
Vers une ville énergétiquement résiliente

L'exemple
de la dorsale Est
de Paris

Rapport final novembre 2018

III Annexes

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

**Programme
interdisciplinaire de recherche
Ignis mutat res**

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

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

Session 2012 - 2014

SOMMAIRE - TOME III

Annexes

7 Annexe 7

Rapport de l'étude du DPEA «
Architecture post-carbone »

131 Annexe 8

Rapport « Forme architecturale et
performances énergétiques. Étude
paramétrique », par Mélanie Manguin,
École des Ponts ParisTech.

187 Annexe 9

Données, rapport de stage post DPEA,
Laure Pédot.

Annexe 7

Rapport de l'étude du DPEA PoCa « Architecture post-carbone »

Introduction

Intégrer le fil d'une étude : Ignis Mutat Res

Cette étude menée par l'équipe du DPEA Architecture Post-carbone s'insère dans la continuité de la recherche Ignis Mutat Res (IMR), « Vers une ville énergétiquement résiliente ». La recherche IMR consiste à mettre en exergue la relation entre la forme d'un bâtiment et ses performances énergétiques. Notre étude intervient à la suite du rendu intermédiaire d'IMR, avec la nécessité d'un retour sur le choix des typomorphologies. Il nous a été demandé de vérifier les indicateurs morphologiques trouvés lors de la phase précédente de la recherche, et éventuellement d'en dégager de nouveaux. Pour cela, il nous a été proposé d'utiliser des outils informatiques de modélisation et de prévision.

L'équipe du DPEA Architecture Post-carbone est composée de cinq architectes. Une ingénierie de l'Ecole des Ponts Paris-Tech, effectuant son stage scientifique, apportait un complément à notre équipe. Intégrant le programme à mi-parcours, il nous a fallu assimiler les objectifs de la recherche et nous réapproprier le sujet.

Notre problématique est la suivante :

Dans le cadre du logement, en quoi la morphologie a-t elle un rôle à jouer dans la réduction des consommations énergétiques ?

A travers l'élaboration d'une méthode simple et concrète pour corrélérer la performance énergétique et la forme construite, notre étude s'est focalisée sur l'impact des différents facteurs morphologiques et les consommations énergétiques.

Étapes précédentes

- Après la sélection de trois typologies représentatives de la Dorsale Est (pavillon, barre, tour), le master Matières à Penser a réfléchi à une série de scénarios de réhabilitation à appliquer à chacune des typologies.
- A la suite de ces travaux, l'effet relatif de ces transformations sur les besoins énergétiques des logements a été quantifié.
- Un étudiant ingénieur de l'ENPC a évalué les outils de mesure des besoins énergétiques. L'aboutissement de son travail a orienté l'équipe IMR vers le choix du moteur de calcul EnergyPlus.
- L'équipe IMR s'est attaché à décrire les bâtiments en corrélation avec leurs performances énergétiques par l'intermédiaire d'indicateurs de forme tels que la Morphologie, la Porosité, etc. Cela a permis de commencer un classement des typologies.

Objectifs

L'objectif de notre travail consistait à vérifier les indicateurs morphologiques trouvés lors de la phase précédente de la recherche. Nous avons orientés notre recherche vers la mise en évidence de paramètres morphologiques afin d'éventuellement dégager de nouveaux indicateurs. Pour cela, nous avons cherché à analyser l'influence de ces paramètres morphologiques sur les consommations énergétiques. Nous nous sommes concentrés essentiellement sur les besoins chaud et froid qui constituent les postes de consommation principaux. Nous avons tenté de nuancer les résultats en tenant compte d'autres besoins énergétiques, tels que la ventilation et l'éclairage naturelle.

Nous jugions important de développer un système permettant d'intégrer l'influence de l'orientation sur ces paramètres. Pour cela, il fallait identifier différents attributs caractérisant la forme d'un bâtiment. Nous nous sommes fixés l'objectif de léguer un programme de modélisation qui permettra de diagnostiquer des situations réelles.

Méthode

Nous avons développer une gestion des paramètres sur Grasshopper afin d'analyser avec le moteur de calcul EnergyPlus l'influence de ces derniers. Nous avons établi des comparaisons de ces simulations afin de dégager de premières conclusions.

Sommaire

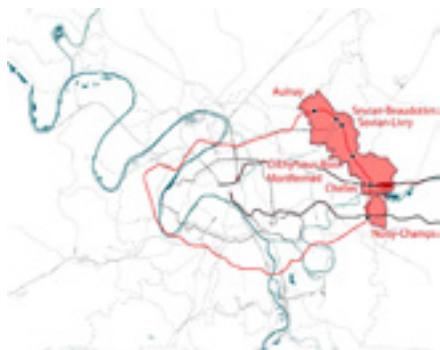
Dans le cadre du logement, en quoi la morphologie a-t elle un rôle à jouer dans la réduction des consommations énergétiques ?

1. Prendre connaissance du territoire de la dorsale Est en vue d'affiner et de redéfinir les typologies par gabarits.
2. Identifier les facteurs morphologiques influant sur les besoins énergétiques.
3. Définir les facteurs par un ensemble de paramètres.
4. Identifier et créer des cas d'études en faisant varier ces paramètres
5. Prévisualiser les effets de la porosité sur les besoins énergétiques.
6. Développer l'outil permettant la modélisation des cas d'études et le calcul des besoins énergétiques : un programme par facteur morphologique.
7. Pour chaque typologie, première analyse des résultats par facteur
8. Conclusion

1

Prendre connaissance du territoire de la Dorsale Est

Croissant de l'Est parisien

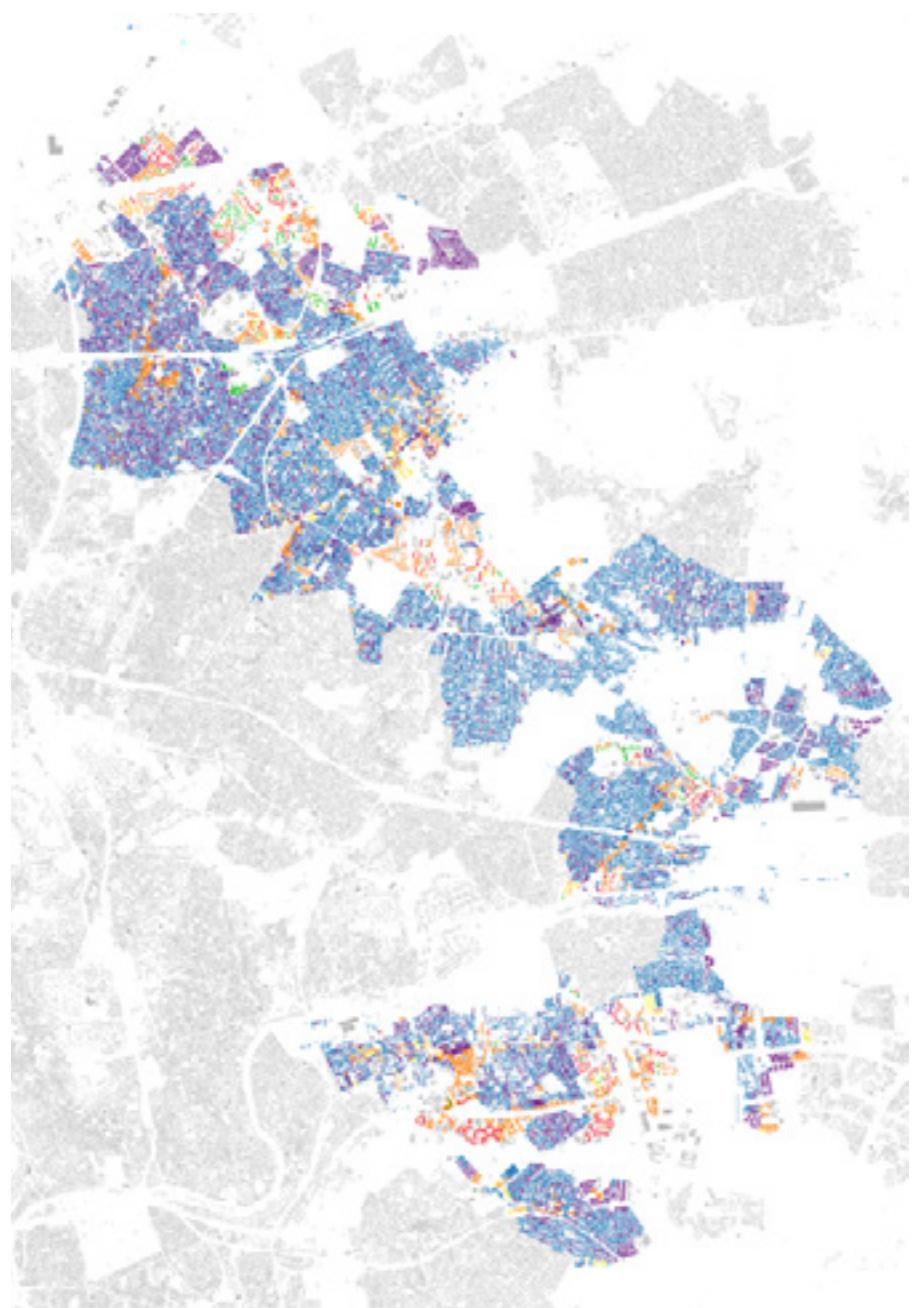


Le terrain de notre expérimentation est ancrées sur une situation existante : celle de la « Dorsale Est ». Ce terrain, clairement délimité dans la périphérie Est de Paris, regroupe huit municipalités. Déjà bien analysé et cartographié, il représente une grande diversité de logements. Cela en fait un enjeu de la réhabilitation énergétique et un bon prétexte de recherche.

La Dorsale Est: terrain d'étude de l'équipe de Yves Lion pour la Biennale d'architecture à Venise en 2012

État des lieux des formes d'habitat de la Dorsale Est

- Pavillon
- Maison mitoyenne
- Plot
- Immeuble
- Barre
- Tour



Carte de la répartition des différentes typologies de logement

État des lieux des formes d'habitat de la Dorsale Est

Dans le précédent rapport IMR, l'étude était menée sur la base de trois typologies de gabarit : le pavillon, la barre et la tour.

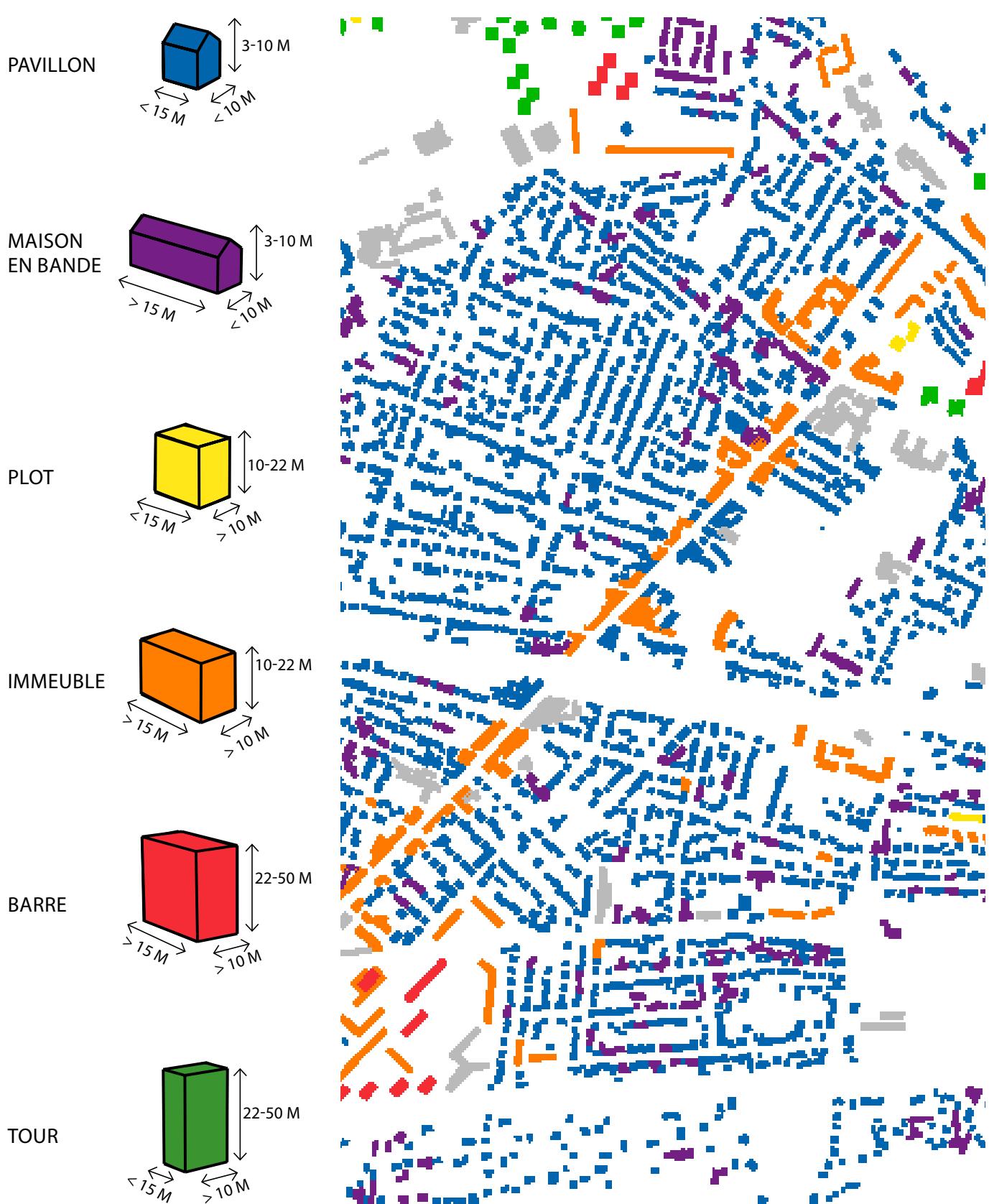
Le saut d'échelle que ce choix implique nous a semblé exclure un grand nombre de typologies de bâtiments.

Nous avons donc redéfini et affiné les formes habitées, aboutissant à six typologies, que l'on a caractérisé par des gabarits différents :

Pavillon	long. <15m	prof. <10m	haut. 3-10m
Maison mitoyenne	long. >15m	prof. <10m	haut. 3-10m
Plot	long. <15m	prof. >10m	haut. 10-22m
Immeuble	long. >15m	prof. >10m	haut. 10-22m
Barre	long. >15m	prof. <10m	haut. 22-50m
Tour	long. <15m	prof. <10m	haut. 22-50m

L'élaboration d'une carte de la répartition typologique du bâtiment nous a permis de constater que le type pavillonnaire est largement majoritaire sur le territoire.

On retrouve aussi un grand nombre de typologies intermédiaires, que l'on a développé au dessus, l'immeuble et la maison en bande.



Comment évaluer des éléments de morphologie ?

Après avoir identifié des éléments de morphologie comme le prospect, la surface vitrée et la géométrie du linéaire de façade, nous avons effectué un premier travail d'évaluation.

Pour cela, nous avons choisi parmi les 120 cas, les modèles les plus représentatifs des typologies identifiées précédemment afin de trouver une façon de visualiser et de comparer les valeurs mesurées.

Le pourcentage de vitrage :

On détermine quatre façades pour chaque orientation principale : Nord, Est, Sud et Ouest, puis on mesure la surface vitrée correspondant.

Le développé de façade :

On détermine le coefficient de forme du périmètre.

Le coefficient le plus petit correspond à des façades lisses. Plus le coefficient est élevé, plus les façades sont rugueuses.

Le contexte urbain :

On mesure des rapports de distance et de hauteur entre le bâtiment et son environnement. On détermine ainsi un masque solaire équivalent pour chacun des tissus urbains.

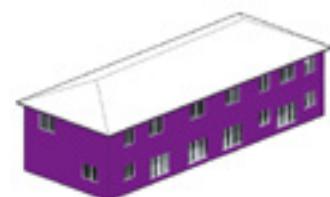
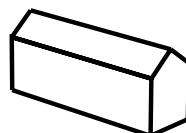
Présentir des éléments de morphologie

GABARIT EXEMPLE

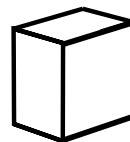
PAVILLON



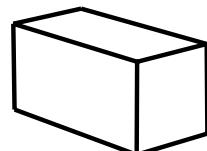
MAISON EN BANDE



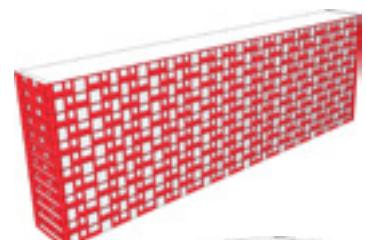
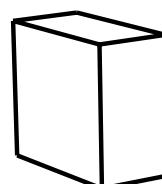
PLOT



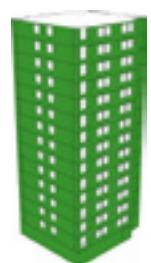
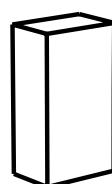
IMMEUBLE



BARRE

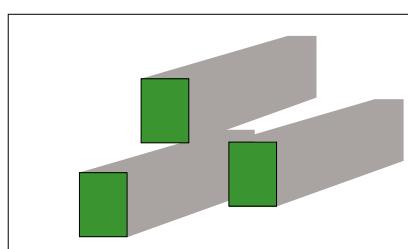
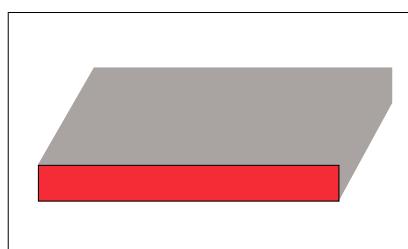
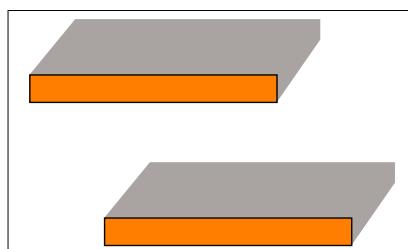
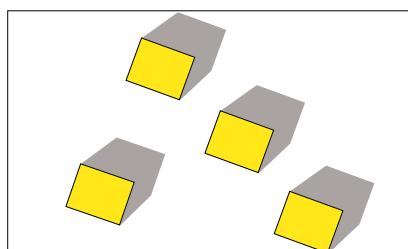
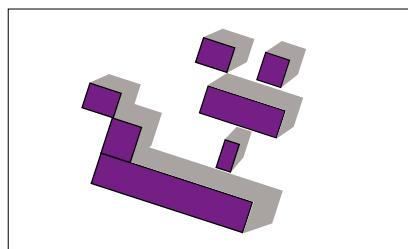
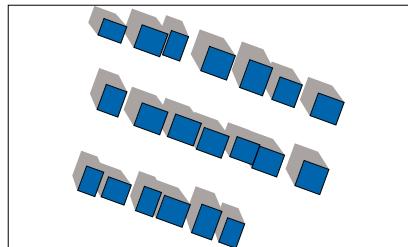


TOUR

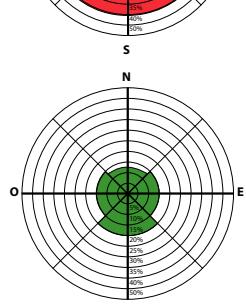
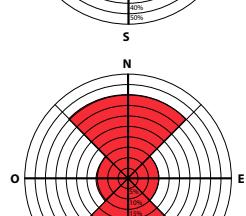
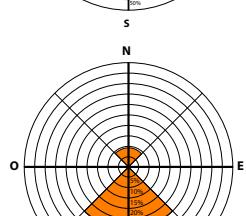
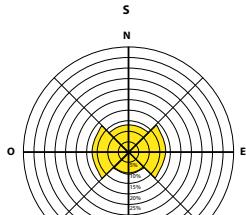
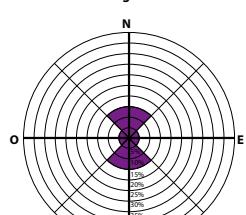
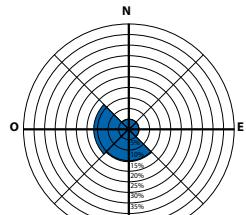


Ici légende explicative

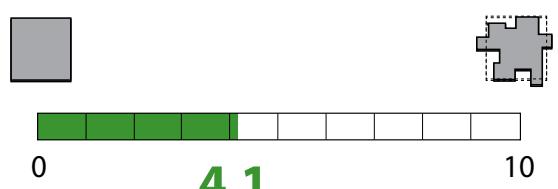
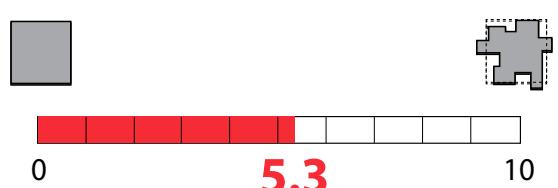
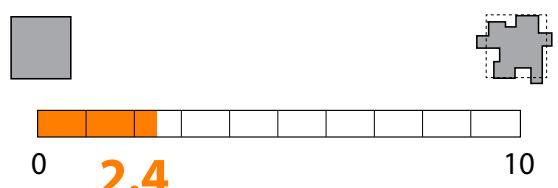
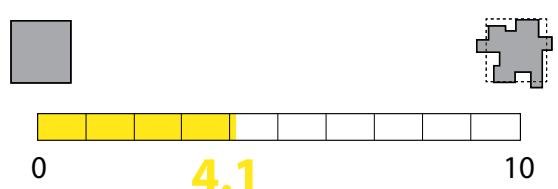
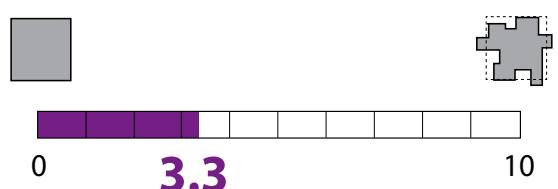
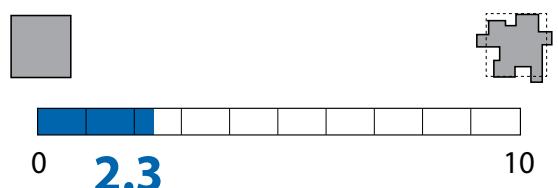
PROSPECT
ET MASQUE SOLAIRE



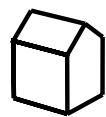
SURFACE VITRÉE &
ORIENTATION



SURFACE HABITABLE
SURFACE DE FACADE



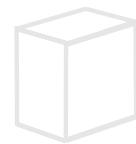
PAVILLON



MAISON
EN BANDE



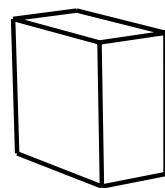
PLOT



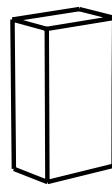
IMMEUBLE



BARRE



TOUR



Choix des typologies à étudier

Il s'est avéré que le panel choisi n'était ni représentatif ni pertinent. De plus entre le plot et la tour ainsi qu'entre l'immeuble et la barre, seul le nombre de niveaux diffère. De même, entre le pavillon et la maison en bande, c'est uniquement la mitoyenneté qui entre en jeu.

Nous nous sommes donc concentrés sur la caractérisation des facteurs morphologiques en traversant les trois typologies déjà mis en avant précédemment dans la recherche : le pavillon, la barre, la tour

La variation dimensionnelle n'est pas le propos de cette étude, elle ne doit pas être un critère déterminant. Il est préférable de s'abstraire du facteur de taille du bâtiment afin d'analyser uniquement l'influence de la morphologie. Nous avons donc déterminé un gabarit réaliste pour chaque typologie. Nous avons fixé un volume par typologie afin de les comparer entre elles.

Le pavillon	10m X 10m X 6m	soit 600m ³
La barre	56m X 15m X 18m	soit 15120m ³
La tour	15m X 15m X 27m	soit 6075m ³

Nous avons considéré l'entité bâtie dans son ensemble sans la décomposer par cellule de logement afin de ne pas perturber l'analyse morphologique.

Notons que, la typologie du pavillon sera à traiter avec attention notamment pour la toiture. En effet, le faible nombre de niveau induit une grande influence de cette cinquième façade. Pour le cas de la barre et de la tour, l'effet de la toiture sera négligeable. De plus, la barre peut être considérée comme une juxtaposition de tranches verticales. Et la tour peut être considérée comme un empilement de plateaux.

2

**Identifier
les facteurs morphologiques**

Présentir les éléments de morphologie

Pour comprendre l'influence de la forme d'un bâtiment, il a fallu décomposer la forme en différents attributs. Ce sont ces attributs que l'on nomme facteurs morphologiques.

