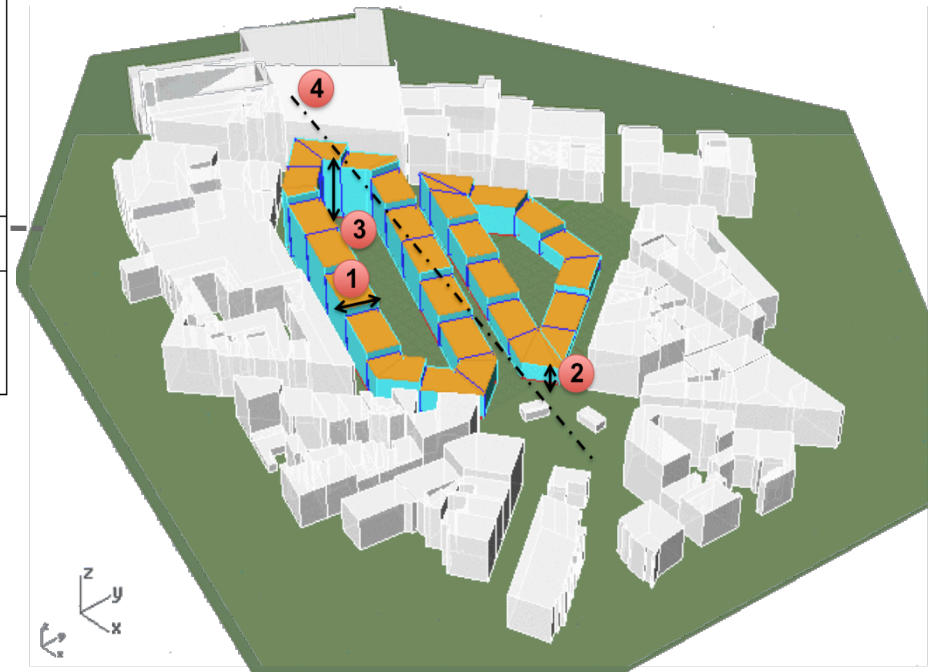
Facteurs typo-morphologiques de pertinence énergétique

### Paramètres d'entrée architecturaux:

- Ensemble des emprises de l'îlot urbain
- Paramètres constructifs et matériaux des bâtiments :
  - Ratio de vitrage
  - Albédo (des façades et toiture)
  - Albédo du sol
  - Épaisseurs de maçonneries (mur, toiture, sols/planchers)

### Paramètres morphologiques de l'archétype:

- Profondeur des bâtiments (1)
- Hauteur initiale du gradin (minimum) (2)
- Hauteur finale du gradin (maximum) (3)
- Orientation du gradin par rapport au nord (entre -90 and +90)(4)
- Ratio d'emprise libre de bâtiment (5)