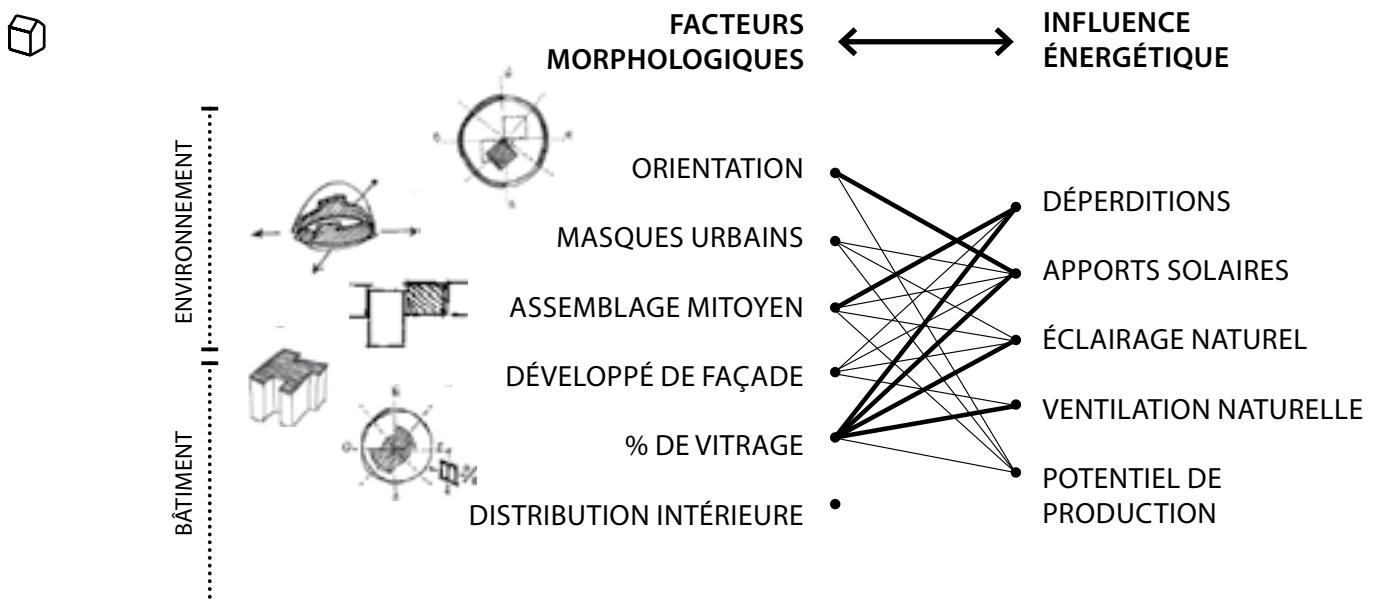
Nous avons donc commencé par lier les différents facteurs morphologiques identifiés à des sous-catégories énergétiques. Selon la typologie, certaines influences sont à priori plus importantes.

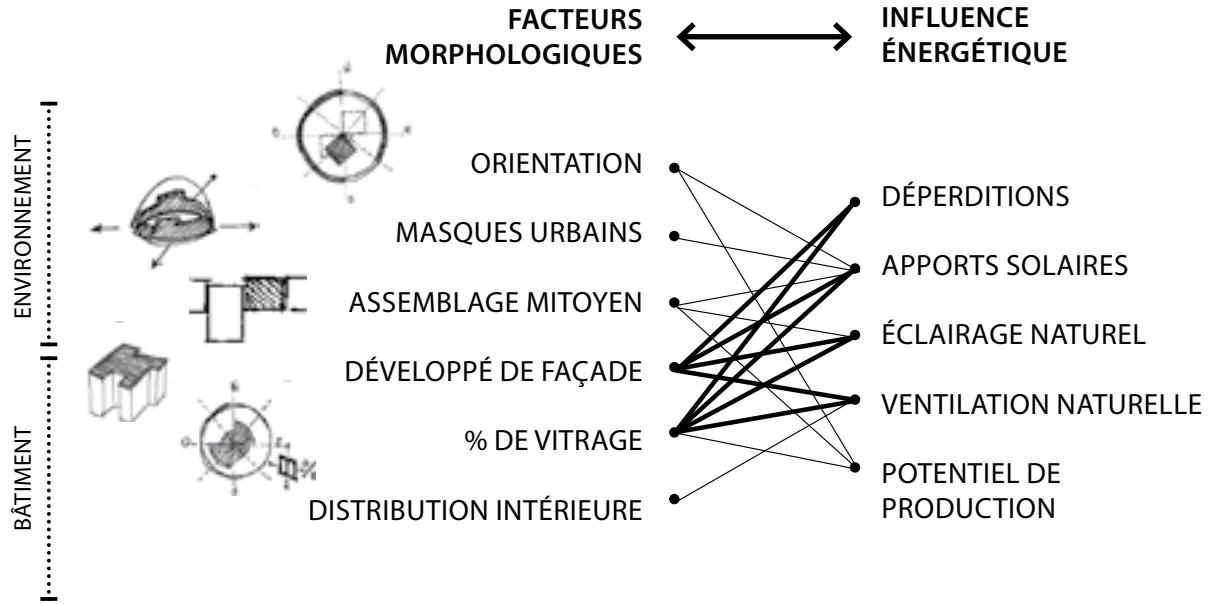
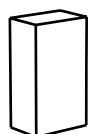
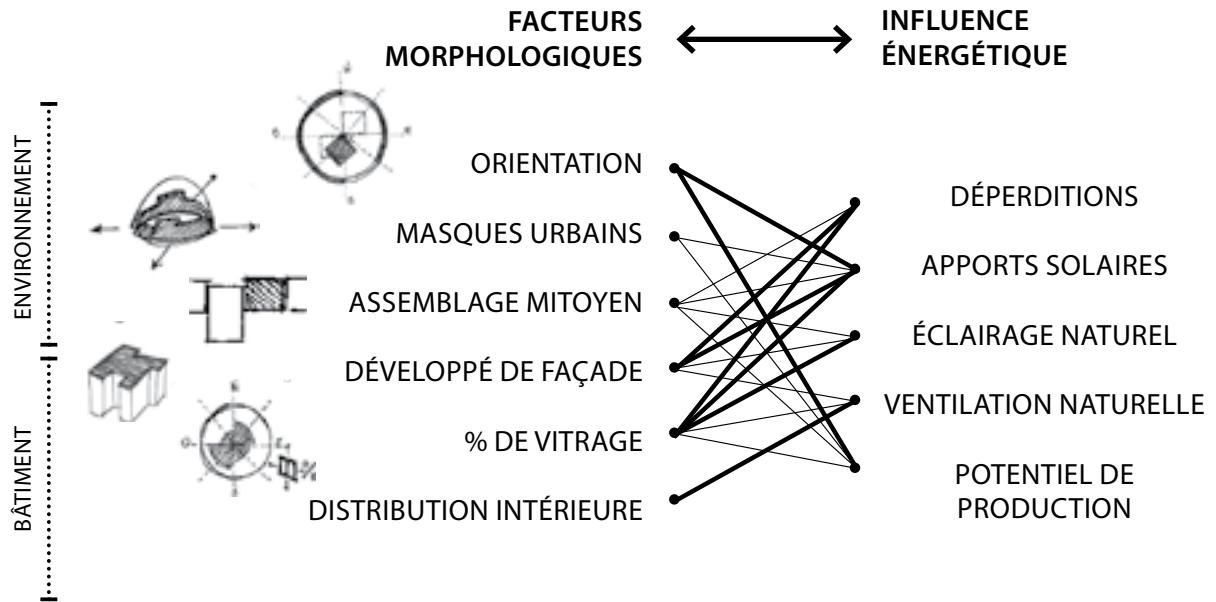
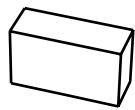
Pour chaque type de gabarit, nous avons pu alors anticiper le ou les facteurs morphologiques qui auraient le plus d'impact sur le bilan énergétique global.

À l'issue de cette liste, nous avons choisi de concentrer notre étude sur quatre facteurs morphologiques : les masques urbains, l'assemblage mitoyen, la porosité (% de vitrage) et la rugosité (développé de façade).

Notre point focal étant l'échelle du bâtiment, nous avons considéré uniquement l'enveloppe et les planchers. Ainsi, la distribution intérieure sort du cadre que l'on s'est fixé.

De plus, la position du soleil en fonction des heures et des saisons (orientation) ne peut être étudié indépendamment. C'est un facteur environnemental à coupler avec chacun des autres facteurs morphologiques.





Morphologie environnementale

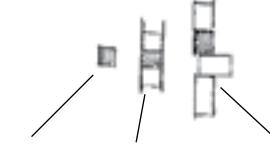
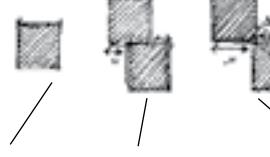
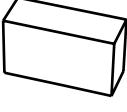
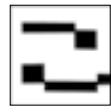
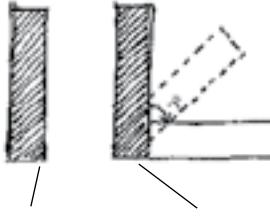
L'environnement influe sur les consommations énergétiques du bâtiment. La mitoyenneté et les masques proches sont étudiés par le facteur *assemblage*. Quand à l'influence de l'environnement urbain, nous proposons de faire l'étude des masques solaires.

Assemblage :

Etude de l'influence des bâtiments proches sur les déperditions et les apports solaires. Cela consiste à répertorier les différentes mitoyennetés.

Masques :

Analyse de l'impact de l'environnement urbain sur les apports solaires au niveau du plan de façade et à l'intérieur des volumes.

TYPE	TISSU URBAIN	ASSEMBLAGE	MASQUES
		 isolé accolé aggloméré	
		 isolé accolé en angle	
		 isolé en angle	

Morphologie architecturale

À l'échelle du bâtiment, la forme et le percement de l'enveloppe agit directement sur les apports solaires et les déperditions. Les deux facteurs étudiés sont la *porosité* et la *rugosité*.

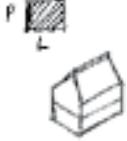
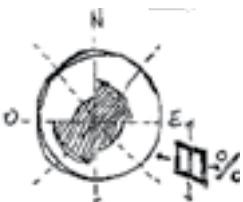
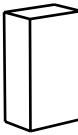
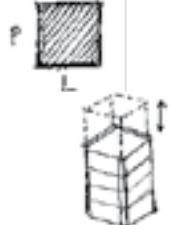
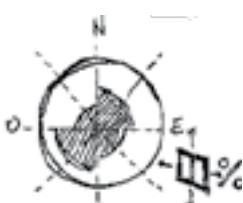
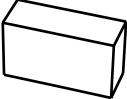
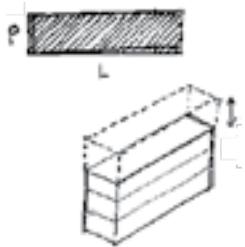
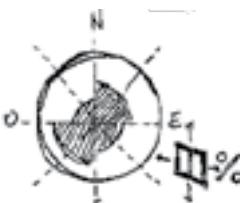
Porosité :

Dans la composition de l'enveloppe, on s'intéresse au pourcentage de surface vitrée en fonction de l'orientation. Ce paramètre joue un grand rôle dans ses échanges avec l'extérieur.

Nous garderons à l'esprit qu'il a un réel impact sur la qualité de l'éclairage naturel et donc sur le confort visuel ainsi que la consommation d'électricité.

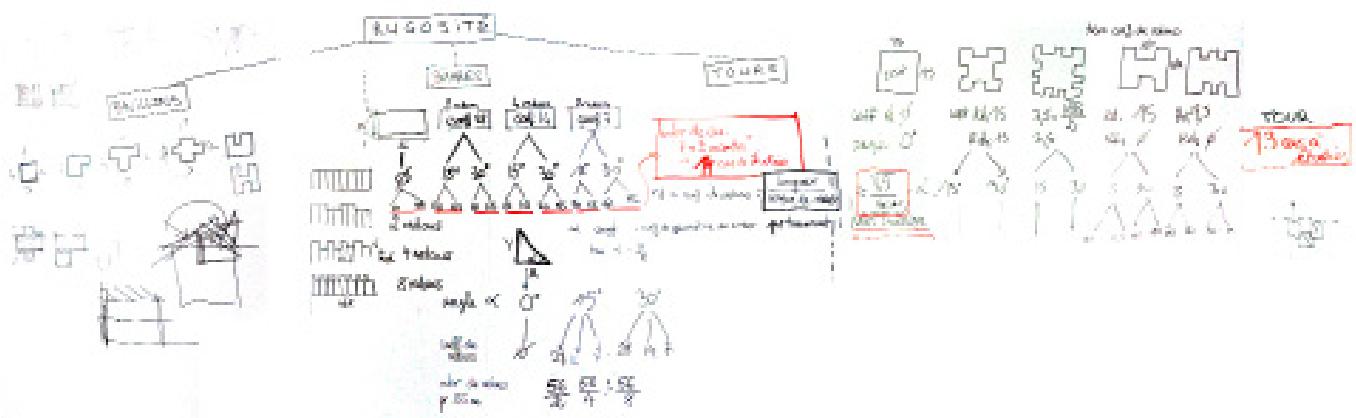
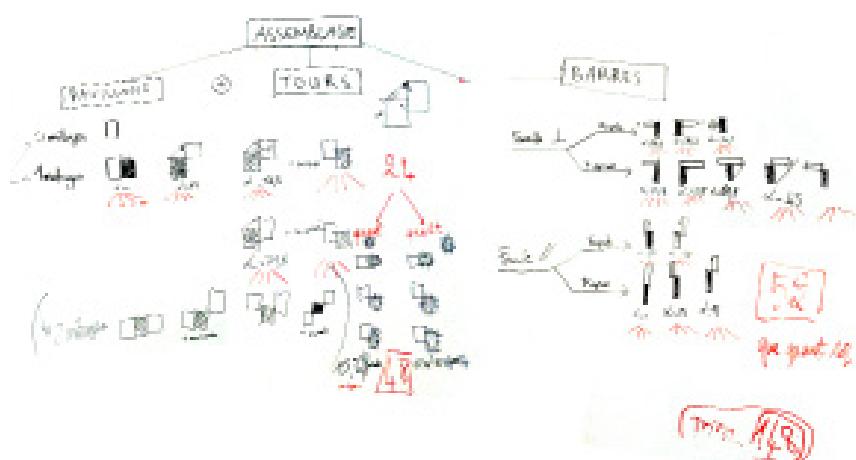
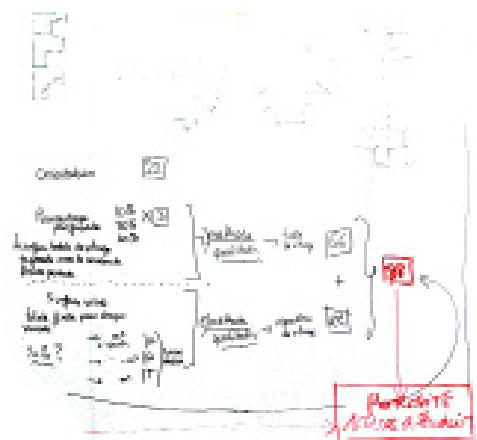
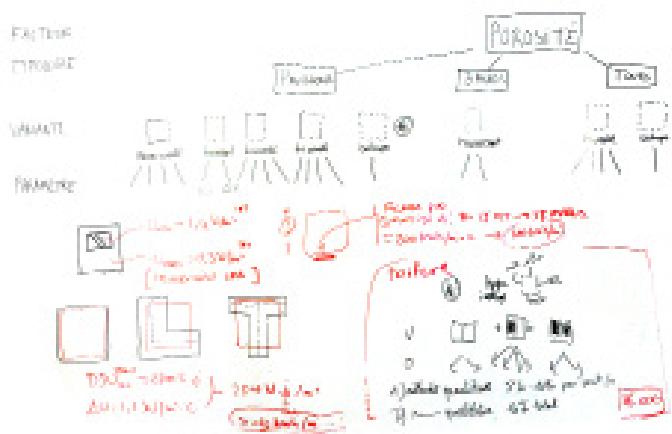
Rugosité :

Il s'agit d'étudier l'influence de l'augmentation du développé de façade et sa forme.

TYPE	GABARIT MOYEN	POROSITÉ PAR ORIENTATION	RUGOSITÉ
			
			
			

3

Définir les facteurs morphologiques



Processus de recherche

Nous nous sommes volontairement détachés des bâtiments existants de la Dorsale Est. La complexité du réel ne nous permettait pas d'étudier l'influence de chacun des facteurs morphologiques.

Nous avons élaborer des formes primitives que l'on a fait varier en fonction de paramètres que l'on a jugé pertinents. Ces variantes sont des formes génériques qui nous ont permis de saisir l'importance de l'influence d'un facteur.

Dans cette étude, nous avons analysé les facteurs indépendamment les uns des autres. Cela ne représente aucune situation réelle.

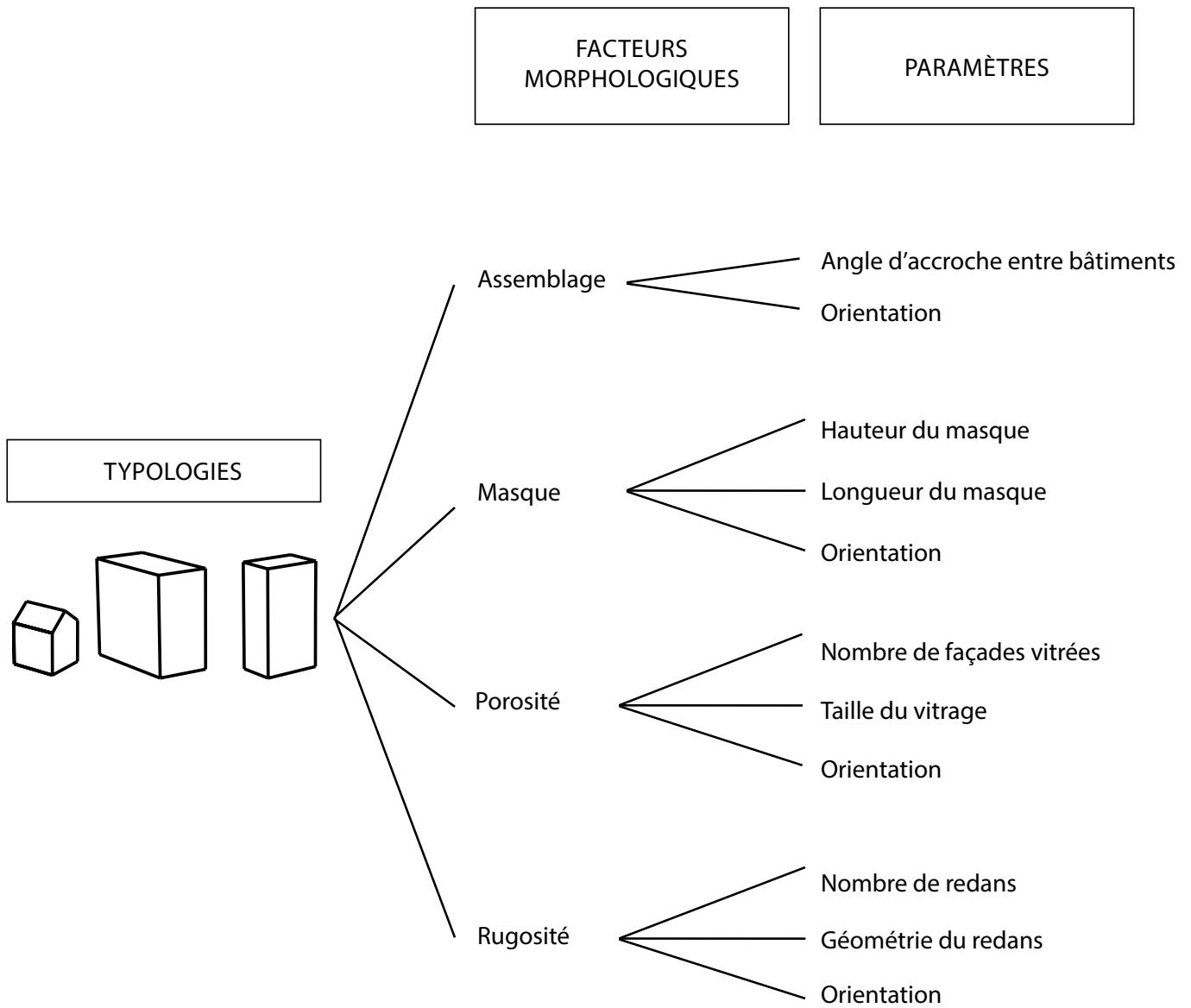
Pour établir des formes simples et comparables, nous avons dû fixer un certain nombre de paramètres :

- les propriétés physiques des matériaux et systèmes constructifs
- les données climatiques (projection pour 2030)
- les scénarios d'occupation
- les gabarits des typologies

Grâce à cette démarche, nous avons pu confirmer ou infirmer les intuitions d'architecte et par la même occasion créer un programme capable de nous guider pendant les premières phases d'esquisse du projet d'architecture.

Notons que, pour cette étude, nous ne recherchons pas la précision, ni de valeurs absolues. Il s'agit de dégager des grandes tendances.

Afin d'étudier seulement l'influence d'un facteur, nous avons cherché à minimiser l'influence des autres. Pour cela nous avons fixé des données moyennes.

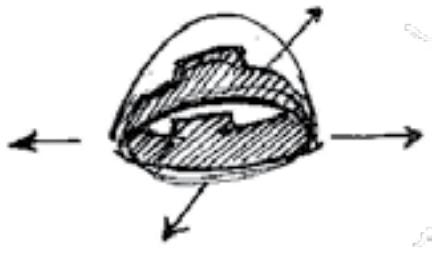


4

**Identifier
et créer des cas d'études**

en faisant varier les paramètres

Masques



Le facteur masque consiste à étudier l'influence de l'environnement sur les rayonnements solaires en direction du volume étudié.

Il s'agit de quantifier l'effet d'un masque sur un volume fixe et selon son orientation et de nuancer l'influence de ce masque selon la période de l'année.

Le volume étudié est modélisée par un cube percé d'un vitrage, qui couvre 50% de la surface d'une face. Le masque est fixé à 10m d'une des façades. Pour définir le masque, on part d'une surface carré unitaire que l'on redimensionne. Nous pouvons faire varier la hauteur du masque en six valeurs différentes que nous avons nous-même définies.

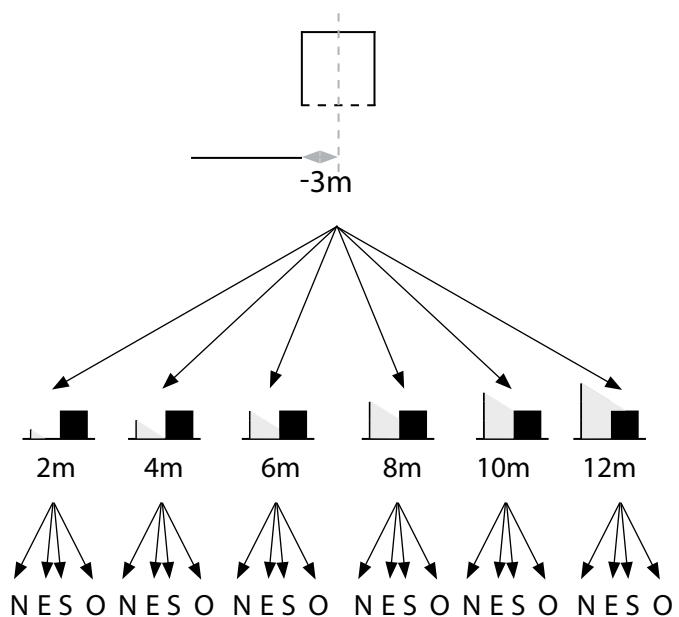
Ensuite, nous définissons la largeur de la même manière que pour la hauteur de masque. Cinq valeurs ont été définies. Nous nous attacherons à ne pas omettre le cas où le masque est inexistant.

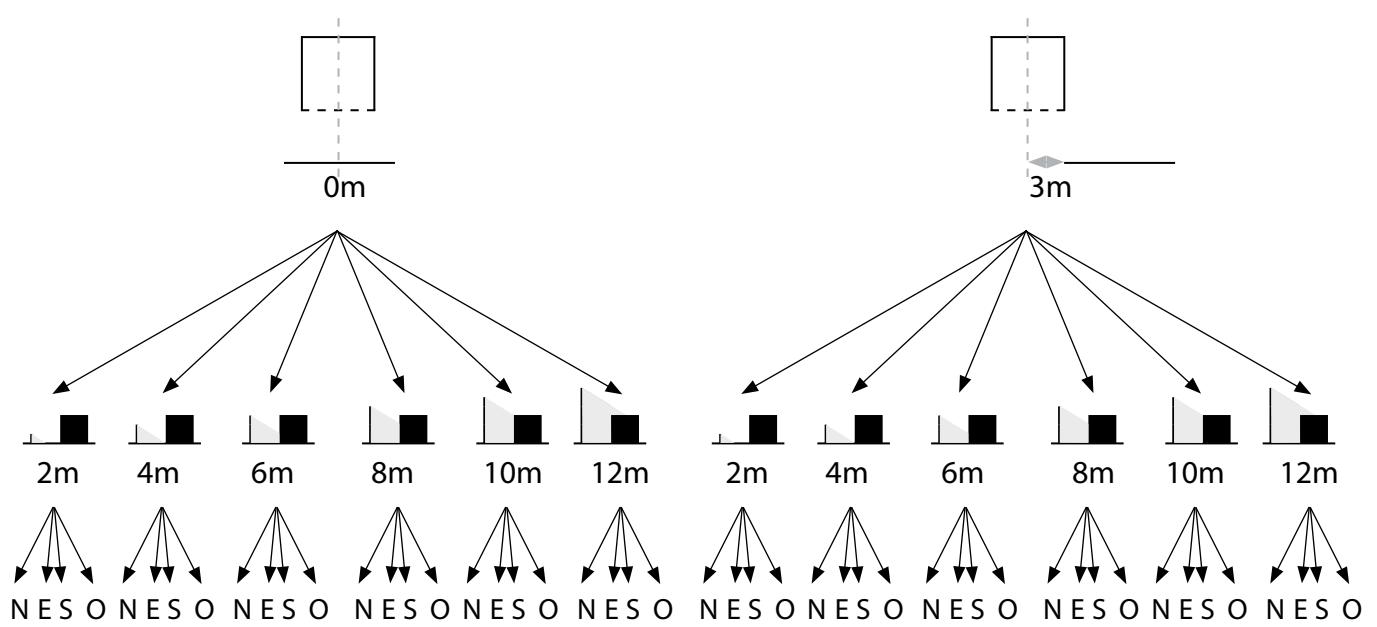
Dans le cadre de l'étude de l'existant, il nous a paru indispensable d'étudier les cas de figure où le masque solaire est désaxé du volume étudié. Cela permettra de mesurer l'inégale composition du rayonnement solaire reçu (plus ou moins de rayons directs). Pour résumer, nous avons défini trois paramètres à faire varier (hauteur, largeur, axe).

Pour l'ensemble de ces cas, nous avons défini deux simulations : l'une en été et l'autre en hiver. Il est important de distinguer les deux saisons. Elles sont caractérisées par des angles de rayonnements différents mais aussi par des besoins différents. En effet, en été, on cherche plutôt à se protéger des rayonnements directs tandis qu'en hiver, on cherche à maximiser les apports solaires.

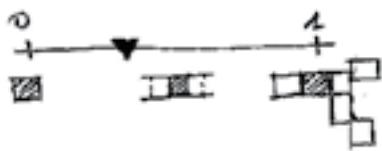
L'étude sera donc composée de 36 cas.

Masques





Assemblage



Le facteur d'assemblage consiste à étudier l'influence de la mitoyenneté sur les déperditions et les apports solaires. Pour étudier ce paramètre, nous avons fixé certaines hypothèses pour obtenir des résultats plus significatifs. Tout d'abord, le volume étudié est une copie parfaite du volume mitoyen. Nous nous concentrons ainsi sur une mitoyenneté par typologie. Autrement dit, un pavillon mitoyen avec un autre. L'assemblage de plusieurs typologies ne semblait pas être révélatrice de situations courantes. L'étude de l'assemblage se fait à partir de valeurs de mitoyenneté fixées par l'angle entre le volume étudié et son mitoyen. De plus, on considère une porosité de 15% pour chaque façade du bâtiment.

Tours et Pavillons

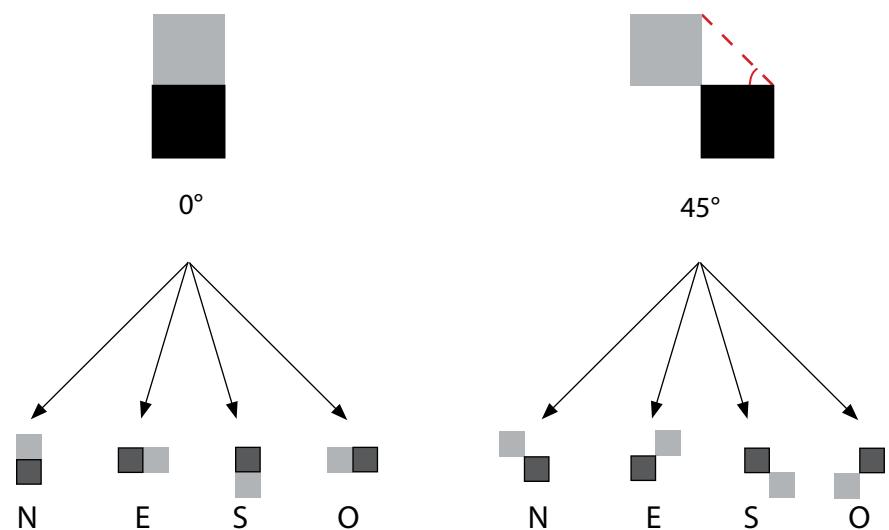
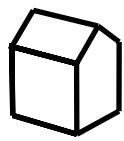
Pour les tours et les pavillons dont le plan est carré, les cas d'assemblage sont les mêmes. Nous faisons varier uniquement l'angle de mitoyenneté et l'orientation.

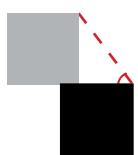
Barres

Ayant un plan rectangulaire, la barre possède plus de cas d'assemblage. Tout d'abord, les deux volumes peuvent être assemblés le long de la façade du volume étudié ou perpendiculairement au pignon. Notons que le plan étant symétrique, nous pouvons dupliquer le nombre de cas par effet miroir.

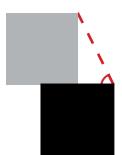
La totalité des assemblages que nous avons choisi représente 96 cas d'étude.

Assemblage

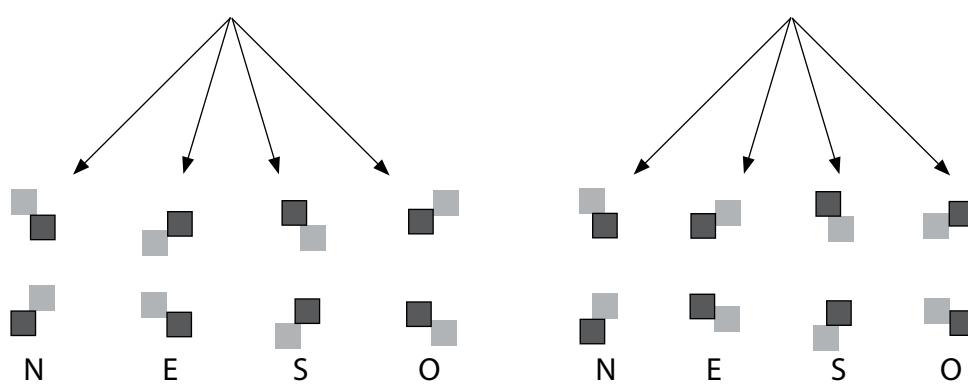




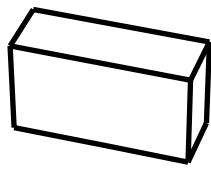
56.3°



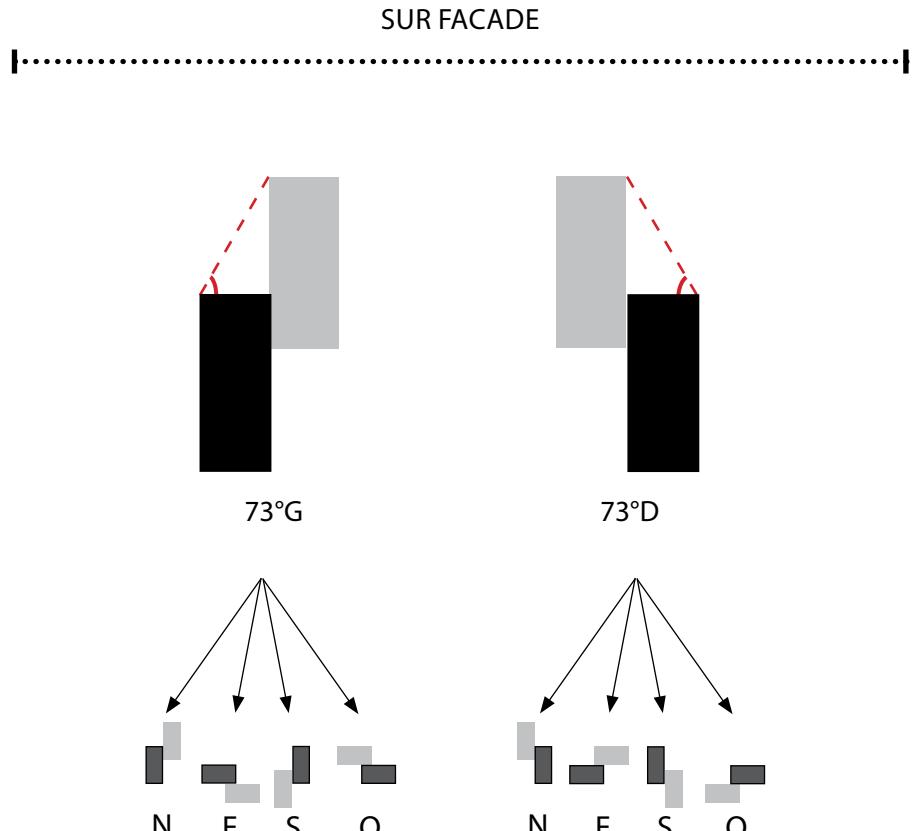
71.6°



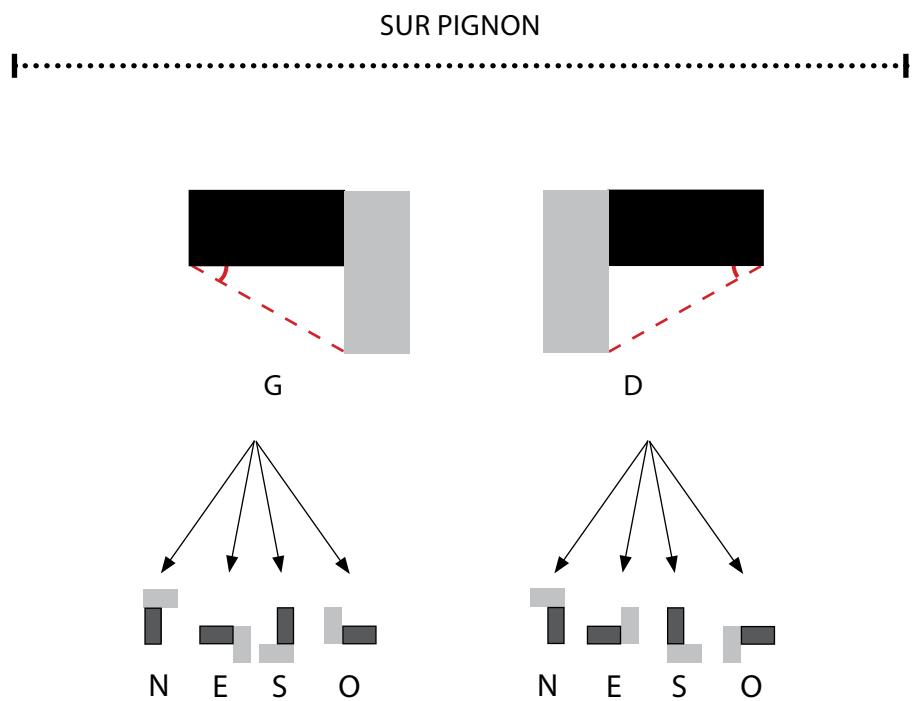
Assemblage



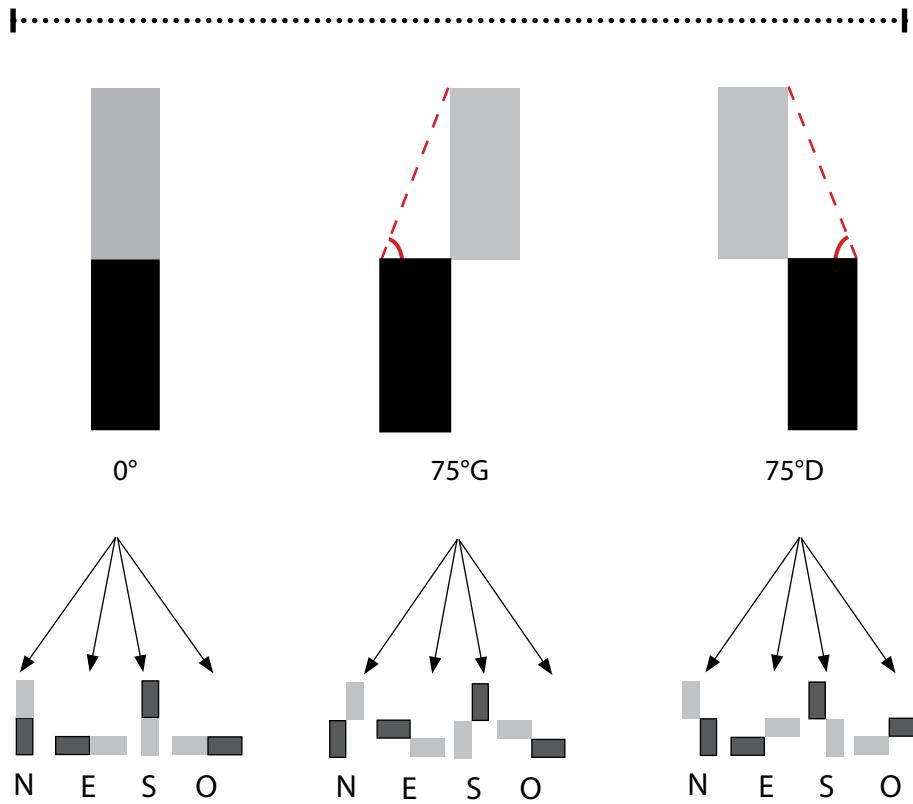
ASSEMBLAGE
PARALLÈLE



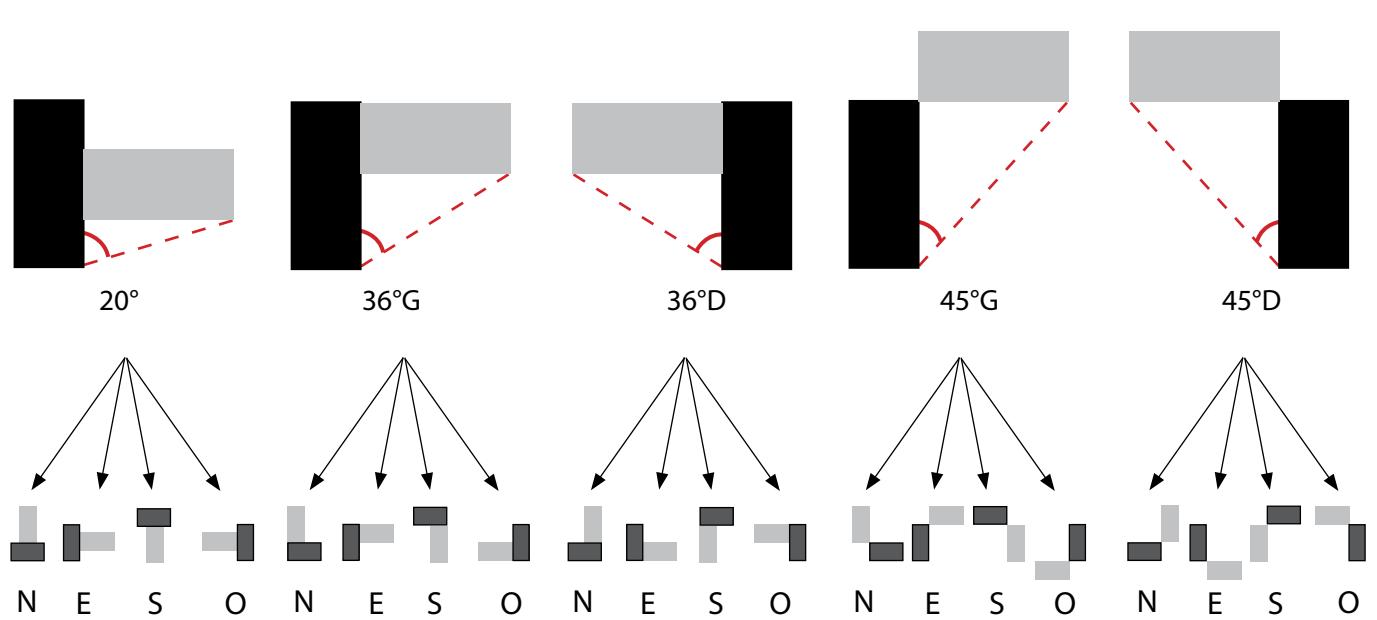
ASSEMBLAGE
PERPENDICULAIRE



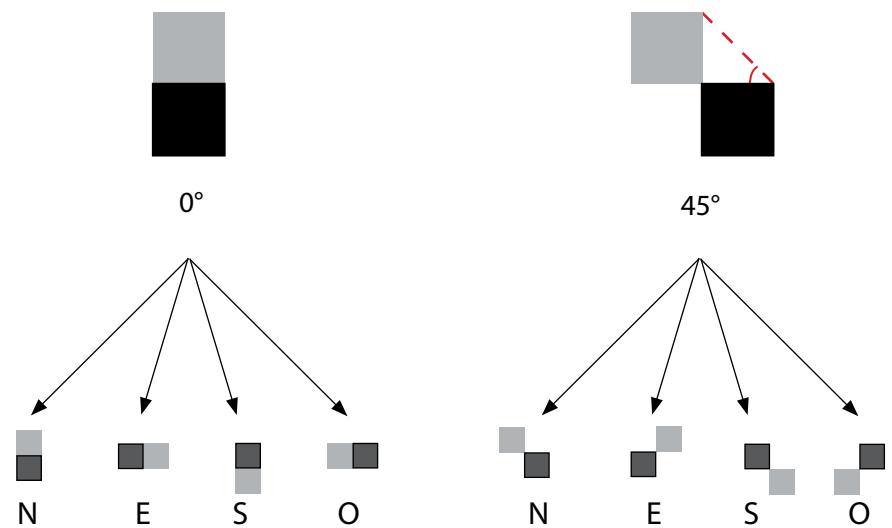
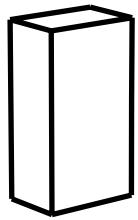
SUR PIGNON

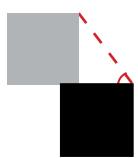


SUR FACADE

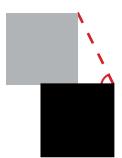


Assemblage

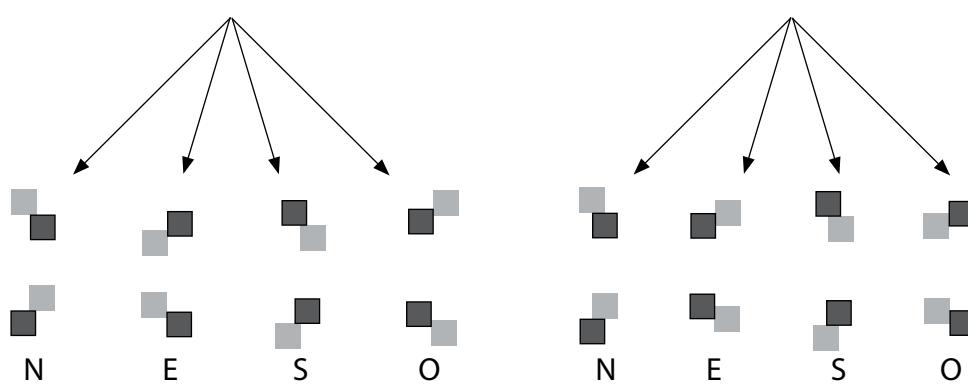




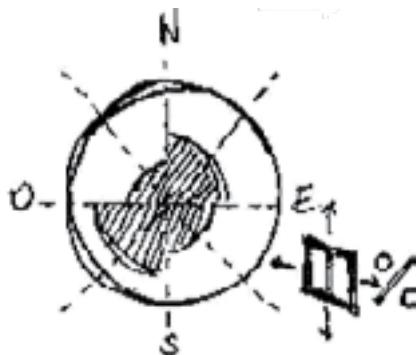
56.3°



71.6°



Porosité



Le facteur de porosité consiste à étudier l'influence du pourcentage de vitrage sur les consommations énergétiques.

Dans la composition de l'enveloppe, nous nous sommes intéressés uniquement à la surface vitrée en fonction de l'orientation. Ce paramètre joue un grand rôle dans les échanges avec l'extérieur (apports et déperditions). De plus, il a un réel impact sur la qualité de l'éclairage naturel.

Afin d'étudier ce facteur morphologique, nous avons opté pour deux méthodes différentes dont les objectifs sont définis ci-dessous. Pour chacune de ces méthodes, on tiendra compte de l'orientation du bâtiment. Pour cela, nous avons choisi de décomposer le cadran en 4 orientations principales : Nord, Est, Sud et Ouest.

Nous avons mené cette étude à travers les trois typologies afin de déterminer l'influence de la taille et de la répartition des fenêtres.

Analyse quantitative

Cette recherche consiste à tester l'impact des surfaces vitrées. Pour simplifier l'analyse nous avons fixé trois seuils de porosité par façade : 10 % , 30 % , 60 %. La surface totale de vitrage augmente en fonction du nombre de façades poreuses.

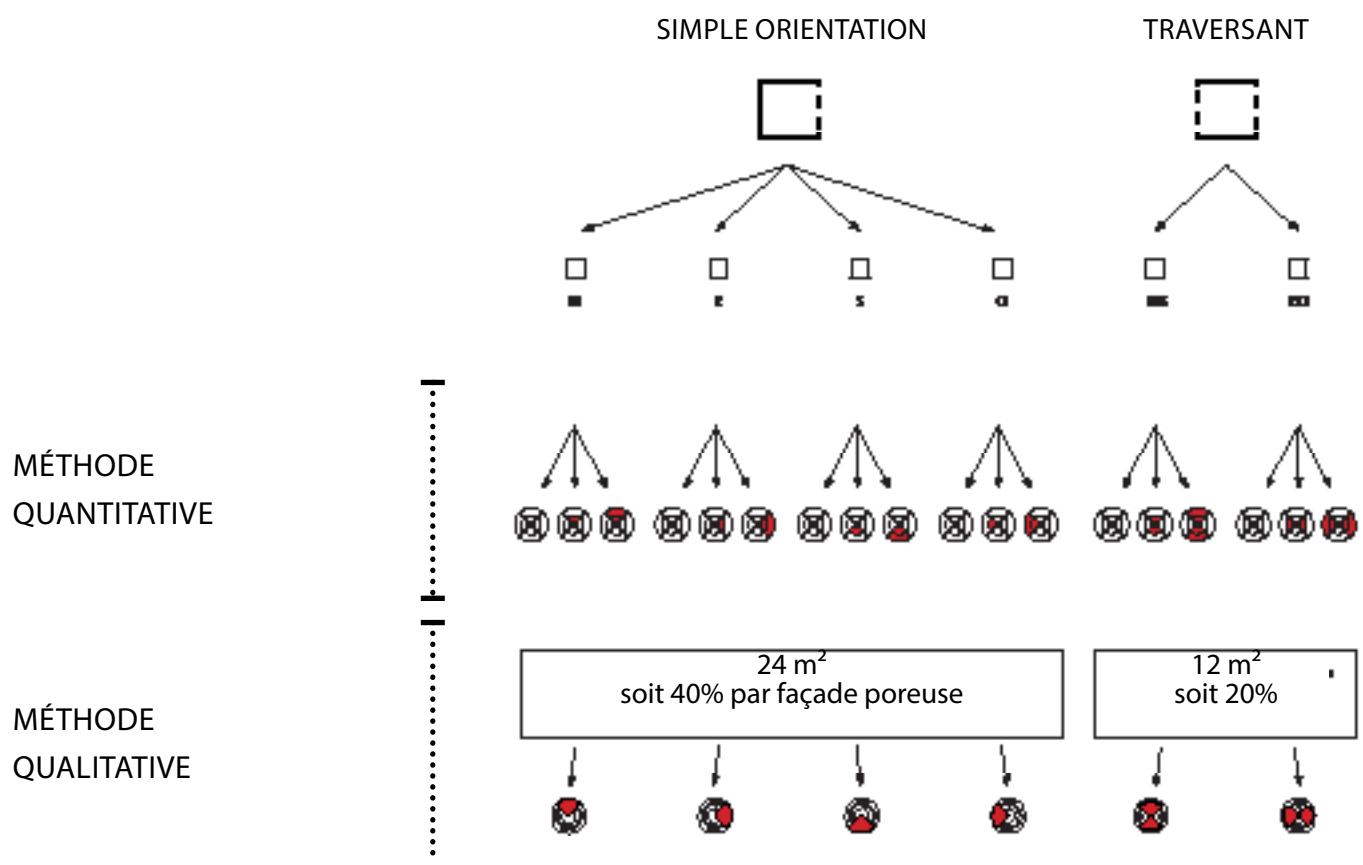
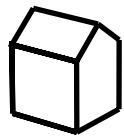
L'objectif est d'observer l'impact de la variation de la porosité en fonction de l'orientation, au sein d'une même variante. Il ne s'agit pas de comparer les variantes entre elles mais plutôt d'étudier l'influence de l'augmentation du vitrage sur les consommations.