## BELFORT

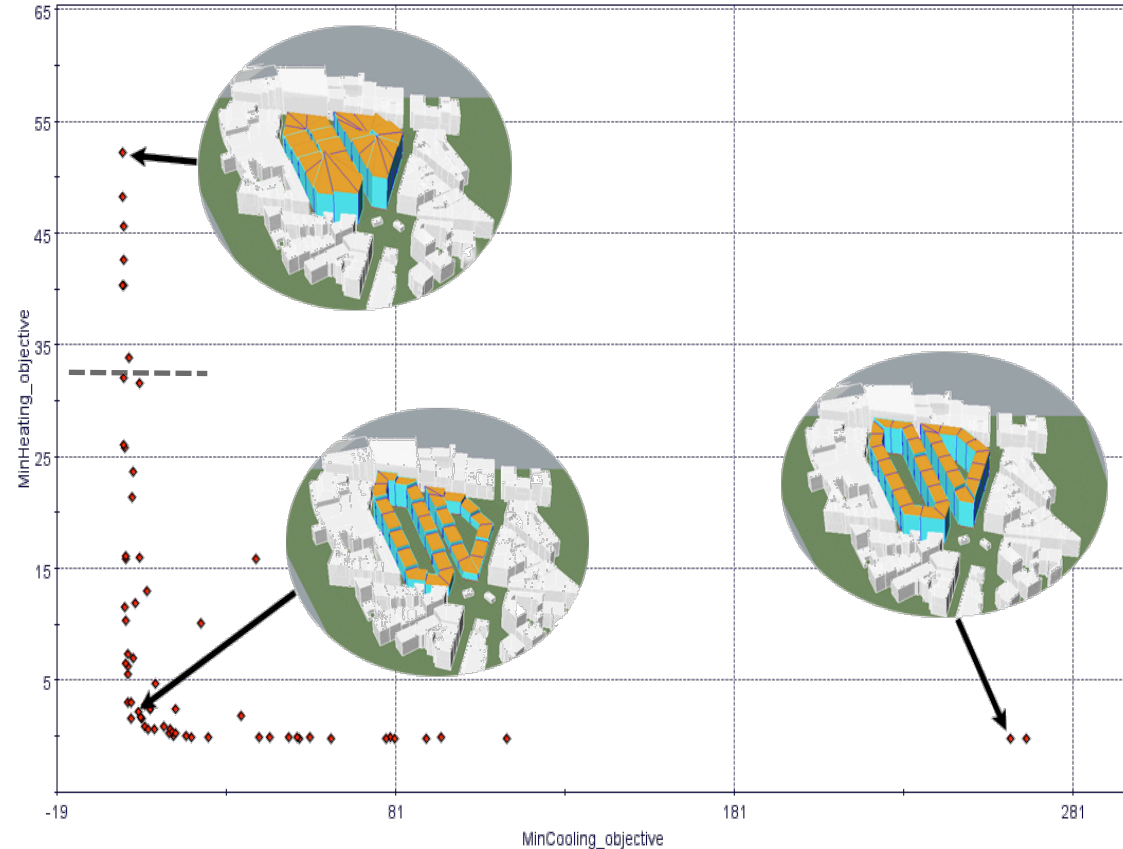
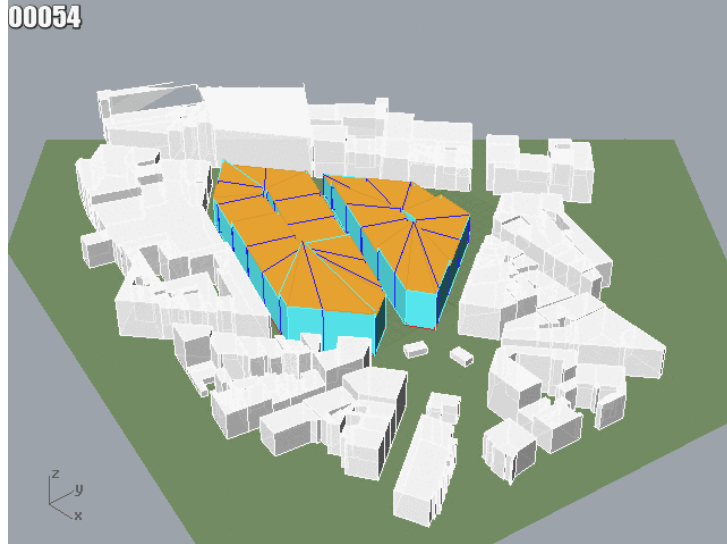
### Géométrie simplifiée