Analyse qualitative

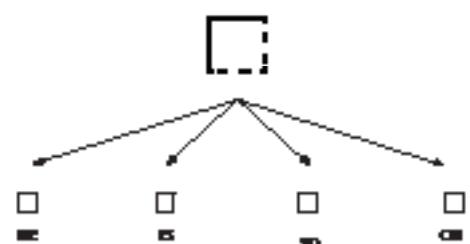
Dans cette étude, nous avons fixé une porosité totale (10% soit 24m²) puis nous l'avons réparti selon le nombre de façades poreuses. Autrement dit, la surface de vitrage totale est constante tandis que la surface par façade varie.

Il s'agit ici d'observer la qualité de la répartition des vitrages selon les orientations. Grâce à cette méthode, nous pouvons comparer les variantes entre elles.

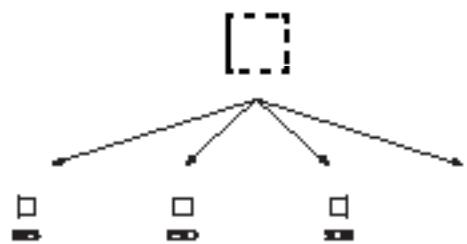
Porosité



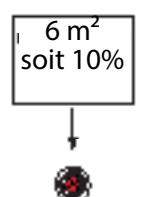
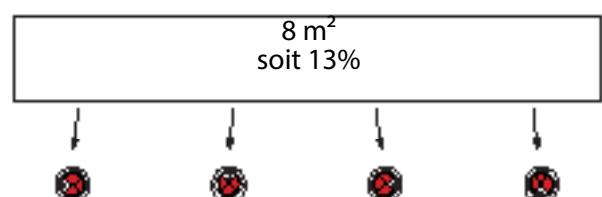
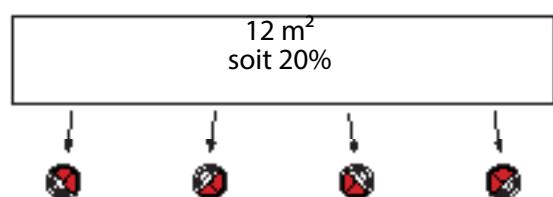
DOUBLE ORIENTATION



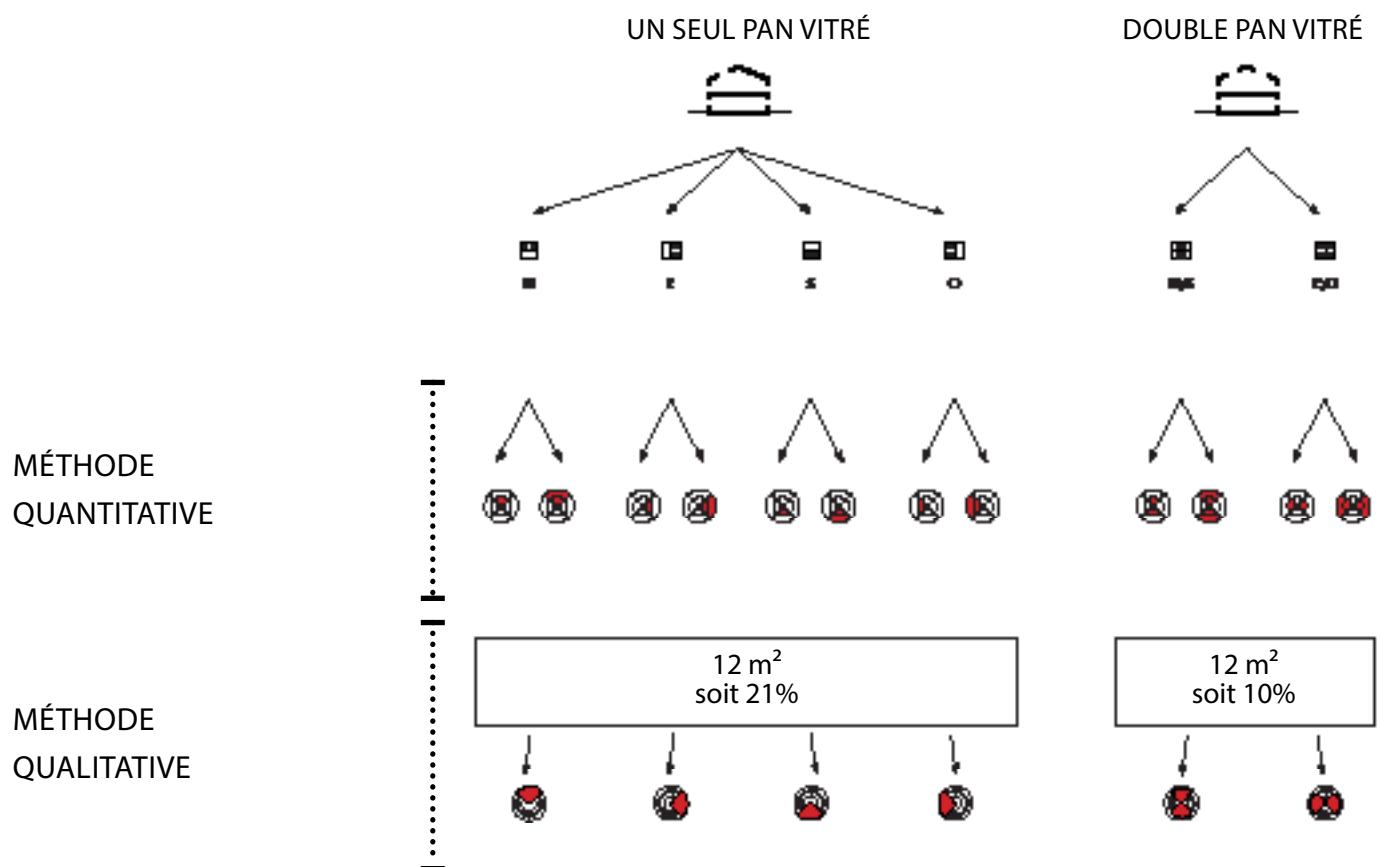
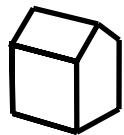
TRIPLE ORIENTATION



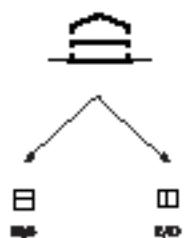
ISOTROPE



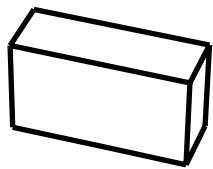
Porosité



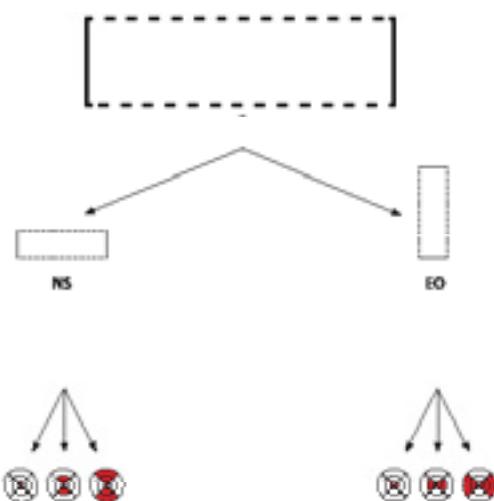
AUCUN PAN VITRÉ

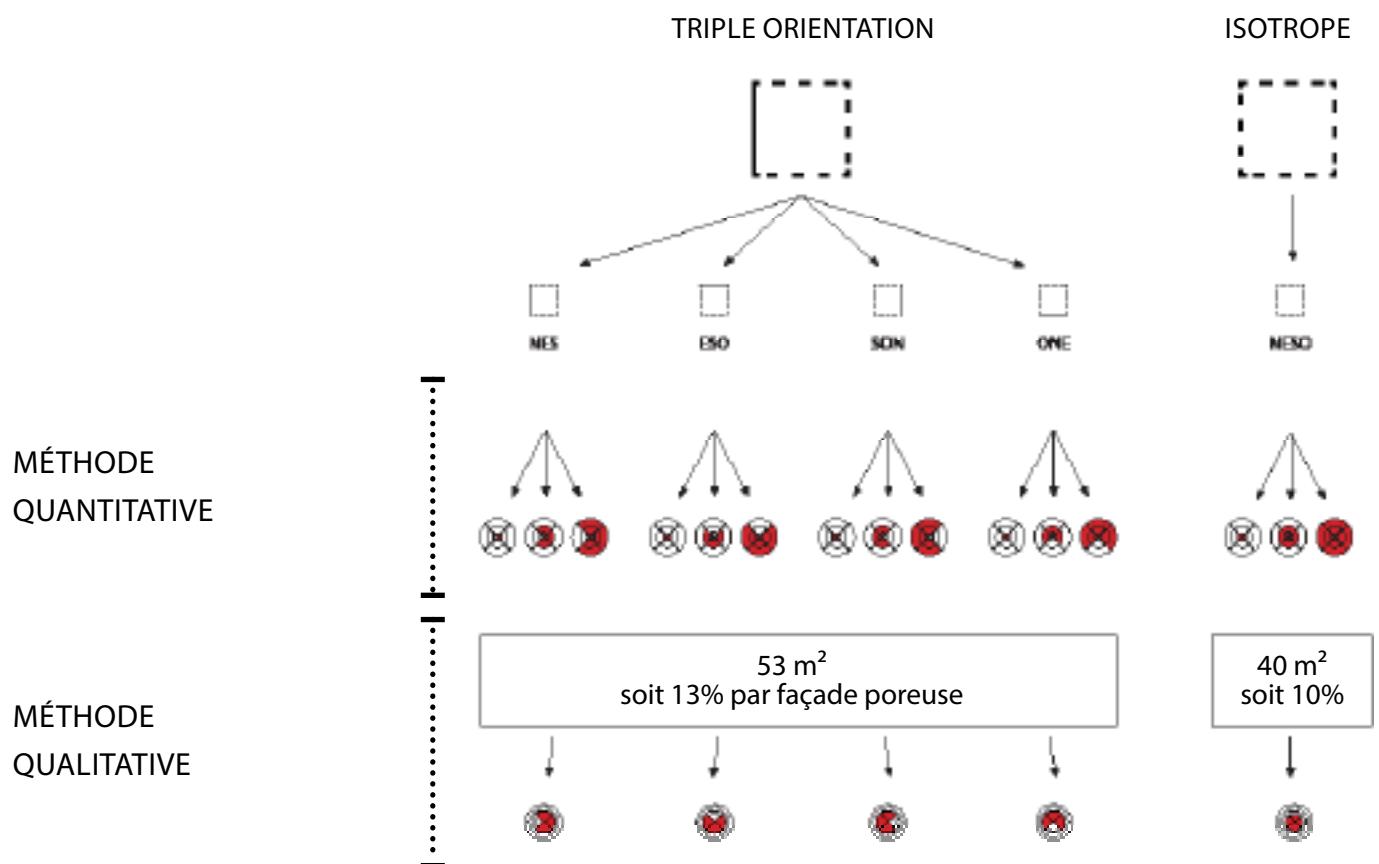
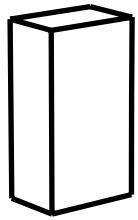


Porosité



DOUBLE ORIENTATION





Rugosité



Le facteur de rugosité réfère à l'influence du développé de façade sur les consommations énergétiques.

Pour étudier l'impact de l'orientation sur la rugosité, nous avons choisi de nous fixer certaines règles pour chacune des familles typologiques :

- Pavillon : la rugosité est spécifique pour cette famille, nous avons donc choisi des formes caricaturales.
- Barre : la rugosité est appliquée uniquement sur une face.
- Tour : la rugosité est appliquée sur les quatre faces.

L'ensemble des variantes est à surface égale, seul le périmètre évolue.

Afin de concentrer l'étude sur ce facteur, nous avons étudié la rugosité sans assemblage et donc isolés. Ainsi, il n'y aura aucun masque perturbant l'effet des rayonnements solaires.

De la même manière que pour la porosité, nous avons opté pour deux méthodes dont les objectifs sont définis ci-dessous.

Analyse de l'influence de l'orientation (profondeurs fixes)

Cette étude s'applique pour les barres. La rugosité s'effectue selon une subdivision du volume lisse en tranches réalistes pour du logement.

Nous avons déterminé la quantité de vitrage à répartir sur chaque volume. Cette quantité de vitrage correspond à 20 % de la moyenne. La porosité est représentée sous forme de bandeaux dont nous faisons varier la hauteur. Ainsi le pourcentage de vitrage reste invariable. Cela dit, on caractérise le creux par différentes répartitions du vitrage.

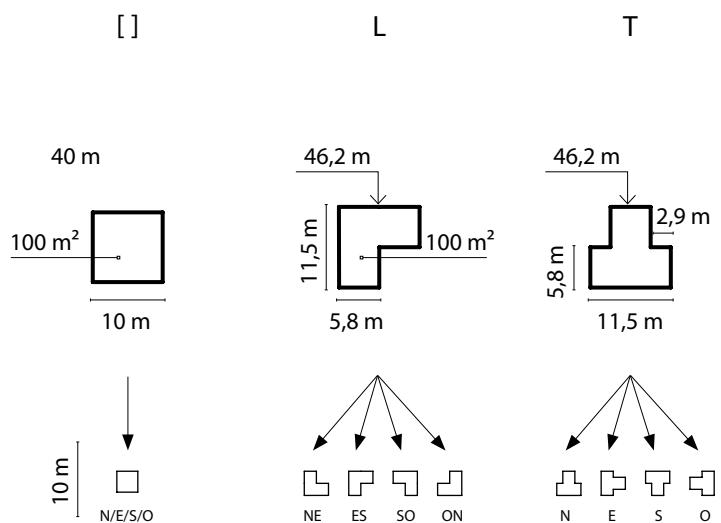
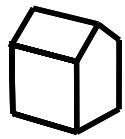
Analyse de l'influence de l'infractuosité (angles de redans fixes)

Cette étude s'applique pour les tours isotropes. Dans ce cas, l'orientation n'a pas d'impact sur les consommations.

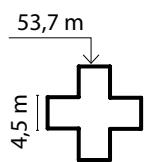
Nous nous sommes concentrés sur la géométrie de l'infractuosité en déterminant des angles de redans fixes.

Dans le cadre de cette méthode, nous avons appliqué une porosité qui évolue en fonction du développé de façade en fixant une hauteur de bandeaux continus. La porosité équivaut à 20% du volume lisse. Cela implique que la porosité augmente lorsque le développé de façade augmente.

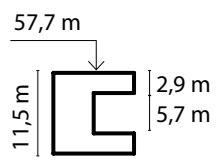
Rugosité



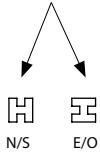
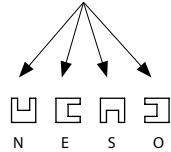
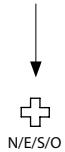
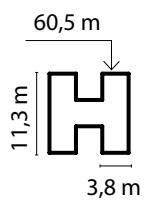
X



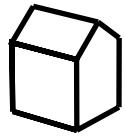
U



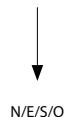
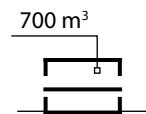
H



Rugosité (de toiture)

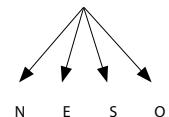
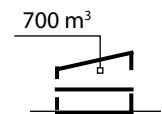


TOIT TERRASSE

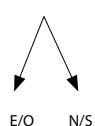
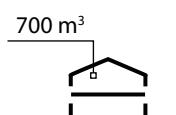


N/E/S/O

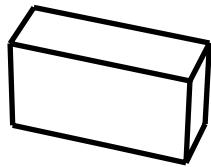
MONOPENTE



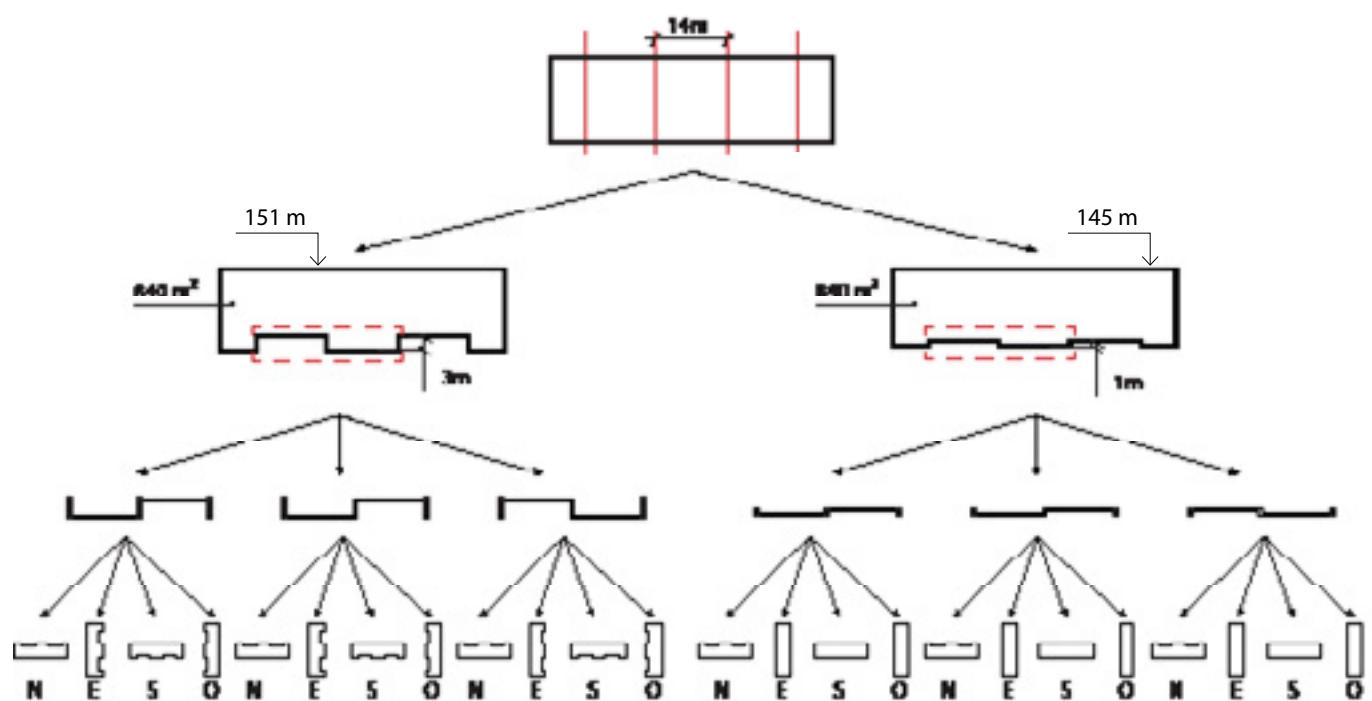
DOUBLE PENTE



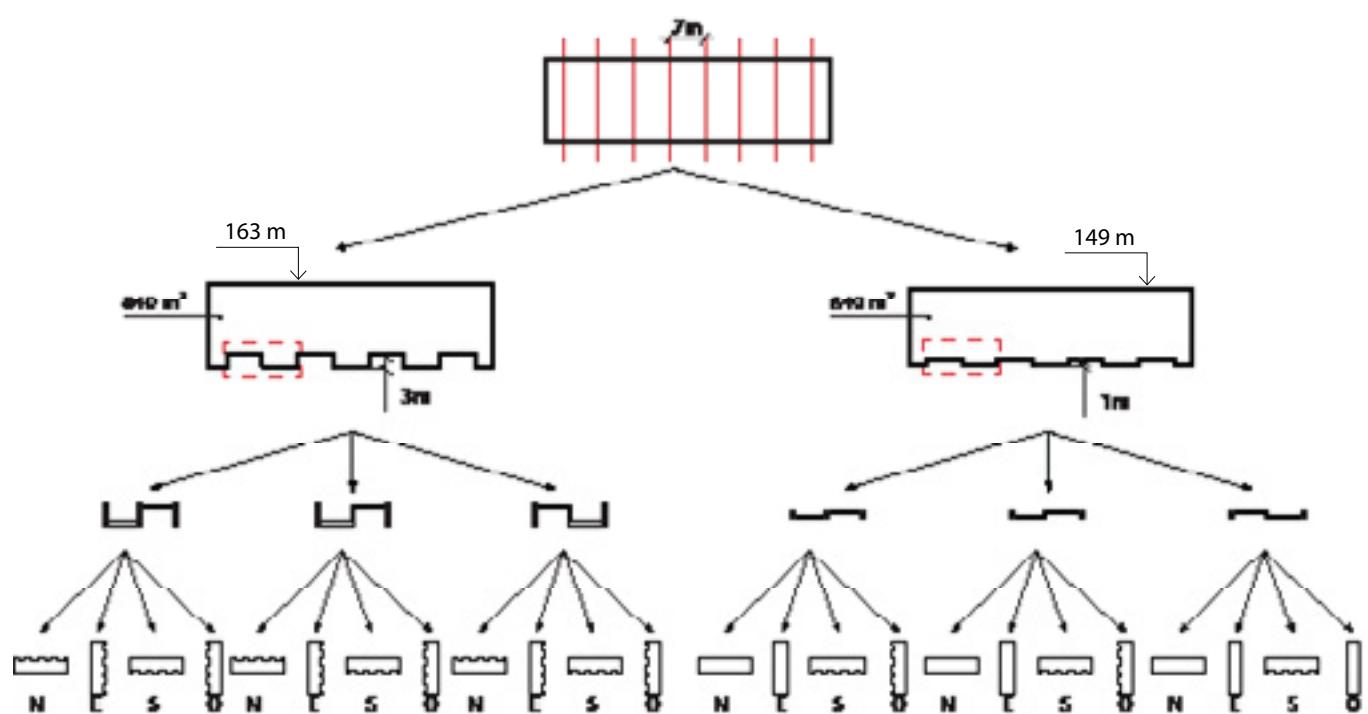
Rugosité



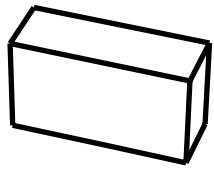
TRAME DE 14 M



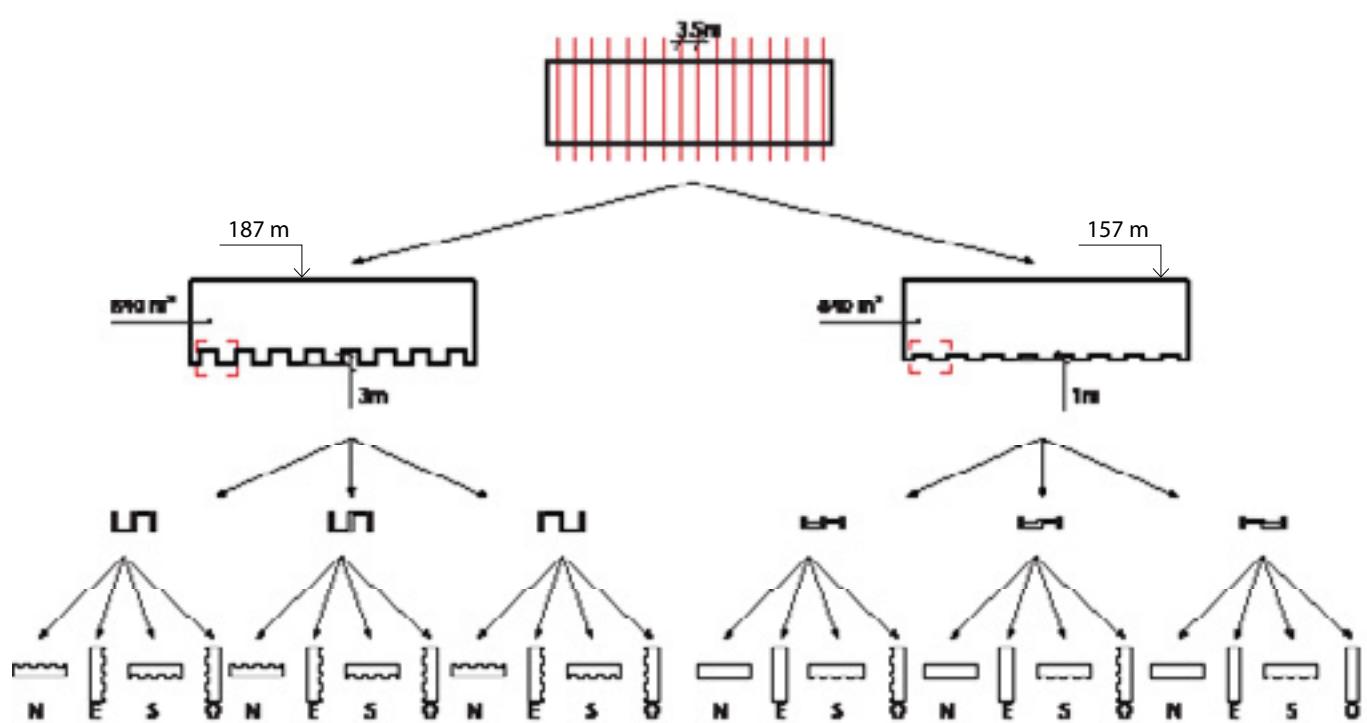
TRAME DE 7 M

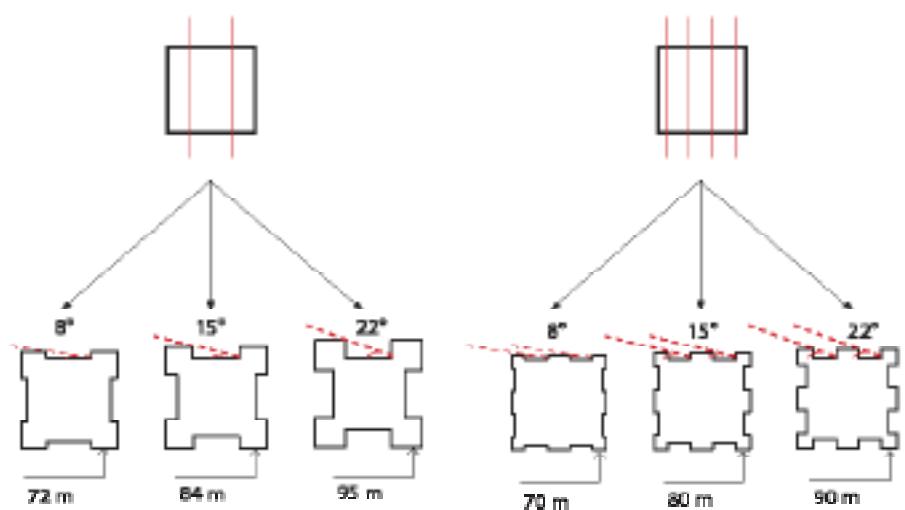
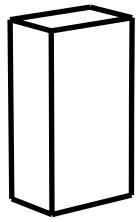


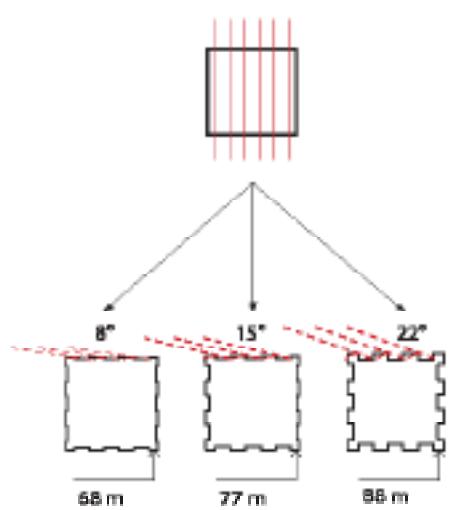
Rugosité



TRAME DE 3.5 M







5

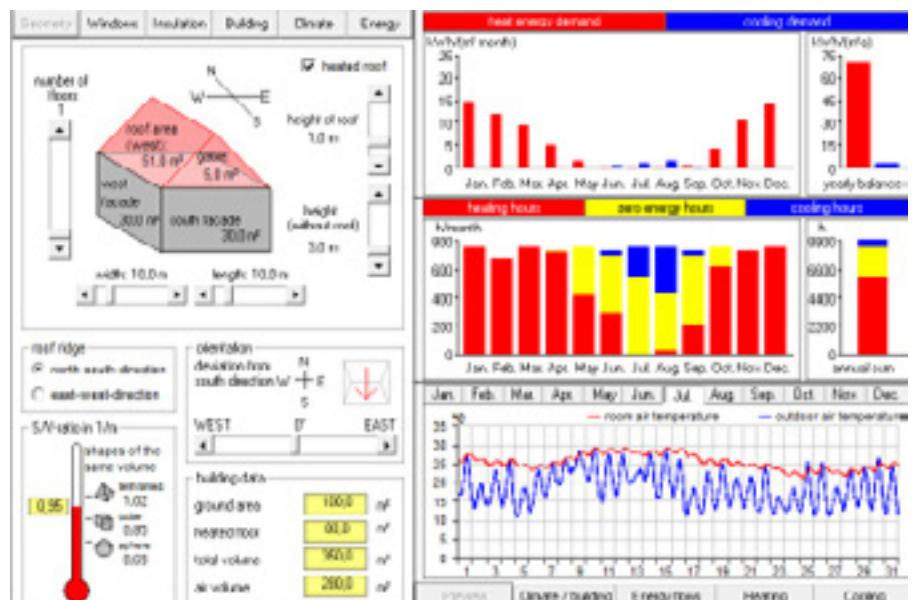
Prévisualiser les effets de la porosité

Casanova : Prévisualiser l'influence de la porosité

Avec autant de variantes à modéliser, il nous a fallu utiliser des logiciels appropriés. Pour cette étude, il nous a été conseillé d'utiliser le logiciel Grasshopper pour décliner les modèles.

Les calculs thermiques pouvaient alors être lancé avec Energy Plus, outil de prévision déjà utilisé par l'équipe IMR.

Avant de lancer nos premières simulations sur Energy Plus, nous avons effectué une première étude de la porosité avec un logiciel plus intuitif. Notre choix s'est penché sur Casanova qui est un logiciel éducatif. Casanova simule les besoins de chauffage et de rafraîchissement pour des volumes simples à modéliser. Ces simulations rapides nous permettaient de présenter les résultats sur la porosité et par la même occasion de pouvoir juger de la justesse de nos prochaines simulations.



Ce logiciel intuitif permet de sentir les relations entre la géométrie d'un bâtiment, l'orientation, l'isolation thermique, le vitrage; Il calcule les apports solaires et les besoins chaud/froid.

En faisant varier la taille et la position des ouvertures, nous avons pu étudier le facteur porosité en fonction des orientations afin d'avoir une première estimation des besoins chaud/froid. Pour cela, nous avons du définir et bloquer l'ensemble des autres paramètres (composition de l'enveloppe, volumétrie, etc).

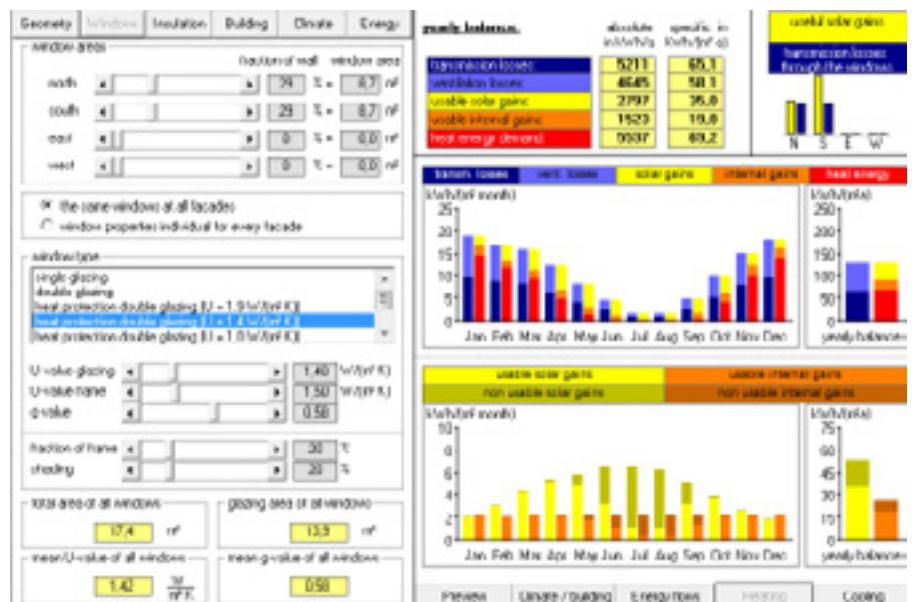
Toutefois, nous nous confrontons vite aux limites du logiciel :

- Il est impossible d'étudier des volumes plus complexes qu'un parallélépipède (excepté toiture double pente).

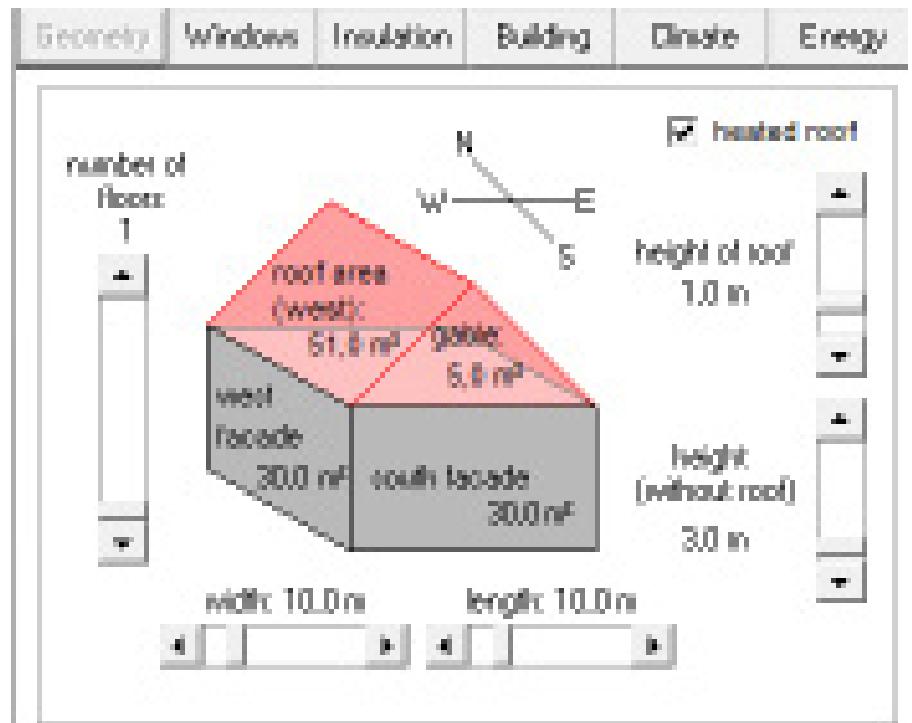
- Certaines des données d'entrées manquent de précision.

Ex: «shading» pour les fenêtres

- Le logiciel propose seulement une lecture des données par années ou par mois. On ne connaît pas le comportement thermique du bâtiment sur une journée type.



Hypothèse des paramètres fixés



VALEURS DE BASES DU GABARIT

	ÉTUDE D'UNE MAISON	Linéaire de façade	32	m
		Hauteur d'étage	3	m
		Surface de façade (hors toit et sol)	96	m
	ÉTUDE D'UNE TRANCHE	Largeur	10	m
		Longueur	10	m
		Surface habitable	100	m ²
	ÉTUDE D'UN PLATEAU	Linéaire de façade	14	m
		Hauteur d'étage	2,7	m
		Surface de façade (hors toit et sol)	37,8	m
		Largeur	7	m
		Longueur	15	m
		Surface habitable	105	m ²
		Linéaire de façade	60	m
		Hauteur d'étage	2,7	m
		Surface de façade (hors toit et sol)	162	m
		Largeur	15	m
		Longueur	15	m
		Surface habitable	225	m ²

Geometry	Windows	Insulation	Building	Climate	Energy																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">window areas</th> <th colspan="2">fraction of wall</th> <th colspan="2">window areas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>north</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>29</td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>8,7 m²</td> </tr> <tr> <td>south</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>29</td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>8,7 m²</td> </tr> <tr> <td>east</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>0</td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>0,0 m²</td> </tr> <tr> <td>west</td> <td><input type="text"/></td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>0</td> <td><input type="button" value="▼"/></td> <td>0,0 m²</td> </tr> </tbody> </table> <p><input checked="" type="radio"/> the same windows at all facades <input type="radio"/> window properties individual for every facade</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">window type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>single glazing</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>double glazing</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>heat protection double glazing (U = 1,0 W/m²K)</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>heat protection double glazing (U = 0,4 W/m²K)</td> <td><input checked="" type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>heat protection double glazing (U = 1,0 W/m²K)</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>U-value glazing</td> <td><input type="text"/> 1,40 W/m²K</td> </tr> <tr> <td>U-value frame</td> <td><input type="text"/> 1,50 W/m²K</td> </tr> <tr> <td>g-value</td> <td><input type="text"/> 0,58</td> </tr> <tr> <td colspan="2">fraction of facade</td> </tr> <tr> <td>shedding</td> <td><input type="text"/> 20 %</td> </tr> <tr> <td colspan="2">total area of all windows</td> </tr> <tr> <td>17,4 m²</td> <td>glazing area of all windows</td> </tr> <tr> <td colspan="2">mean U-value of all windows</td> </tr> <tr> <td>1,42 W/m²K</td> <td>mean g-value of all windows</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>						window areas		fraction of wall		window areas		north	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	29	<input type="button" value="▼"/>	8,7 m ²	south	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	29	<input type="button" value="▼"/>	8,7 m ²	east	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	0	<input type="button" value="▼"/>	0,0 m ²	west	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	0	<input type="button" value="▼"/>	0,0 m ²	window type		single glazing	<input type="radio"/>	double glazing	<input type="radio"/>	heat protection double glazing (U = 1,0 W/m ² K)	<input type="radio"/>	heat protection double glazing (U = 0,4 W/m²K)	<input checked="" type="radio"/>	heat protection double glazing (U = 1,0 W/m ² K)	<input type="radio"/>	U-value glazing	<input type="text"/> 1,40 W/m ² K	U-value frame	<input type="text"/> 1,50 W/m ² K	g-value	<input type="text"/> 0,58	fraction of facade		shedding	<input type="text"/> 20 %	total area of all windows		17,4 m²	glazing area of all windows	mean U-value of all windows		1,42 W/m²K	mean g-value of all windows				
window areas		fraction of wall		window areas																																																																	
north	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	29	<input type="button" value="▼"/>	8,7 m ²																																																																
south	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	29	<input type="button" value="▼"/>	8,7 m ²																																																																
east	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	0	<input type="button" value="▼"/>	0,0 m ²																																																																
west	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	0	<input type="button" value="▼"/>	0,0 m ²																																																																
window type																																																																					
single glazing	<input type="radio"/>																																																																				
double glazing	<input type="radio"/>																																																																				
heat protection double glazing (U = 1,0 W/m ² K)	<input type="radio"/>																																																																				
heat protection double glazing (U = 0,4 W/m²K)	<input checked="" type="radio"/>																																																																				
heat protection double glazing (U = 1,0 W/m ² K)	<input type="radio"/>																																																																				
U-value glazing	<input type="text"/> 1,40 W/m ² K																																																																				
U-value frame	<input type="text"/> 1,50 W/m ² K																																																																				
g-value	<input type="text"/> 0,58																																																																				
fraction of facade																																																																					
shedding	<input type="text"/> 20 %																																																																				
total area of all windows																																																																					
17,4 m²	glazing area of all windows																																																																				
mean U-value of all windows																																																																					
1,42 W/m²K	mean g-value of all windows																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">U-values of the walls</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>north</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> <tr> <td>south</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> <tr> <td>east</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> <tr> <td>west</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="radio"/> ignore heat bridges <input checked="" type="radio"/> increase U-values of surrounding planes by 1,10 W/m²K (normal construction) <input type="radio"/> increase U-values of surrounding planes by 1,05 W/m²K (construction with nearly no heat bridges)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Heat bridges</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Absorption coefficient of the walls</td> <td><input type="text"/> 0,50</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">door (north facade)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>area</td> <td><input type="text"/> 0,0 m²</td> </tr> <tr> <td>U-value</td> <td><input type="text"/> 1,5 W/m²K</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">upper floor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>towards...</td> <td>outside or non-insulated roof</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> ventilated roof</td> <td></td> </tr> <tr> <td>U-value</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">lower floor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>towards...</td> <td>non-heated cellar (with insulation)</td> </tr> <tr> <td>U-value</td> <td><input type="text"/> 0,20 W/m²K</td> </tr> </tbody> </table>						U-values of the walls		north	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K	south	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K	east	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K	west	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K	Heat bridges		Absorption coefficient of the walls	<input type="text"/> 0,50	door (north facade)		area	<input type="text"/> 0,0 m ²	U-value	<input type="text"/> 1,5 W/m ² K	upper floor		towards...	outside or non-insulated roof	<input type="checkbox"/> ventilated roof		U-value	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K	lower floor		towards...	non-heated cellar (with insulation)	U-value	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																														
U-values of the walls																																																																					
north	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				
south	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				
east	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				
west	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				
Heat bridges																																																																					
Absorption coefficient of the walls	<input type="text"/> 0,50																																																																				
door (north facade)																																																																					
area	<input type="text"/> 0,0 m ²																																																																				
U-value	<input type="text"/> 1,5 W/m ² K																																																																				
upper floor																																																																					
towards...	outside or non-insulated roof																																																																				
<input type="checkbox"/> ventilated roof																																																																					
U-value	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				
lower floor																																																																					
towards...	non-heated cellar (with insulation)																																																																				
U-value	<input type="text"/> 0,20 W/m ² K																																																																				

Pour nos simulations sur Casanova, nous avons choisi d'étudier les trois typologies et leurs variantes respectives en les croisant avec deux types d'enveloppes.

La première est caractérisée par des propriétés thermiques tel que ceux que l'on peut retrouver pour de l'habitat ancien. La deuxième enveloppe, que l'on a nommé «rénovée», dispose de propriétés thermiques plus performantes (type RT 2012).

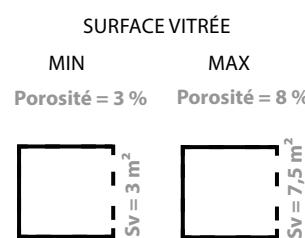
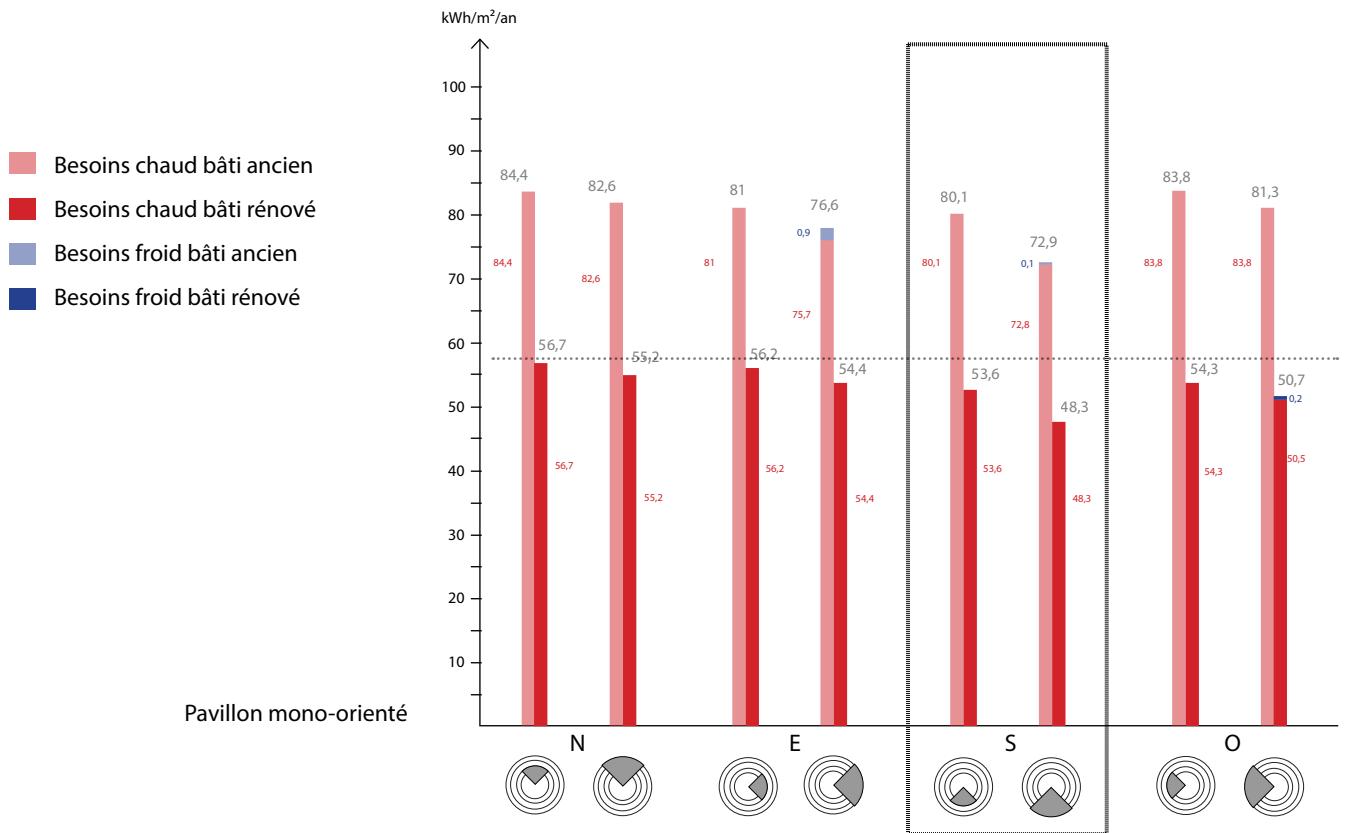
Les valeurs que nous nous sommes fixées pour ces simulations sont présentées ci-dessous :

	ANCIEN	RÉNOVÉ
FENETRES		
U vitrage	3 W/m ² .K	1,4 W/m ² .K
U menuiserie	2,8W/m ² .K	1,5 W/m ² K
g - value	0,8	0,58
fraction structure / ombre	20 %	20 %
MURS		
U mur	1,3 W/m ² K	0,3 W/m ² K
absorption	0,5	0,5
TOIT / SOL		
U toit	0 W/m ² K + totally insulated roof	
U sol	0 W/m ² K + soil with border insulation	

Etude d'une maison



RÉSULTATS & ANALYSE QUANTITATIVE

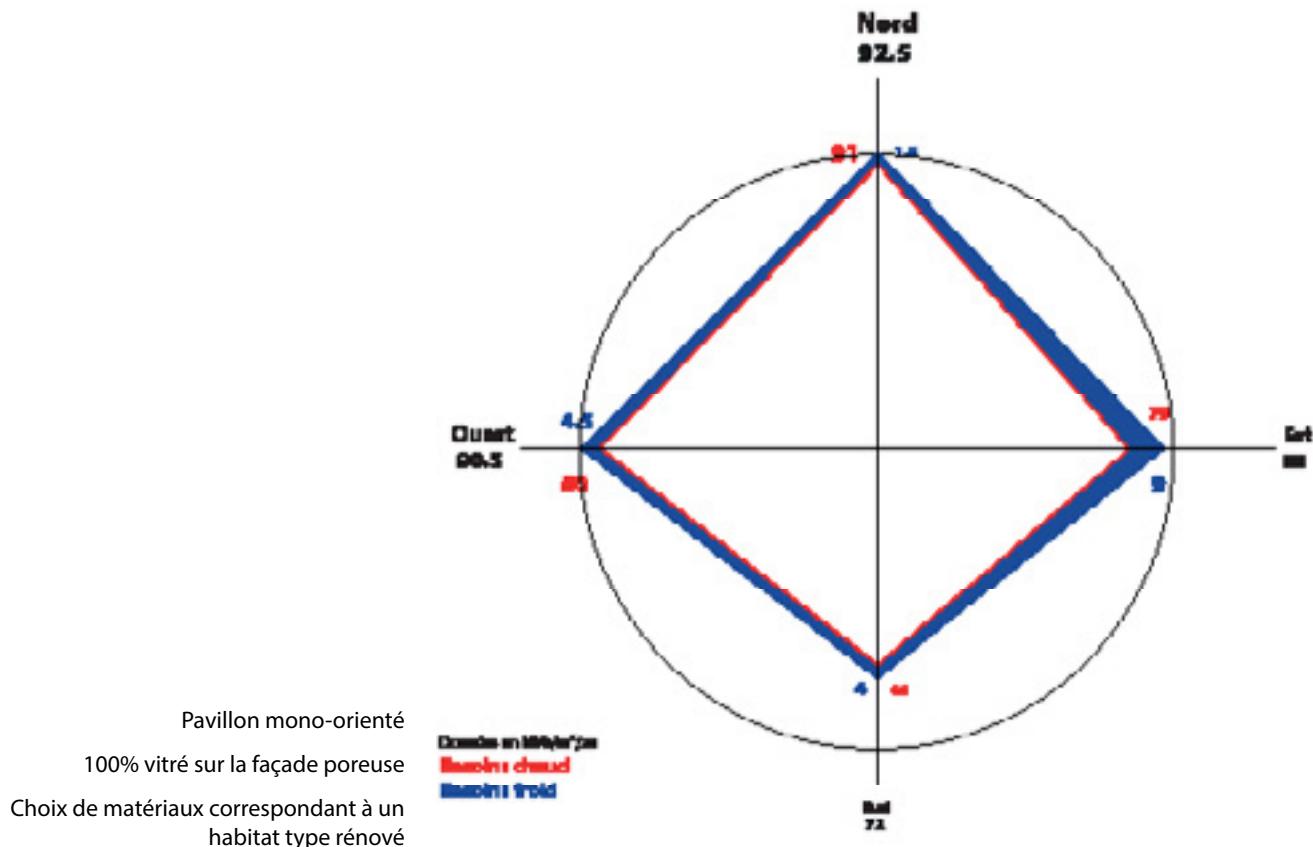


Pour cette étude sur le pavillon, nous avons analysé 16 cas de mono-orienté différents. Pour chacune des orientations (Nord, Sud, Est, Ouest), nous avons choisi d'évaluer les consommations énergétiques suivant deux types de porosité que l'on a jugé réaliste. Ensuite, nous avons testé pour chaque variante deux types d'enveloppes : un cas ancien et un cas rénové.