Caractéristiques principales de l'archétype ont été conservées

# OPTIMISATION MULTICRITERES

## Tâche 3

Une optimisation énergétique multi-échelle et multicritères

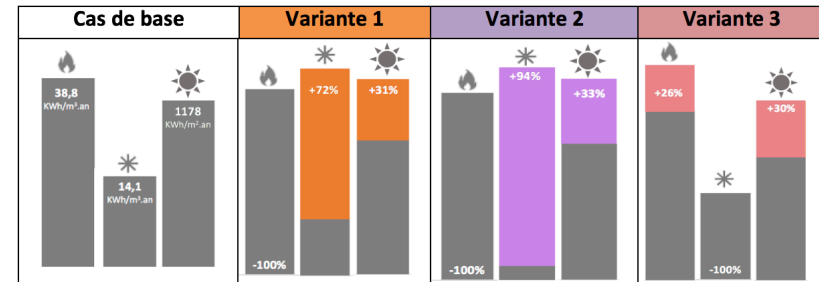
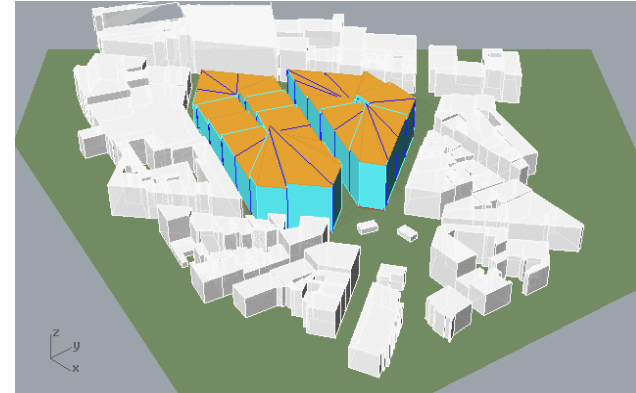
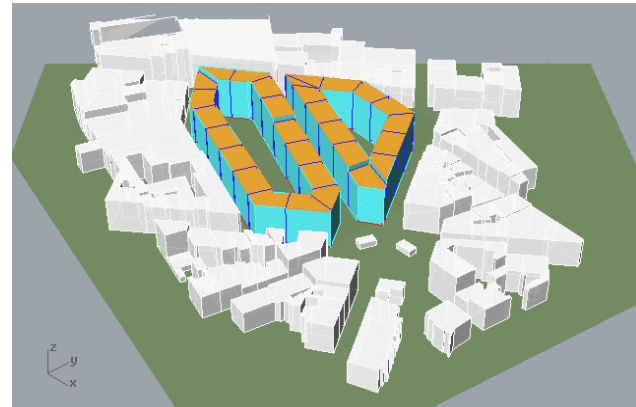
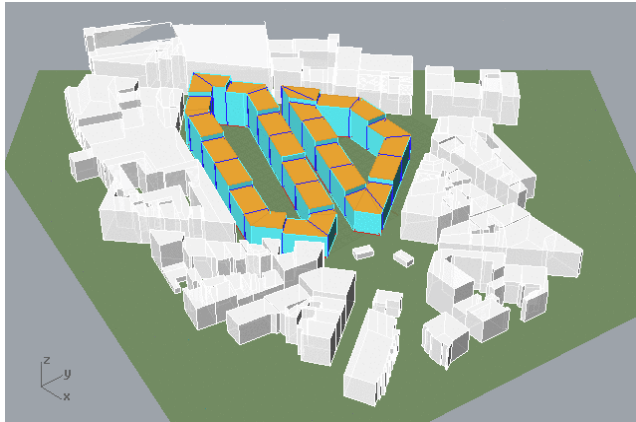


**Optimisation**  
Recherche des projets d'îlot  
optimaux

## Frontière de Pareto

Solutions compromis entre objectifs distincts : minimisation des besoins de chauffage et de climatisation et maximisation du potentiel solaire sur les toitures

# OPTIMISATION MULTICRITERES



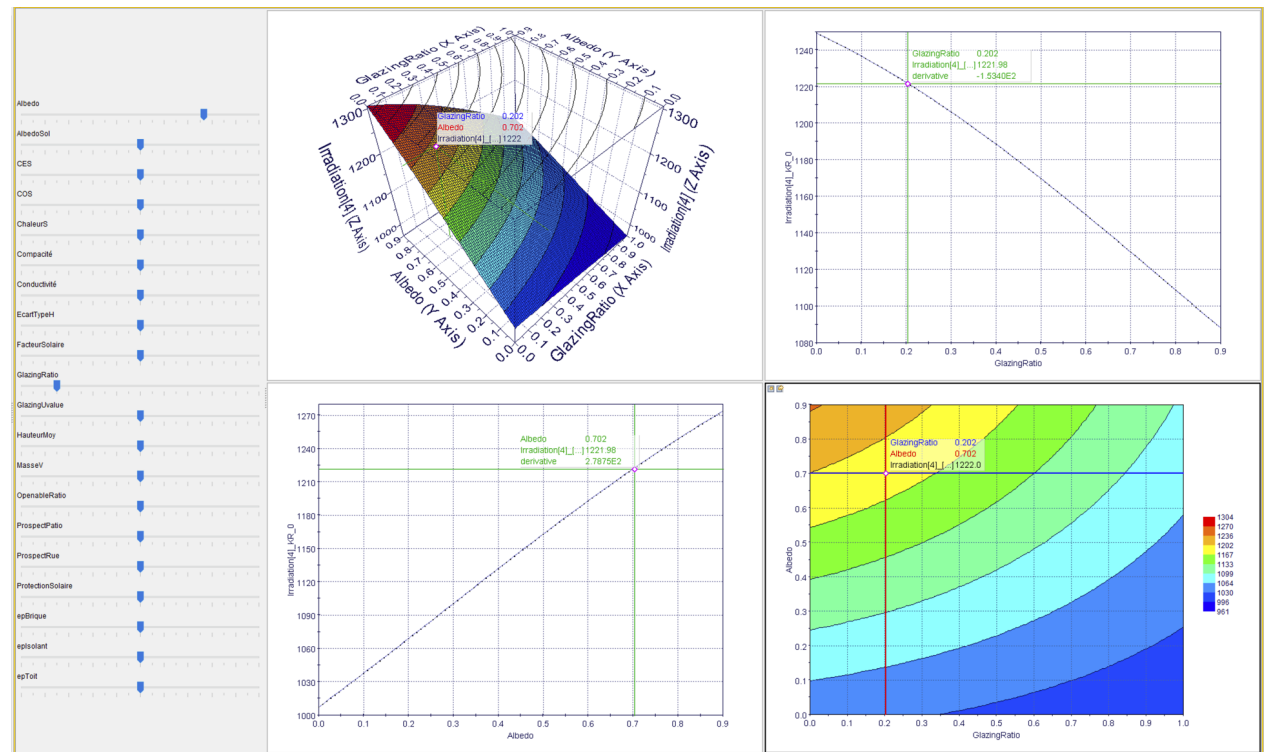
| PARAMÈTRES/<br>VARIANTES   |                          | Cas de base                 | Variante 1 (1320)      | Variante 2 (1202)      | Variante 3 (902)       |
|--|--------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|  |                          |                             |                        |                        |                        |
| MORPHOLOGIE LOT  | COS                      | 3,2                         | 3,7                    | 4,9                    | 6,8                    |
|  | CES                      | 0,75                        | 0,66                   | 0,65                   | 0,98                   |
|  | COMPACTITÉ               | 0,28                        | 0,23                   | 0,21                   | 0,13                   |
|  | PROSPECT MOYEN           | 2,1                         | 0,83                   | 1,09                   | 2,78                   |
|  | ECART-TYPE HAUTEUR       | 4,05                        | 3,5                    | 1,5                    | 4,9                    |
|  | HAUTEUR MOYENNE          | 17,9                        | 17,3                   | 22,6                   | 20,4                   |
|  | PROFONDEUR               | --                          | 12                     | 12                     | 22                     |
|  | H. GRADIN / ORIENTATION  | --                          | 24m-12m/90°            | 21m-24m/0°             | 30m-9m/-90°            |
| MATERIAUX  | RATIO VITRAGE            | 0,4                         | 0,3                    | 0,7                    | 0,1                    |
|  | TYPE PAROIS VERTICALES   | Brique non isolée           | Bois isolé             | Brique isolée          | Béton isolé intérieur  |
|  | TYPE PAROIS HORIZONTALES | Charpente faiblement isolée | Dalle isolée extérieur | Dalle isolée intérieur | Dalle isolée intérieur |
|  | EPAISSEUR MAÇONNERIE     | 0,30                        | 0,20                   | 0,30                   | 0,20                   |
|  | EPAISSEUR ISOLANT        | 0,02                        | 0,3                    | 0,23                   | 0,02                   |
|  | FACTEUR SOLAIRE VITRAGE  | 0,4                         | 0,10                   | 0,30                   | 0,30                   |
|  | COEFFICIENT U VITRAGE    | 1,6                         | 2,0                    | 5,0                    | 1,0                    |
|  | ALBEDO                   | 0,7                         | 0,4                    | 0,3                    | 0,1                    |
| ALBEDO SOL   | 0,7                      | 0,5                         | 0,3                    | 0,1                    |                        |
| <b>BESOINS DE CHAUFFAGE</b><br>(KWH/M³.AN)<br><b>BESOINS DE CLIMATISATION</b><br>(KWH/M³.AN)<br><b>SOLARISATION</b><br>(KWH/M² Toiture.AN) |                          | 38,8                        | 0,03                   | 0,0                    | 52,4                   |
|  |                          | 14,1                        | 51,5                   | 261,9                  | 0,01                   |
|  |                          | 1178                        | 1717                   | 1740                   | 1697                   |

## Tâche 5

### Construction d'une base de connaissances pour l'aide à la décision

#### 1<sup>e</sup> approche : la surface de réponse dans modeFRONTIER

- Permet le concepteur de choisir le meilleur projet selon les critères qui le conviennent le plus.
- Le modèle permet de calculer rapidement la nouvelle variante (par interpolation) à partir le jeu de variantes optimales initiales, tout en intégrant les nouvelles valeurs souhaitées.