Orientation : L'orientation Sud est la moins énergivore pour une maison mono-orientée. De plus, on observe que les consommations énergétiques diminuent lorsque l'on augmente les surfaces vitrées. Toutefois, on remarque aussi un besoin froid pour le cas du pavillon ancien orienté Est. A l'Ouest, un besoin froid apparaît pour le cas du pavillon rénové tandis qu'il disparaît à l'Est.

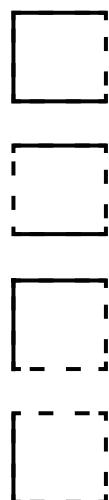
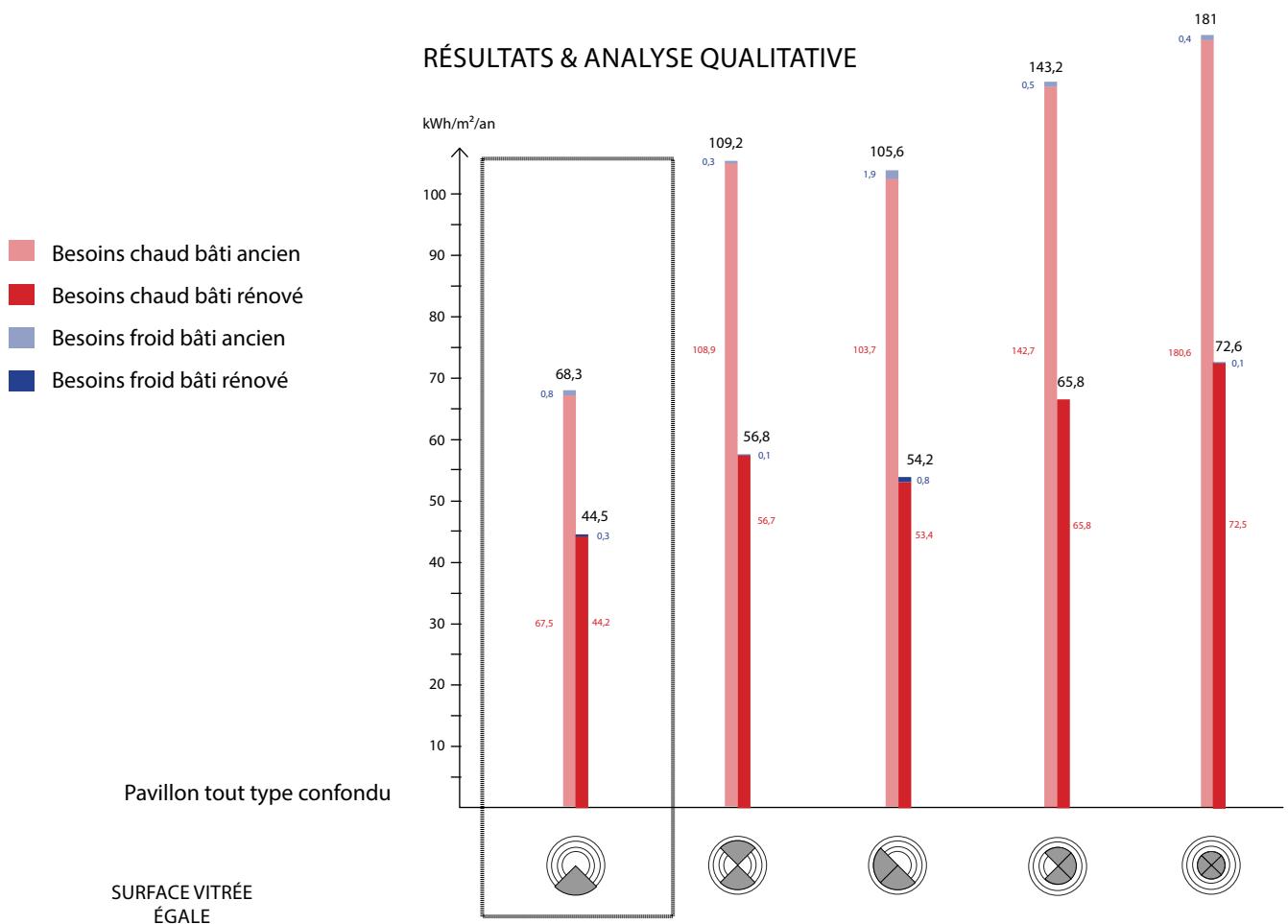
Rénovation : Sans surprise, on observe que les consommations énergétiques sont plus importantes pour les pavillons anciens que pour les pavillons rénovés. Ceux-ci baissent d'environ de 30%.

AUGMENTATION DE LA SURFACE VITRÉE ET INCONFORT ESTIVAL



A la suite de cette analyse, nous avons cherché à tester si les résultats confirmaient nos hypothèses lorsque l'on augmente la porosité à 100%. Nous avons donc relancé des simulations pour le cas d'un pavillon rénové et mono-orienté avec une façade vitrée à 100%. Ce cas extrême nous permet d'observer que l'inconfort estival à l'Est est largement supérieur à celui des autres orientations. Ce constat est contraire aux idées reçues selon lesquelles les risques de surchauffe sont plus importantes à l'Ouest.

RÉSULTATS & ANALYSE QUALITATIVE



Au vu des résultats, nous avons opté pour une analyse qualitative. Pour tout type confondu (mono-orienté, traversant, bi-orienté, tri-orienté, isotrope), nous avons sélectionné le cas le moins énergivore. Nous avons choisi une surface vitrée totale égale que nous avons appliquée aux différents cas d'études. Cela signifie que la surface vitrée par façade, varie tandis que la surface vitrée totale, fixée à 10%, reste constante. Pour une même surface vitrée répartie différemment, le mono-orienté Sud reste le cas le plus intéressant d'un point de vue purement énergétique tandis que le pavillon isotrope révèle une consommation deux fois plus importante.

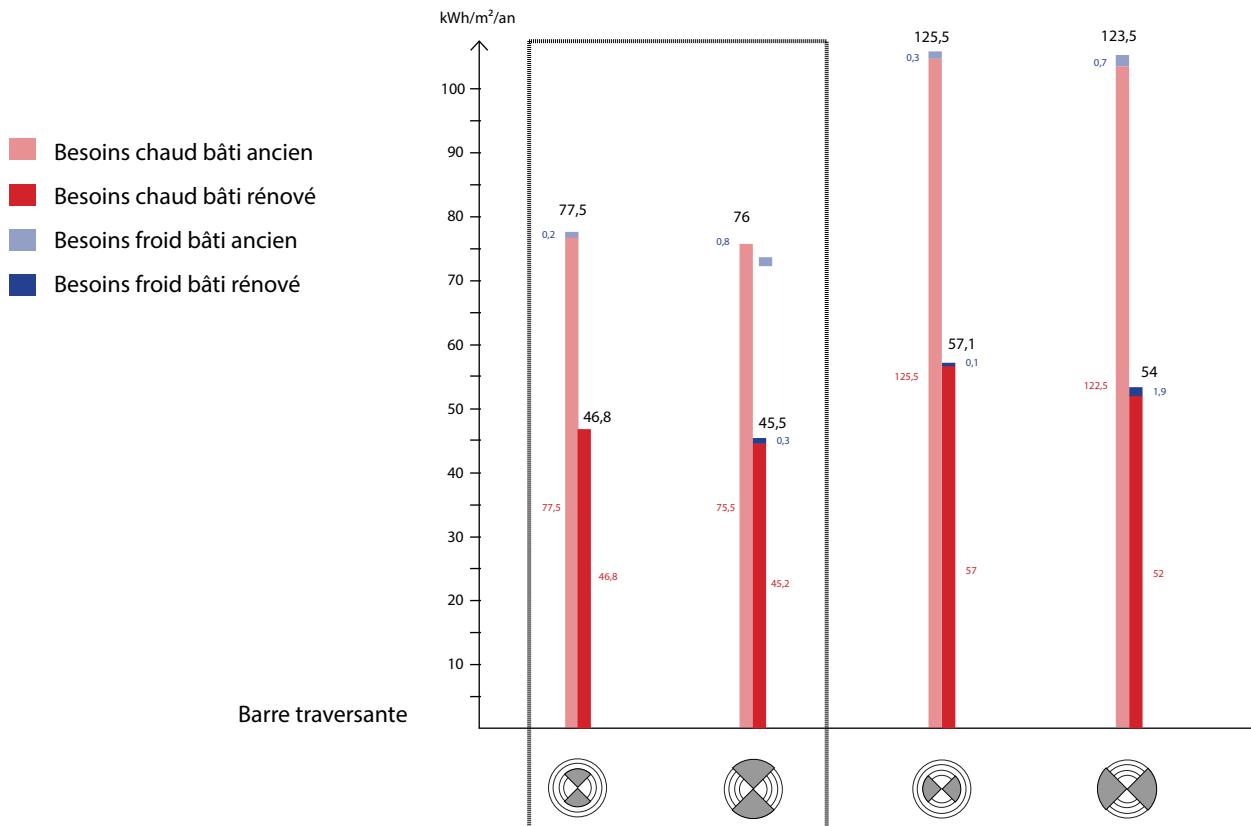
$S_v \text{ tot} = 12,0 \text{ m}^2$

Porosité = 10 %

Etude d'une tranche



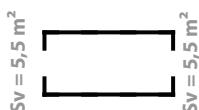
RÉSULTATS & ANALYSE QUANTITATIVE



SURFACE VITRÉE

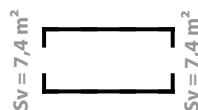
MIN

Porosité = 8 %



MAX

Porosité = 13 %



Pour l'étude de la barre, nous étudions une tranche. Nous n'avons qu'une seule variante, le cas de la barre traversante. Encore une fois, nous avons évaluer les consommations énergétiques selon deux types de porosité différentes (min et max) et deux orientations Nord/Sud et Est/Ouest. Ensuite, nous avons testé chaque cas avec une enveloppe rénové et ancien.

Orientation : On observe que l'orientation Nord/Sud est la plus favorable.

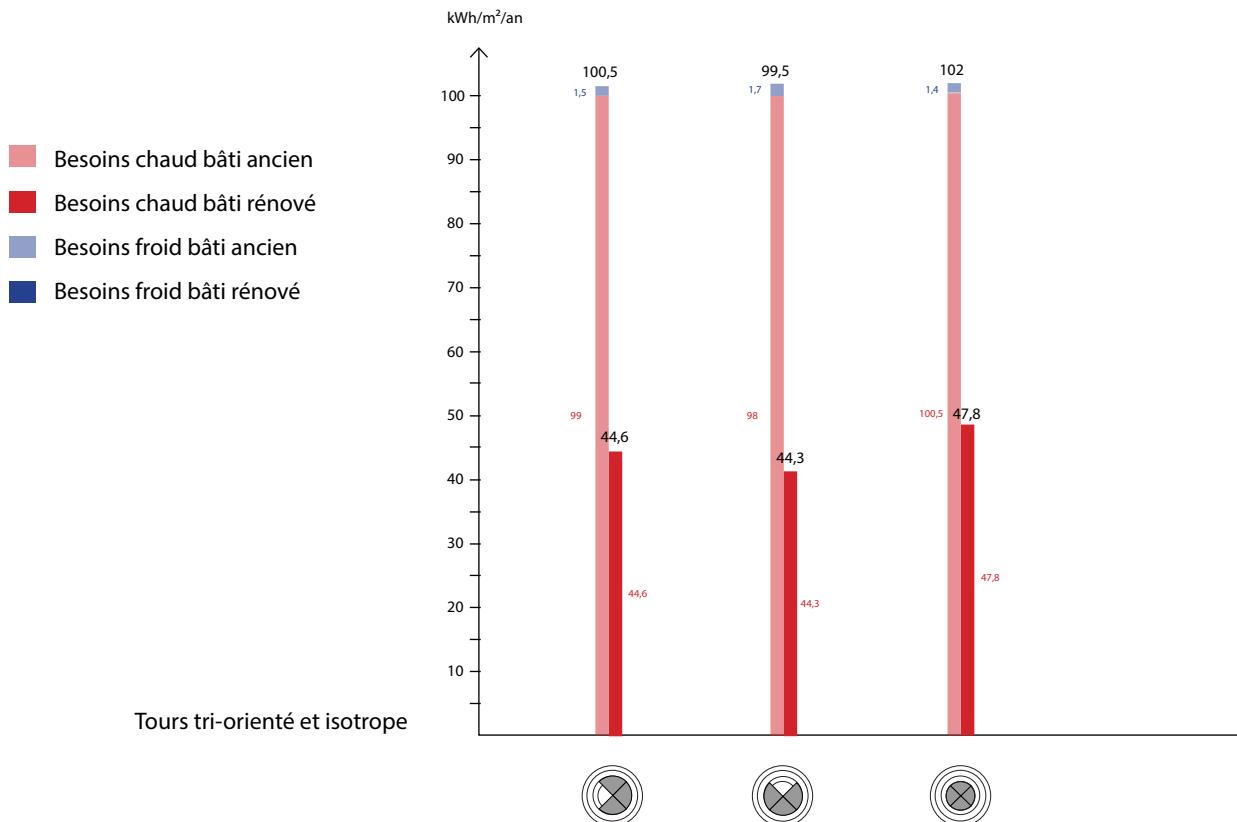
Rénovation : Pour le cas Nord/Sud, on note 40% économie de besoins énergétiques.

Pour l'orientation Est/Ouest, les gains sont d'autant plus importants, soit

Etude d'un plateau

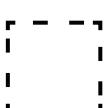
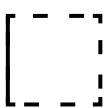


RÉSULTATS & ANALYSE QUALITATIVE



Pour l'étude de la tour, nous étudions un plateau. Nous avons seulement deux variantes de la tour, isotrope ou tri-orienté.

SURFACE VITRÉE ÉGALE



S_v tot = 12,0 m²

Porosité = 10 %

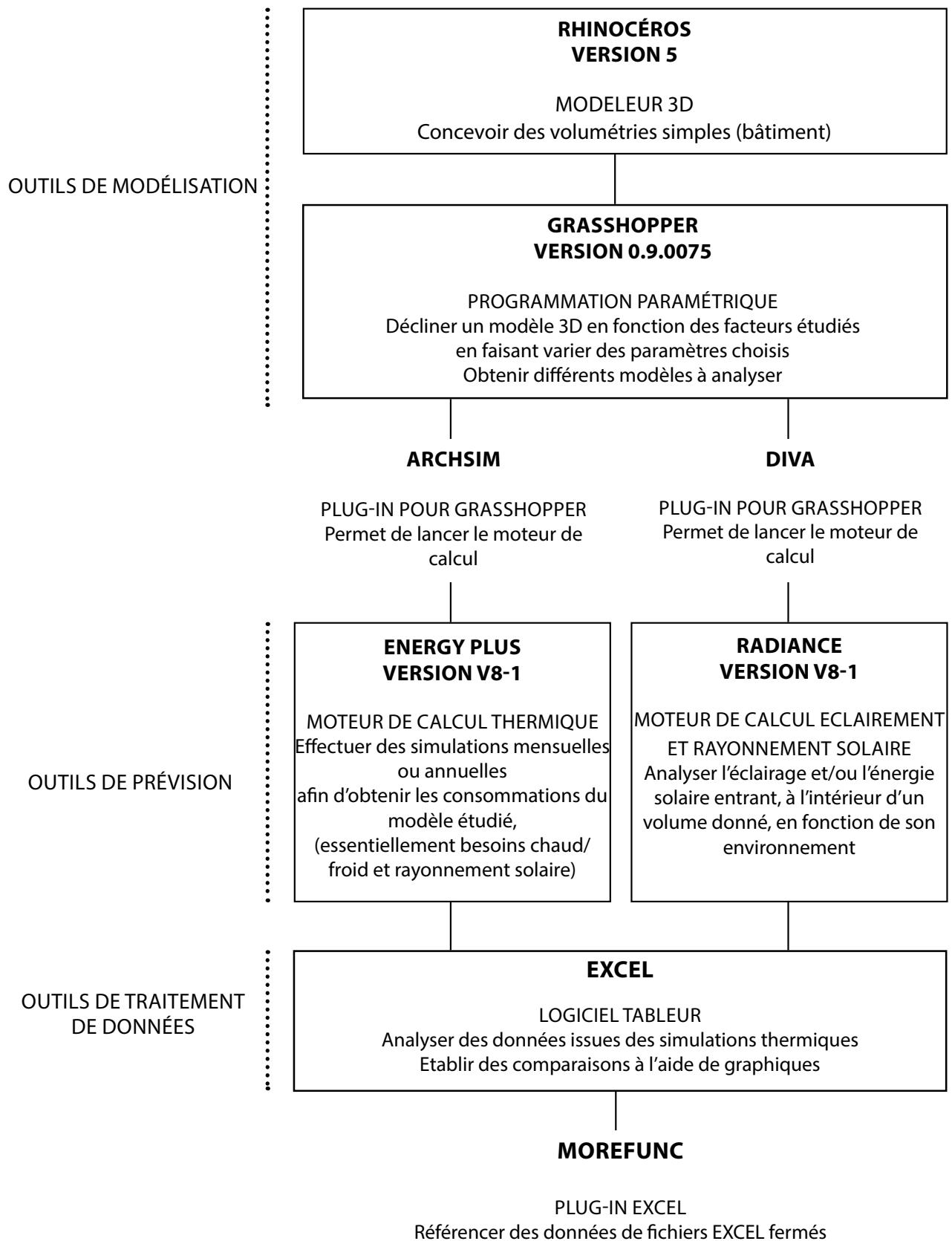
Après une première analyse quantitative, nous avons effectué une analyse qualitative pour les cas les moins énergivore. Nous avons choisi une surface vitrée totale et constante, que nous avons appliquée aux différents cas d'études. Pour une même surface vitrée répartie différemment, on observe que la tour est très peu soumise aux orientations.

Rénovation : Pour tous les cas, on remarque que la rénovation peut jouer considérablement sur les consommations énergétiques d'une tour. En effet, on observe une réduction supérieure à 50% des besoins chaud/froid.

6

Développer un outil informatique

Chainage de logiciels utilisés



**CASANOVA
VERSION 3.3.08A**

LOGICIEL DE MODÉLISATION
ET DE CALCUL THERMIQUE

Effectuer des simulations mensuelles ou annuelles afin d'obtenir les
consommations d'un modèle parallélépipèdique

EXCEL

LOGICIEL TABLEUR

Analyser des données issues des simulations thermiques
Etablir des comparaisons à l'aide de graphiques

Données d'entrée d'EnergyPlus



Le module EnergyPlus requiert un certain nombre de données d'entrée pour le lancement des calculs.

Le module EnergyPlus permet d'obtenir des résultats sur les performances thermiques du bâtiment modélisé préalablement dans Grasshopper. Il fonctionne sous deux modes d'analyse différents : annuel et mensuel. Pour le rendre fonctionnel, il faut tout d'abord référencer les fichiers météo correspondants au site du projet. Les données relatives aux matériaux sont référencées dans un fichier préalablement établi par l'équipe IMR :

- Fenêtres : Double vitrage basse émissivité.
- Dalle béton : Feuille traditionnelle, Béton, Polystyrène extrudé.
- Toiture béton : Polystyrène extrudé, Béton armé, Panneau BA13.
- Mur bois : Platre de ciment, Polystyrène expansé, Béton armé, Panneau BA 13, Dalle de sol, Feuille traditionnelle, Dalle d'isolation.
- Charpente bois : Isolation complémentaire laine de verre, Cadre LDV traditionnel, Panneau BA 13.
- Partition bois : Enduit platre, Structure bois non isolé, Enduit platre.

Dans le programme Grasshopper, il faut régler les données d'entrée pour le bâtiment étudié : Zone thermique, Fenêtres, Sol et Abords.

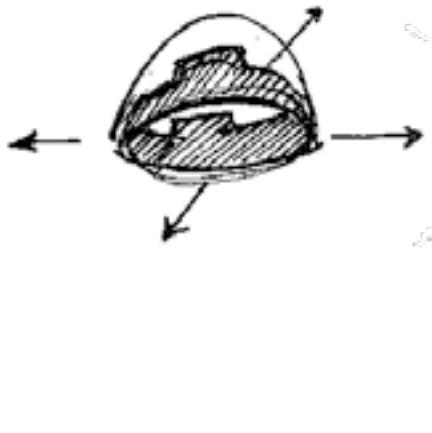
- La zone thermique correspond au volume total de l'enveloppe, celle-ci peut être trouvée soit à la sortie du cluster « Volume Total » soit à la sortie du cluster « Positionnement des volumes mitoyens » .
- L'entrée fenêtres doit être branchée sur la sortie de l'outil division horizontale, pour un bâtiment modélisé sur rhino, on utilisera directement les fenêtres en tant que Brep de référence.
- Un sol par défaut a été créé pour l'entrée sol, cependant, s'il ne convient pas aux besoins de l'étude il suffit de créer une surface à la hauteur désirée et de la référencer en tant que sol.
- Les masques ne sont pas nécessairement référencés, ils n'interviennent que si l'étude porte sur ce paramètre. Si c'est le cas on référence la volume entier avec ses fenêtres de manière à être le plus exact possible.

Une fois que toutes ces entrées sont paramétrés il suffit de cliquer sur le bouton true/false (boolean toggle) qui se situe dans la partie 3.

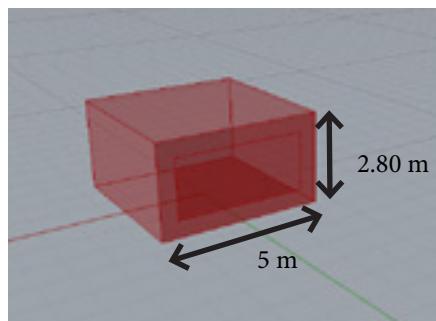
Thermique de la première ligne. On choisira le mois pour une étude mensuelle et on appuiera uniquement sur le bouton pour une étude annuelle.

Si tout c'est passé normalement, une série de fichiers d'analyse apparaît dans le dossier choisi préalablement et des courbes correspondant aux besoins chauds et aux besoins froids s'affichent dans la troisième ligne. Sur le fichiers créés, le seul qui nous intéresse est le fichier .csv. Ce fichier au format excel est pour l'instant constitué d'une série de valeurs en Joules que nous devrons convertir par la suite en kW.

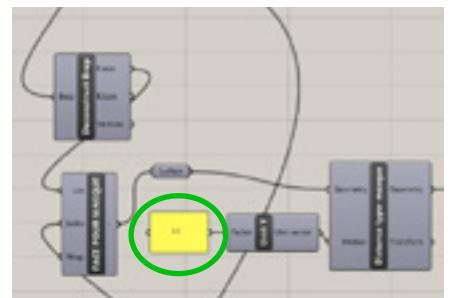
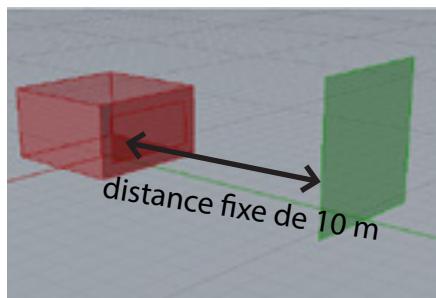
Masques solaires



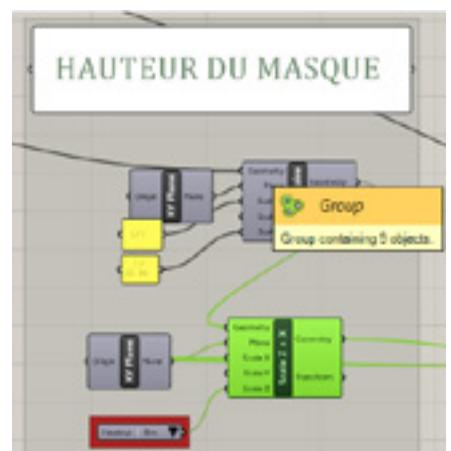
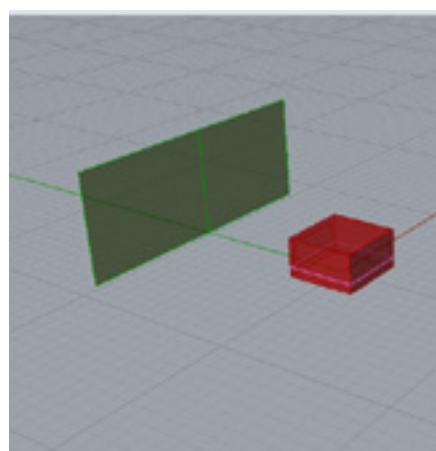
La typologie urbaine est modélisée par un cube percé d'un vitrage, qui couvre 50% de la surface d'une face.
Dimensions : côté 5 m, hauteur 2.80 m.