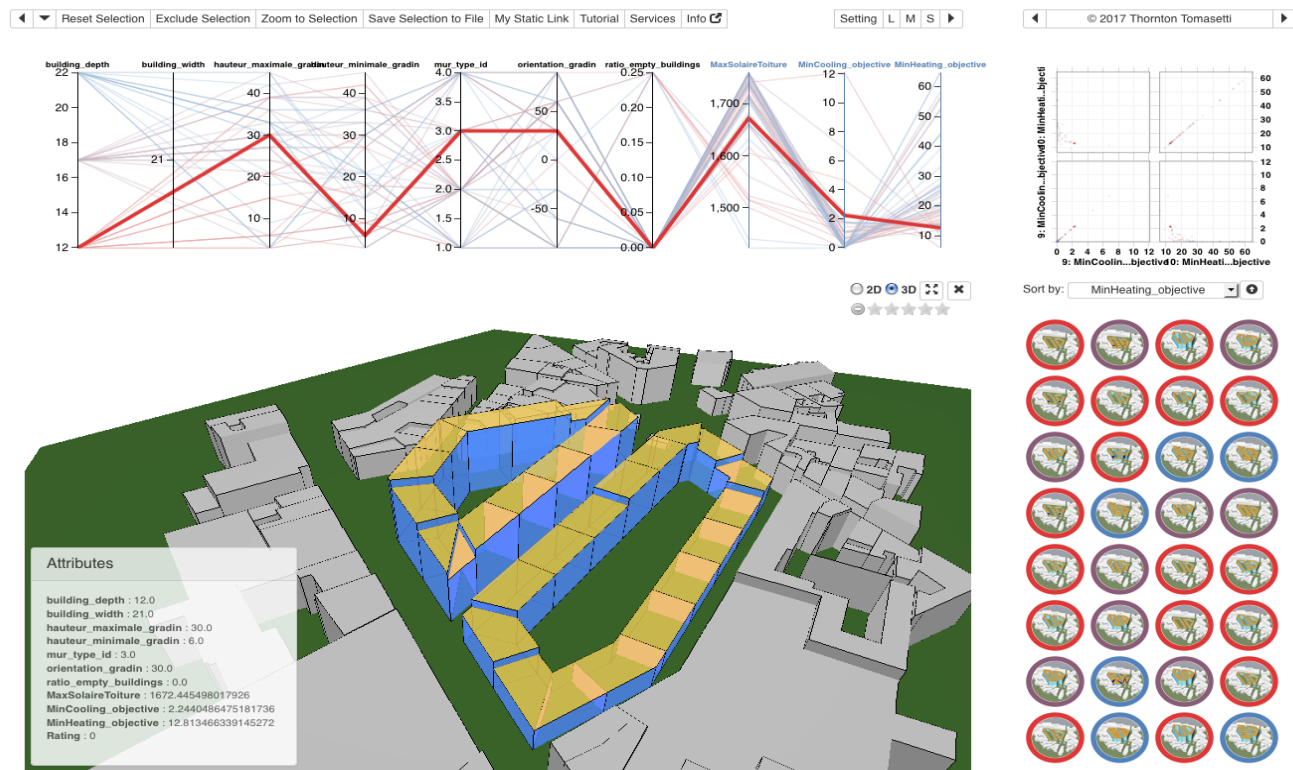
## Tâche 5

### Construction d'une base de connaissances pour l'aide à la décision

#### 2<sup>e</sup> approche : base de données interactive libre en ligne

- L'espace de projets urbains a été généré dans l'environnement virtuel *DesignExplorer*
- Le concepteur peut parcourir et accéder interactivement à une information synthétique mais aussi exhaustive sur l'ensemble des variantes obtenues pour chaque archétype urbain.

DesignExplorer

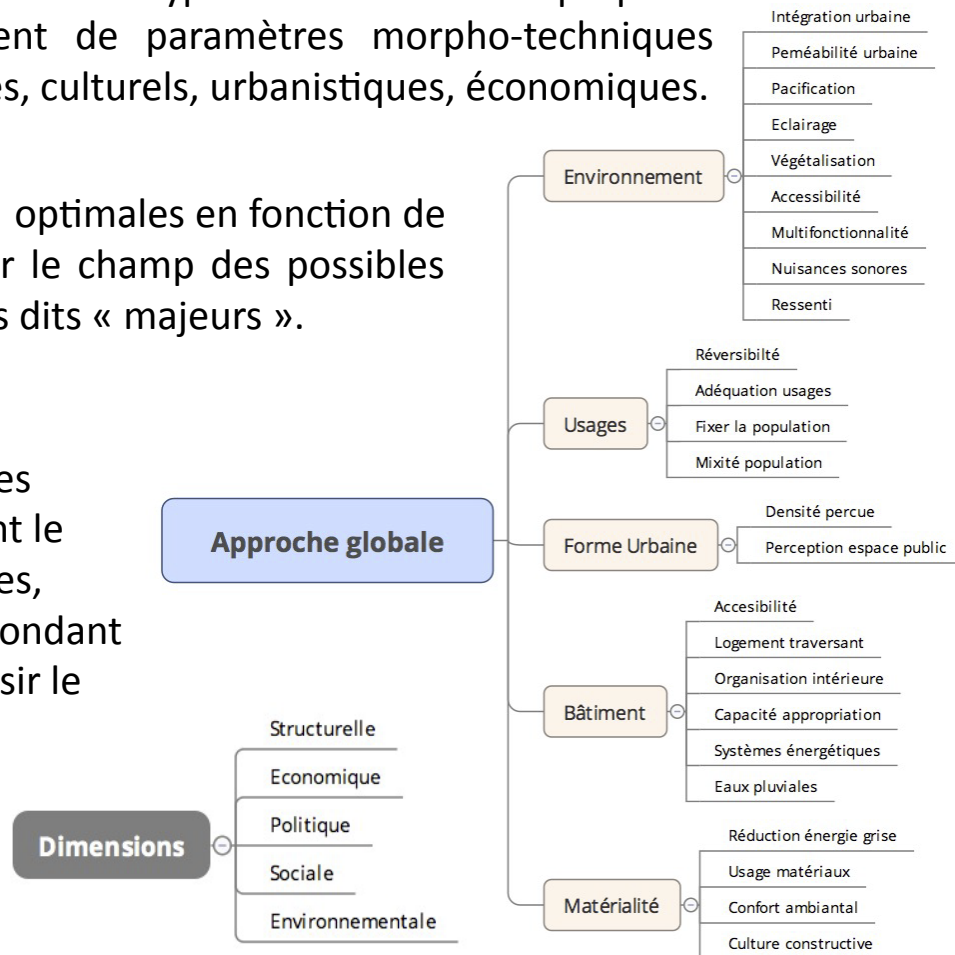


## Tâche 4

### Une analyse croisée (recherche et décision) des résultats

Développer une méthode robuste permettant pour un archétype urbain donné de proposer des variantes optimales en fonction non seulement de paramètres morpho-techniques quantifiables, mais encore de paramètres sociologiques, culturels, urbanistiques, économiques.

- Dans une première étape, proposer des variantes optimales en fonction de critères morpho-techniques quantifiables. Limiter le champ des possibles par une approche par optimisation sur ces critères dits « majeurs ».
- Dans une seconde étape, choisir parmi les variantes optimales précédentes, les variantes qui répondent le mieux à une ensemble de paramètres sociologiques, culturels, urbanistiques, ou économiques, correspondant à la demande des acteurs urbains concernés. Choisir le ou les variantes optimales en tenant compte d'un ensemble de critères afférents dits « mineurs ».