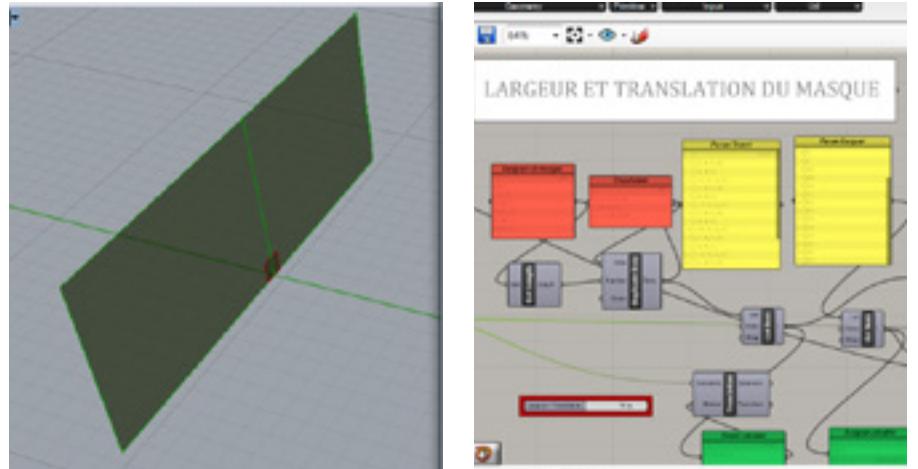
Distance masque/typo : Partant du cube, on applique une translation de 10 m à une face, qui sera le masque. Le redimensionnement se fait par une mise à l'échelle non uniforme selon les axes X, Y, et Z.



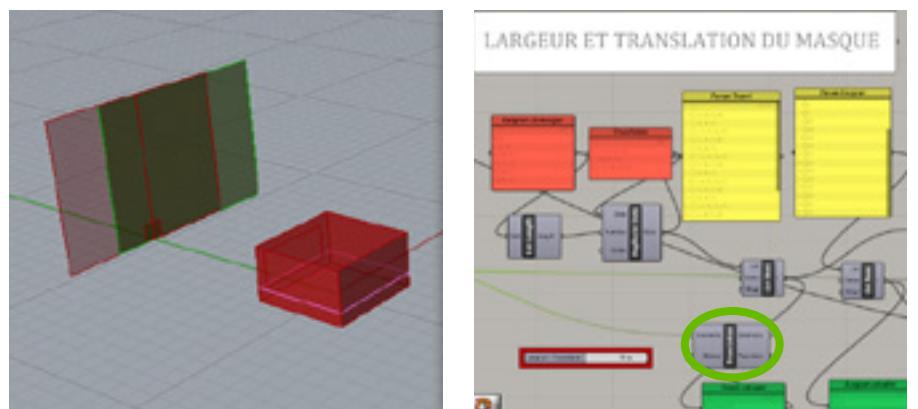
Pour paramétriser la hauteur on part d'une surface carré unitaire que l'on redimensionne. On accède au bloc «Hauteur du masque» où l'on peut donner autant de valeurs que l'on souhaite à la hauteur. Nous avons défini 6 valeurs : 2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 m.



On paramétrise la largeur de la même manière que pour la hauteur de masque, on peut affecter autant de valeurs que l'on souhaite pour la largeur. Nous avons donc défini 5 valeurs : 5 - 10 - 15 - 20 - 25 m, sans oublier le cas où le masque est inexistant.

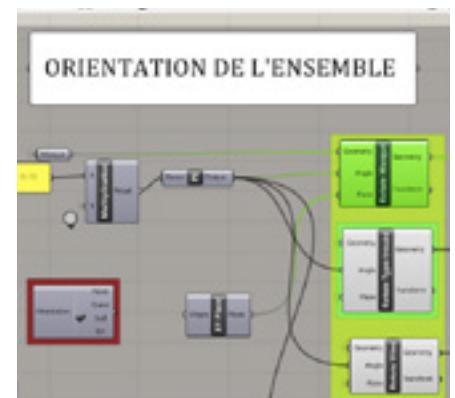
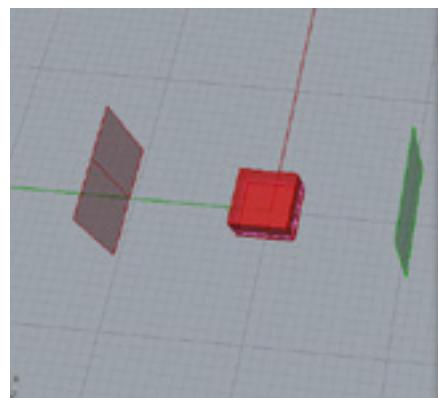


Dans le cadre de notre étude sur l'existant, il nous a paru indispensable d'étudier les cas de figure où le masque solaire est excentré par rapport à la typologie pour les comparer aux cas de figure «face-à-face». Cela permettra de mesurer l'inégalité de composition du rayonnement solaire reçu (plus de direct dans le cas de l'excentration).



Pour ce qui est de l'orientation on applique une rotation de $i \pi/2$, i allant de 0 à 3, ce qui correspond à 4 orientations : Nord, Ouest, Est, Sud. Pour lancer nos simulations en boucle (batch) nous avons pu reprendre un template déjà réalisé par l'équipe IMR. Il suffit de définir les trois paramètres à faire varier, leur valeurs initiales et finales ainsi que le pas de variation.

Masque orientation initiale
(par défaut, Nord)



Masque orientation
Sud

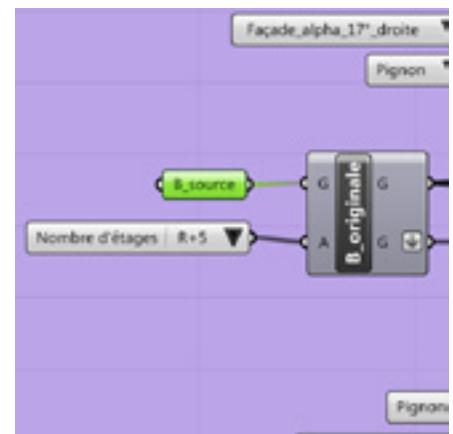
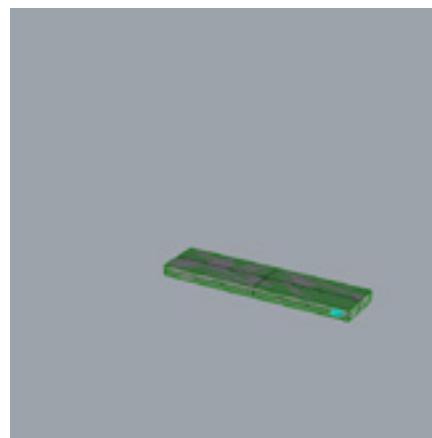
Pour l'ensemble de ces cas on distinguera deux simulations: l'une en été et l'autre en hiver.



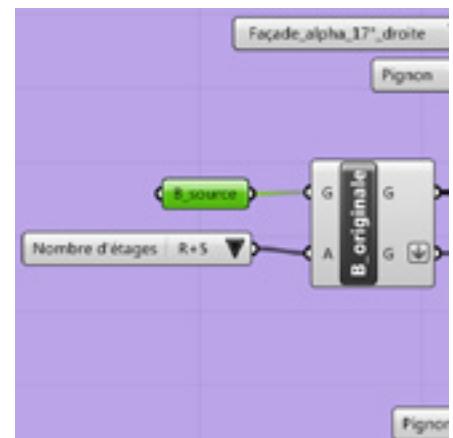
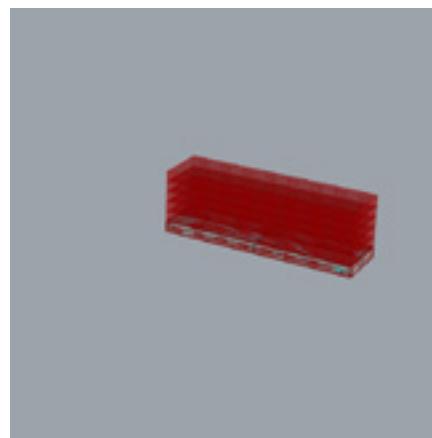
Assemblage



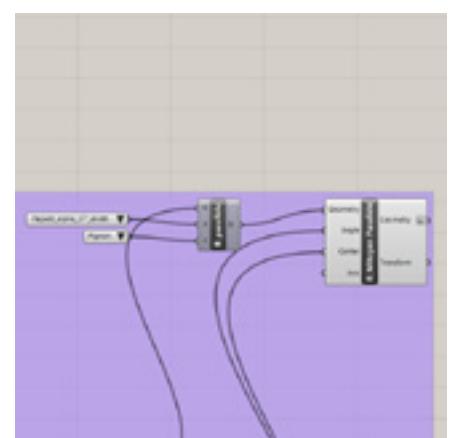
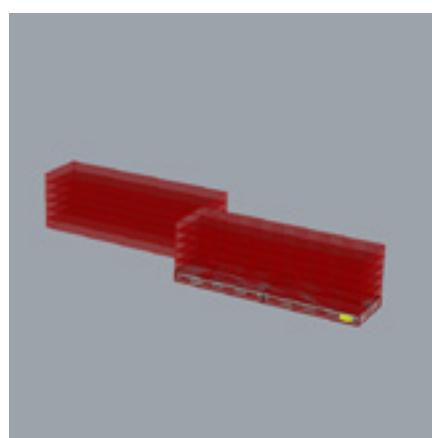
Le programme définissant les assemblages a un fonctionnement relativement simple, tout d'abord il faut définir le Brep d'origine qui doit être composé d'un volume représentant un étage courant avec des fenêtres (les fenêtres seront identiques pour ce programme).



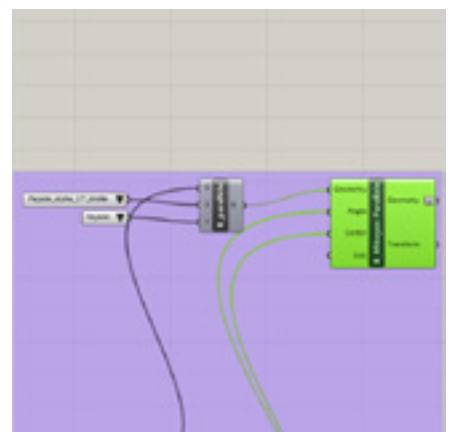
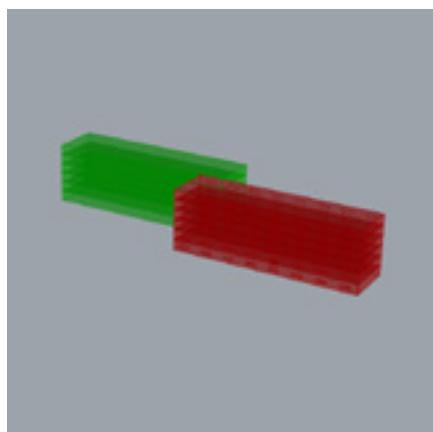
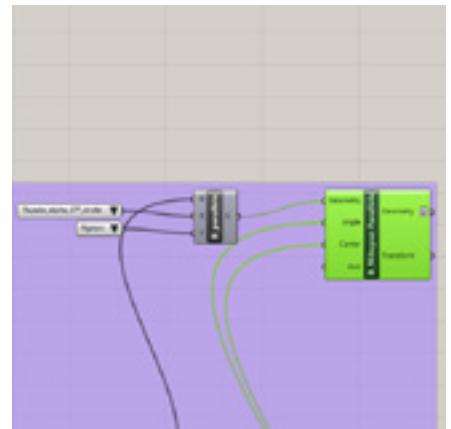
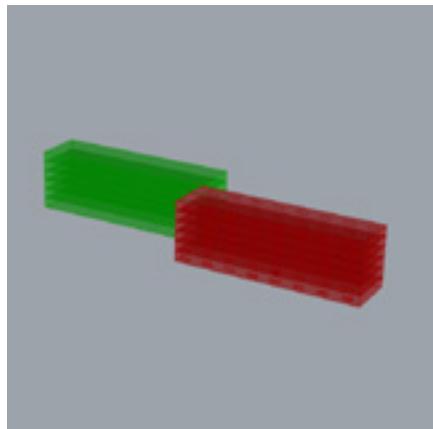
Ensuite, il suffit de choisir le nombre d'étages désirés à l'aide de la value list.



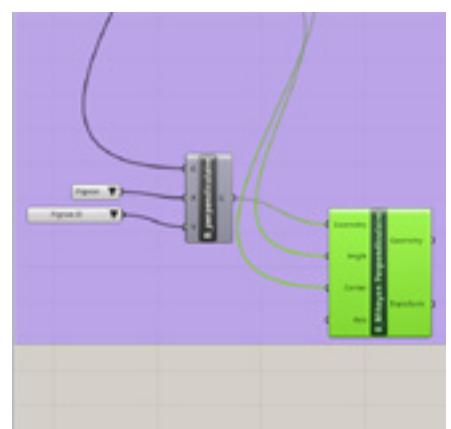
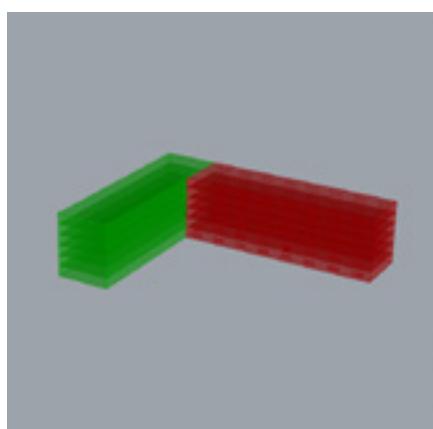
On fait ensuite apparaître le volume clone en activant (enable) la case **B_Mitoyen Parallèle**.



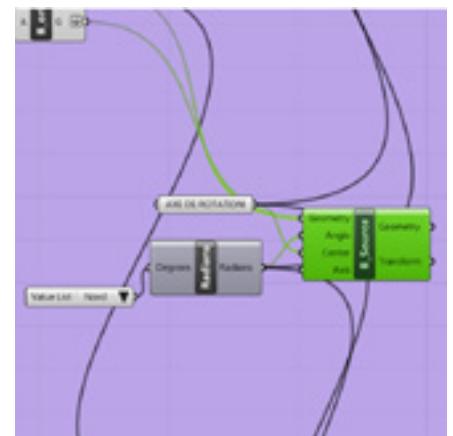
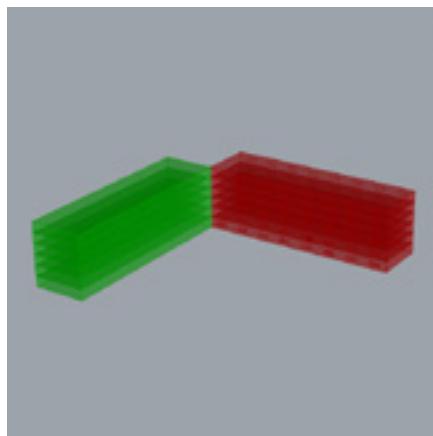
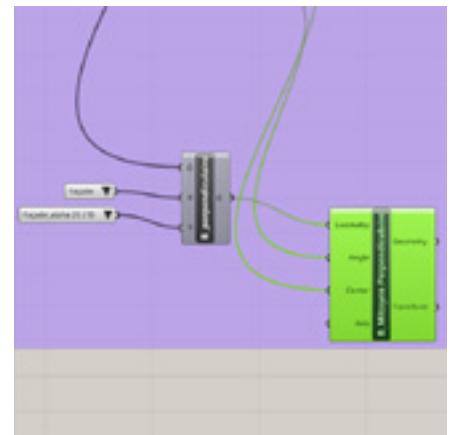
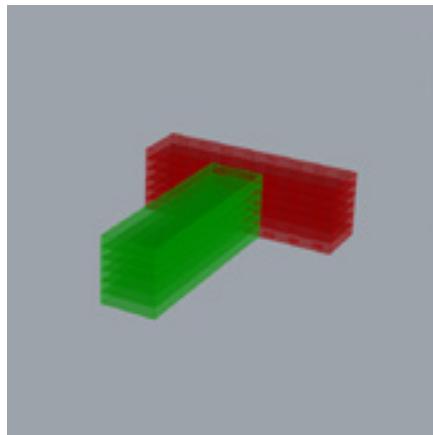
On utilise ensuite le value list pour choisir une mitoyenneté sur la façade ou sur le pignon.



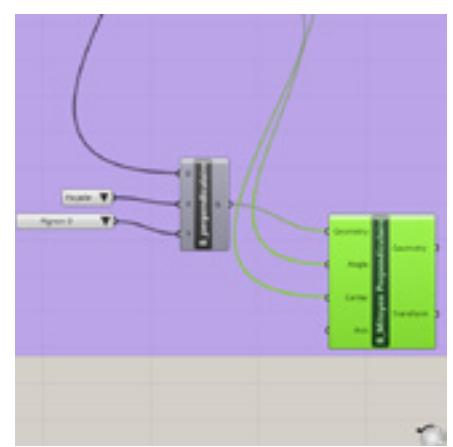
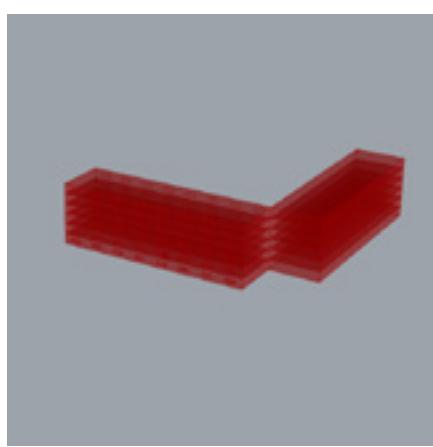
Pour utiliser un volume clone perpendiculaire on active la case B_Perpendiculaire.



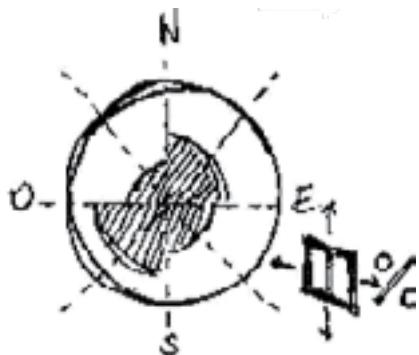
Encore une fois, on peut choisir une mitoyenneté sur les façades ou sur les pignons.



Enfin, on pourra choisir l'orientation avec une value list.

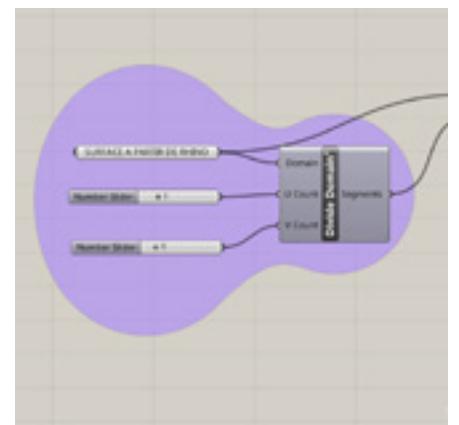
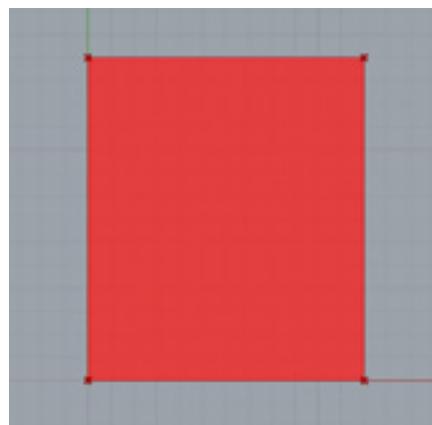


Porosité

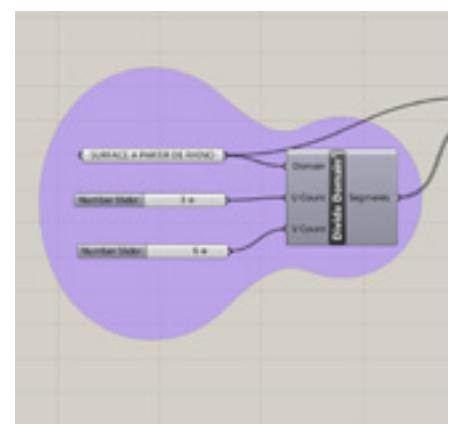
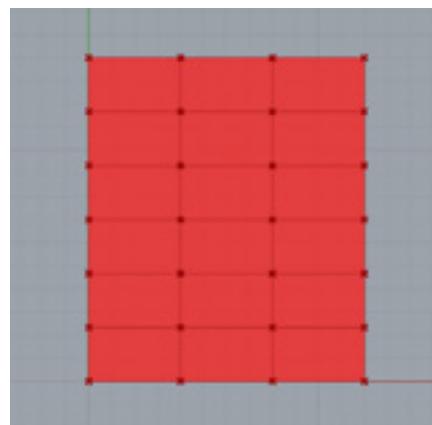


Porosité :

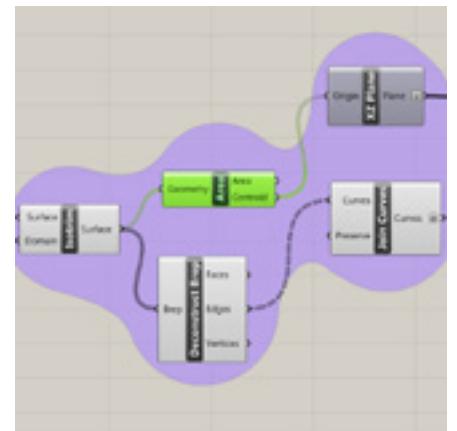
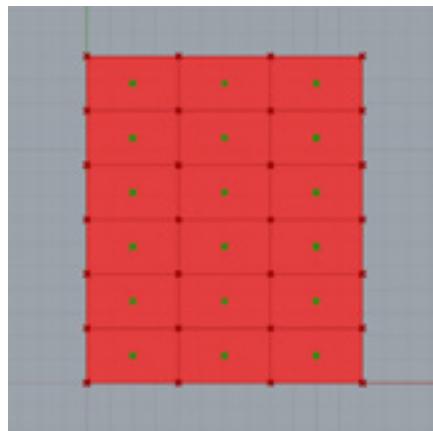
Le programme traitant de la porosité de l'enveloppe fonctionne en plusieurs étapes. La première version a été conçue pour fonctionner sur une seule façade, par la suite elle a été adaptée pour pouvoir être appliquée à des volumes composés de plusieurs façades. Ce processus est simple, il suffit de copier le code une fois par façade et de nommer chacune d'entre elles dans l'élément list item pour savoir quelle façade correspond à chaque orientation.



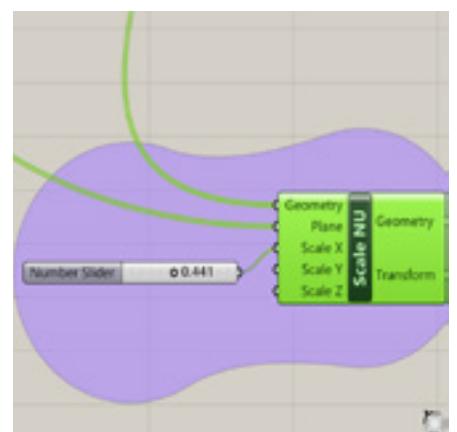
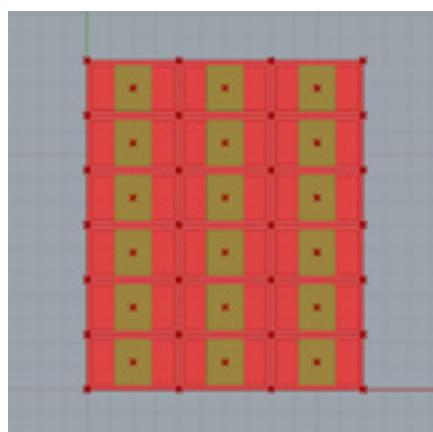
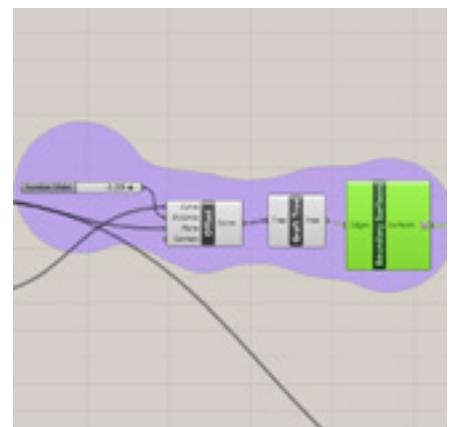
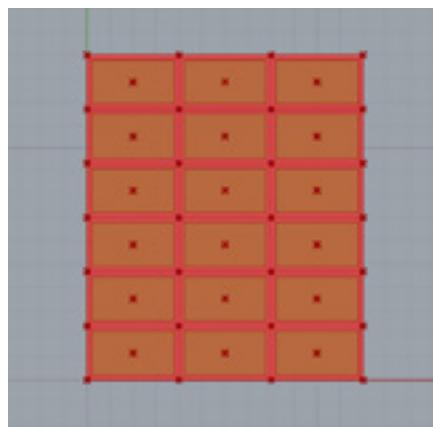
La première étape consiste à diviser une surface en un nombre de lignes et de colonnes correspondant aux nombre d'étages et de fenêtres par étage sur le bâtiment étudié.