# ANALYSE MULTICRITERES

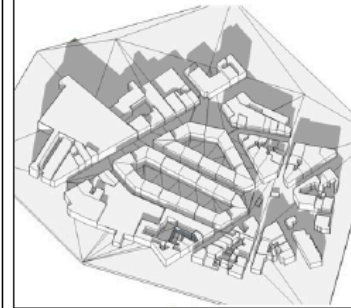
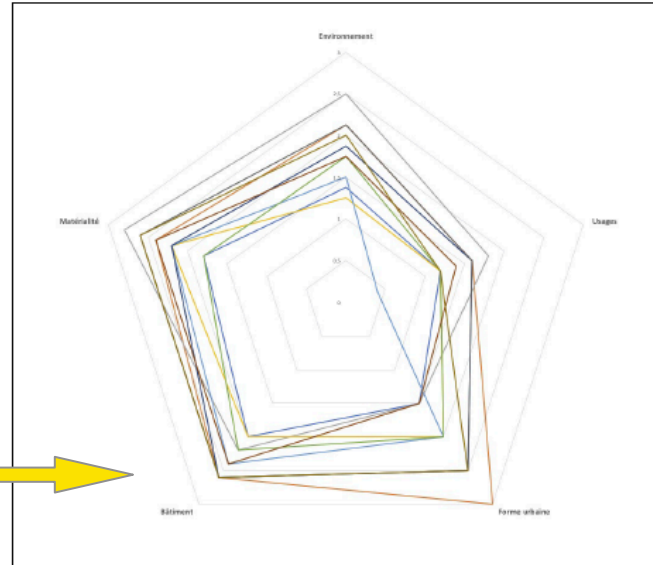
## Tâche 4

Une analyse croisée (recherche et décision) des résultats

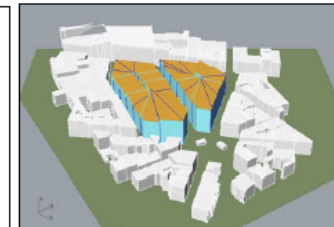
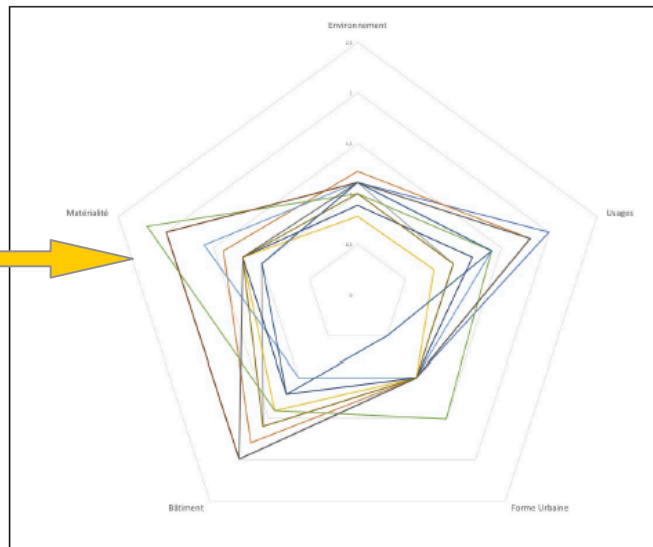
### Approche descriptive basée sur des diagrammes radars par thématique abordée

Evaluation des variantes énergétiques par différents acteurs urbains pour le quartier Belfort :

**Variante 1 et 2 (optimales)** : chute drastique des consommations de chauffage ; consensus sur la matérialité; très peu adaptées aux usages; véto sur la capacité à fixer la population et la mixité sociale.



**Variante 3** : forte densité et fort potentiel d'économie de climatisation en été ; indicateurs bâtiment et matérialité sont son point fort ; fort potentiel de mixité ; conflits d'usages relevé.





## MultipliCités en 6 plus-values ou actions innovantes :

- La définition des archétypes urbains qui permet de transposer des règles expertes à un large spectre typologique de villes européennes.
- La mise au point d'un outil d'évaluation énergétique multi-échelle.
- Le travail commun sur l'intégration dans les pratiques architecturales et urbaines au travers d'ateliers participatifs.
- Une étude de sensibilité énergétique de chaque archétype urbain mettant en avant les facteurs urbains et architecturaux les plus pertinents pour le projet.
- Une optimisation multidisciplinaire de chaque archétype urbain à partir du croisement d'un outil de paramétrisation de la forme et d'un modèle énergétique multiscalair.
- Une réflexion commune chercheurs – acteurs sur l'évolutivité des archétypes urbains pour ouvrir, focaliser et limiter le champ des possibles au filtre croisé des modèles et de la pratique.

Multiplicités propose de nouvelles méthodes de travail produites par des équipes chercheurs-acteurs élargies, seules garantes d'un changement de paradigme visant à la prise en compte de nouvelles échelles spatiales, temporelles, thématiques et disciplinaires dans le projet urbain.

Vers des pistes multidisciplinaires qui visent à :

- affiner la production de connaissances nouvelles exploitables en situation de projet urbain, sur l'optimisation énergétique des quartiers,
- adapter la méthodologie développée à d'autres archétypes urbains, ou à d'autres villes sous d'autres climats.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