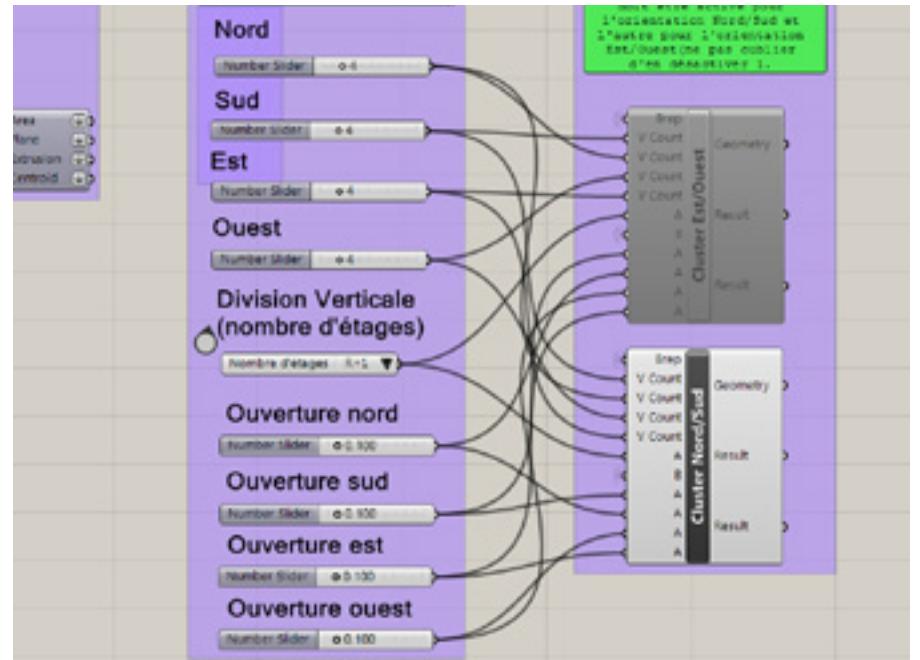
Une fois cette étape terminée, on repère le centre de chacune des cellules faisant office de point de référence pour définir le bon pourcentage de fenêtres.



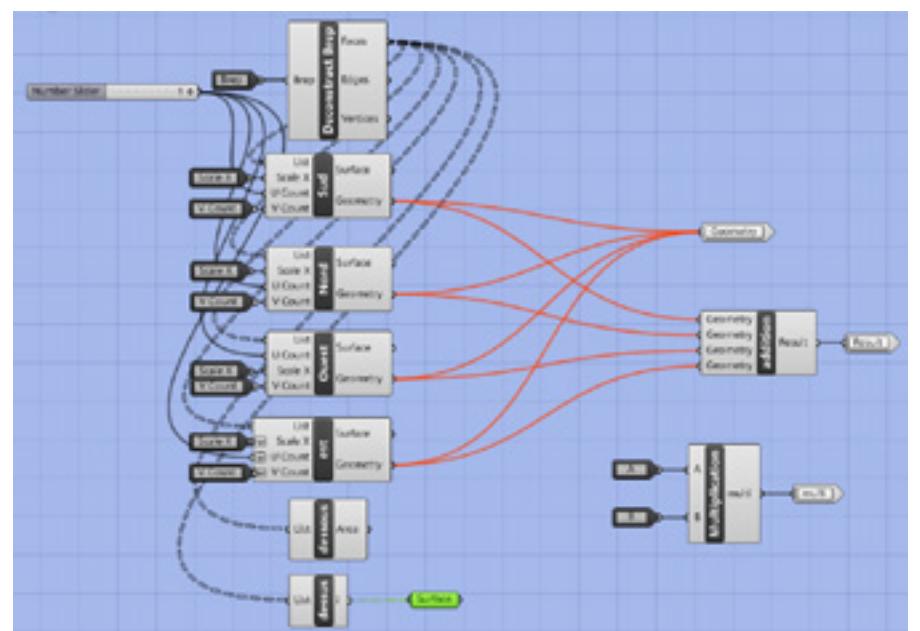
L'étape suivante consiste à créer un décalage entre la bordure de chaque cellule et la fenêtre en elle même pour simuler la taille d'une menuiserie, ici on choisit un offset de 20cm. Cependant, cette étape a été supprimée de la version finale car elle impliquait une imprécision sur la mise à l'échelle finale des fenêtres. L'idéal serait de la réintroduire dans le programme final tout en faisant en sorte que les sliders de mise à l'échelle des fenêtres prennent en compte ce décalage.



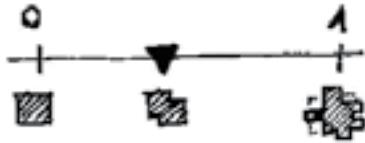
Pour chaîner ce programme et l'appliquer à plusieurs façades, on le copie et on nomme chaque portion correspondant à une façade. Pour rajouter des façades supplémentaires, il faut éventuellement changer les branchements de scale X à scale Y en fonction de l'orientation pour que la fenêtres soit dimensionnée correctement.



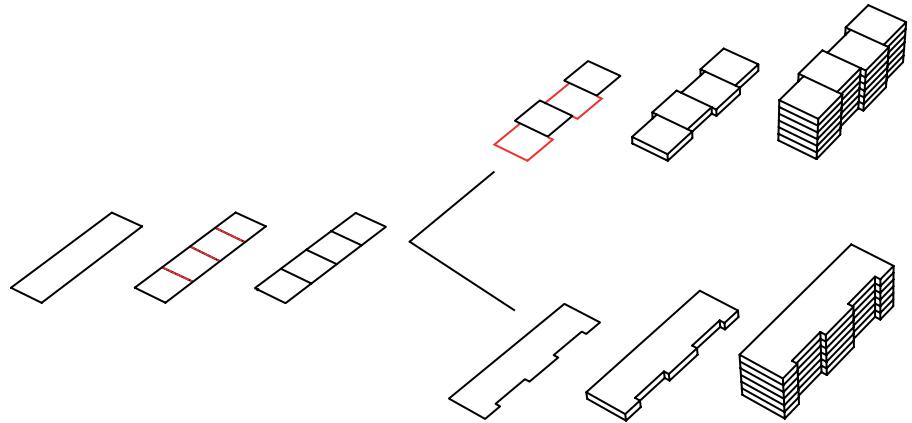
Le programme final a la forme suivante, on y retrouve uniquement les sliders modifiant les paramètres, à savoir : Le nombre de fenêtres par façades, le nombre d'étages et le pourcentage de vitrage pour chacune d'entre elles. Ce module sera ensuite directement branché sur l'outil de calcul energy plus pour obtenir les résultats. (NB: pour le cas des barres il faudra choisir entre les clusters nord/sud et est/ouest qui indiquent l'orientation des façades principales).



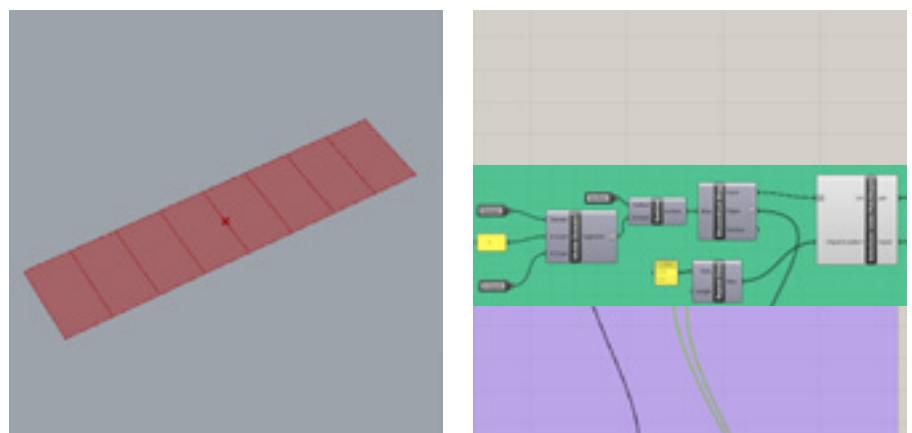
Rugosité



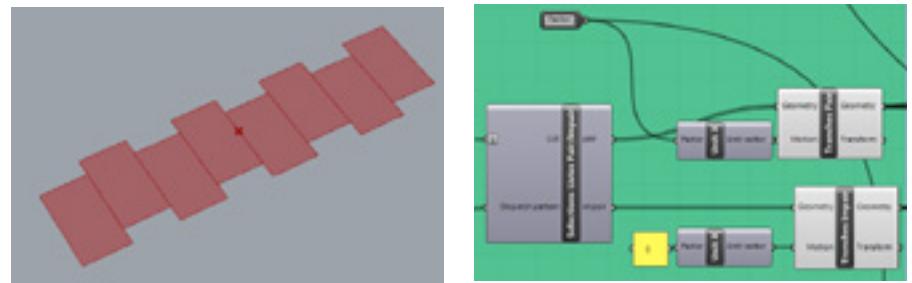
Précisons qu'il s'agit ici uniquement que de la paramétrisation de la rugosité pour des barres. Les tours et pavillons rugueux ont été modélisés directement sur Rhinocéros.



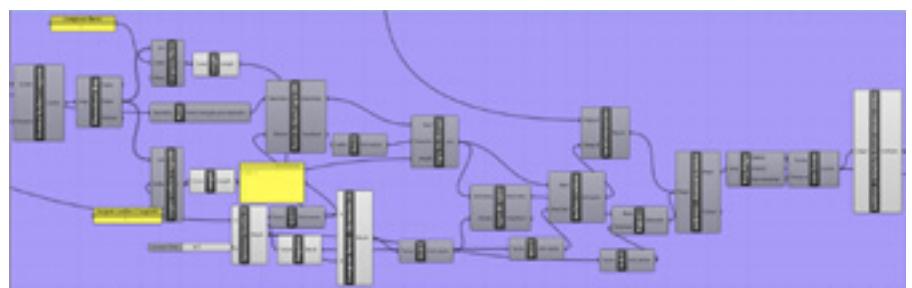
A partir d'une surface plane dont les dimensions correspondent à l'emprise au sol de la typologie de barre (56 par 15m), nous l'avons subdivisé en un certain nombre de tranches égales. Nous avons fixé 3 pas, à savoir tous les 3.5 , 7 , et 14 m. Ces dimensions se réfèrent à des trames de logements. Dans Grasshopper, cela revient à utiliser la fonction divide domain² et isotrim, ainsi qu'une list value aux valeurs souhaitées afin de régler le pas.

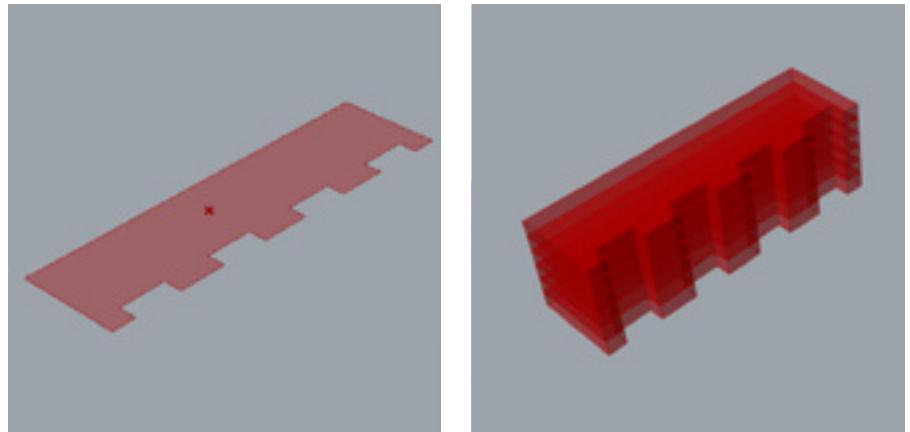


Nous avons ensuite déconstruit le Brep dans Grasshopper et sorti deux listes de faces de la surface obtenue : une liste des faces pairs et impairs. Puis nous avons décalé l'une des deux listes par rapport à la deuxième à l'aide du composant move.

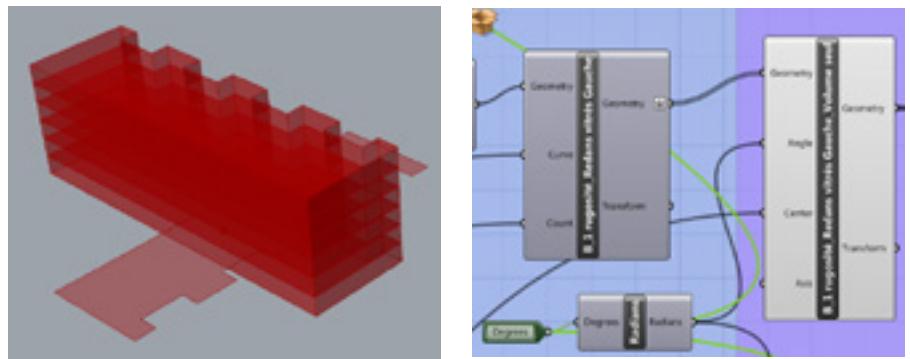


De cette manière, nous pouvons extruder la surface au sol et dupliquer le nombre d'étages afin d'obtenir un volume rugueux sur les deux façades principales. Cependant, il nous faut maintenant obtenir un volume rugueux uniquement sur une seule des façades principales. Pour cela, nous créons une ligne SDL, dont le point de départ correspond à la moitié du décalage de l'une des deux listes. La longueur de cette ligne correspond à la longueur de la barre, soit 56m. A partir de cette ligne, nous créons deux surfaces, une qui permettra de soustraire la moitié du décalage entre les deux listes, et l'autre, de combler l'espace restant entre l'autre moitié du décalage et la nouvelle ligne créée. Ainsi, nous avons un volume rugueux sur une seule des deux façades principales.

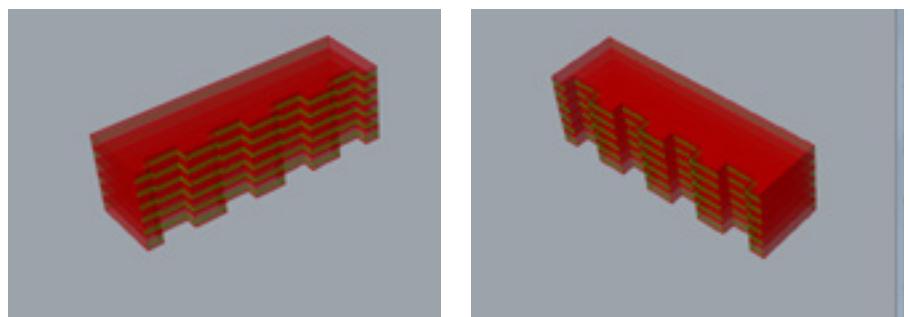




Enfin, nous venons appliquer un composant rotation pour faire pivoter le volume obtenu sur 360°.



Enfin, nous dessinons les bandeaux de porosité, dont la hauteur s'adapte à chaque développé de façade.



7

Analyser les premiers résultats

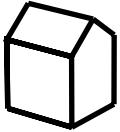
Fiabilité des résultats

Dans cette partie, nous allons présenter une série de graphiques. Ils proviennent des premières simulations que l'on a effectué sur EnergyPlus. Nous n'avons pas pu effectuer toutes les simulations car nous ne sommes pas parvenu à régler tout les bugs du moteur de calcul. Nous présentons ici une série de résultats qui nous apparaissent les moins incohérents.

Les résultats des besoins chauds nous semblent plausibles. Il faut toutefois préciser que les données pour les besoins froids sont largement surestimées. Cela est probablement dû à des paramètres qui ne sont pas ajustés. Il peut s'agir de la ventilation naturelle ou de l'équipement de ventilation mécanique. Cela peut également concerter les scénario d'occupation du bâtiment (nombre de personne, activité, temps de présence).

Nous considérons donc que les besoins froids ne sont pas à prendre comme des valeurs absolues mais plutôt comme des risques d'inconfort estival potentiels.

Porosité



Ici sont présentés, les premiers résultats des simulations pour l'étude de la porosité d'un pavillon mono-orienté. Ce cas simplifié, nous permet d'évaluer l'influence de l'orientation de manière plus juste.

Nous adoptons la méthode quantitative. Le pourcentage de vitrage est fixé à des seuils de 10%, 30% et 60%.

La première série de graphiques, en haut de la page, se décompose selon les orientations.

On remarque que les besoins chauds diminuent légèrement avec l'augmentation du vitrage, en particulier au Sud où ils diminuent d'environ 25% entre une porosité à 10% et une à 60%.

Cela dit, cette diminution ne se vérifie pas pour le mono-orienté Nord pour lequel on observe une légère augmentation des besoins chauds.

On constate que l'influence de l'orientation est liée à l'augmentation de la surface vitrée. En effet, pour une porosité de 10%, les consommations sont plus ou moins équivalentes dans les différentes orientations. Cette donnée est représentée en pointillés noirs sur le graphique du bas de la page.

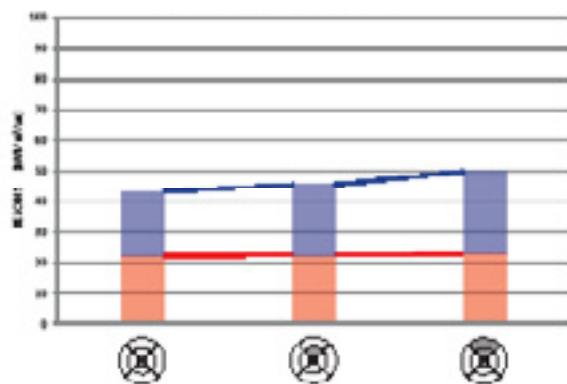
Lorsque l'on augmente la porosité pour la pousser à 60% on observe des différences plus nettes entre les orientations.

Les risques d'inconfort estival augmentent en même temps que la quantité de vitrage. On peut établir le classement suivant, de l'orientation la plus favorable à la plus consommatrice :

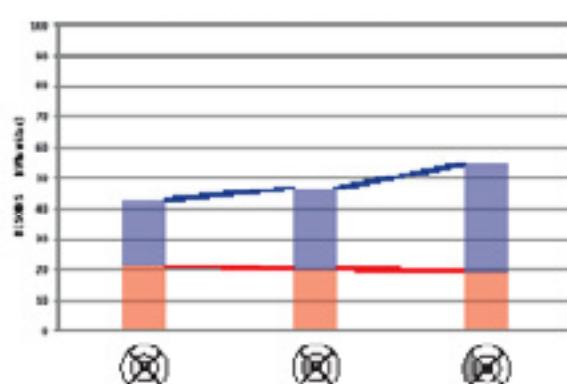
Nord / Ouest / Sud / Est

Si l'on observe uniquement les besoins chauds, dont la justesse est plus fiable, le classement serait le suivant :

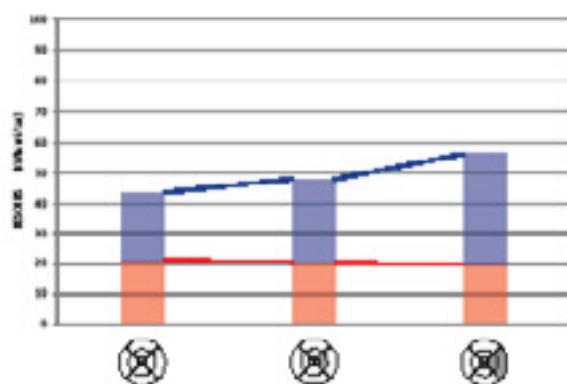
Sud / Ouest / Est / Nord



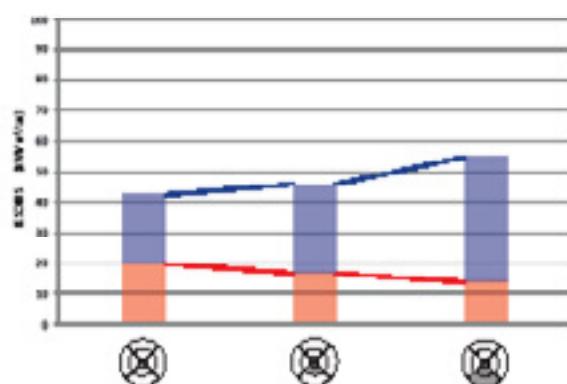
NORD



OUEST



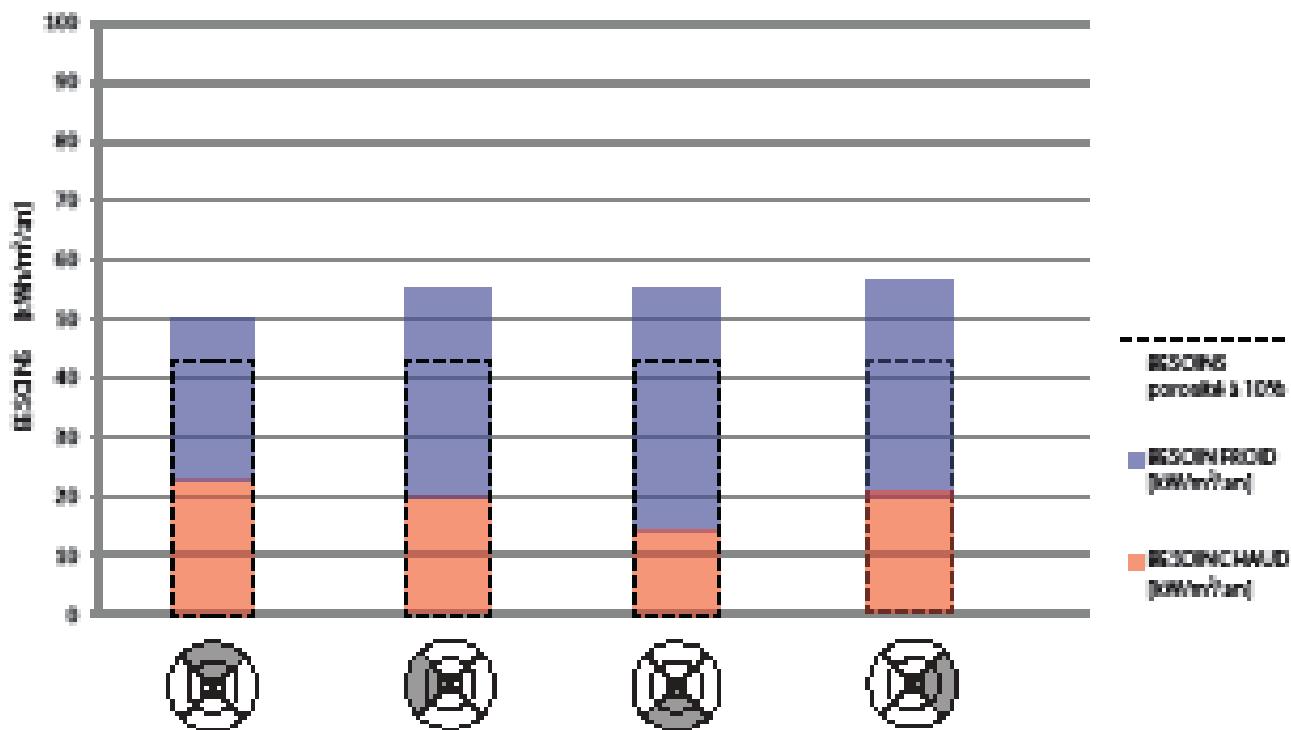
EST



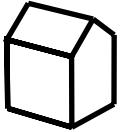
SUD

PAVILLON MONO-ORIENTÉ

POROSITÉ À 60%



Porosité



Nous pouvons lire deux comparaisons, sur la page de droite. La première est classée par besoins de chauds croissants et la seconde par besoins totaux croissants. Il s'agit de la méthode qualitative qui consiste à ne pas faire varier la surface totale de vitrage mais à la répartir de manière différente en fonction des variantes.

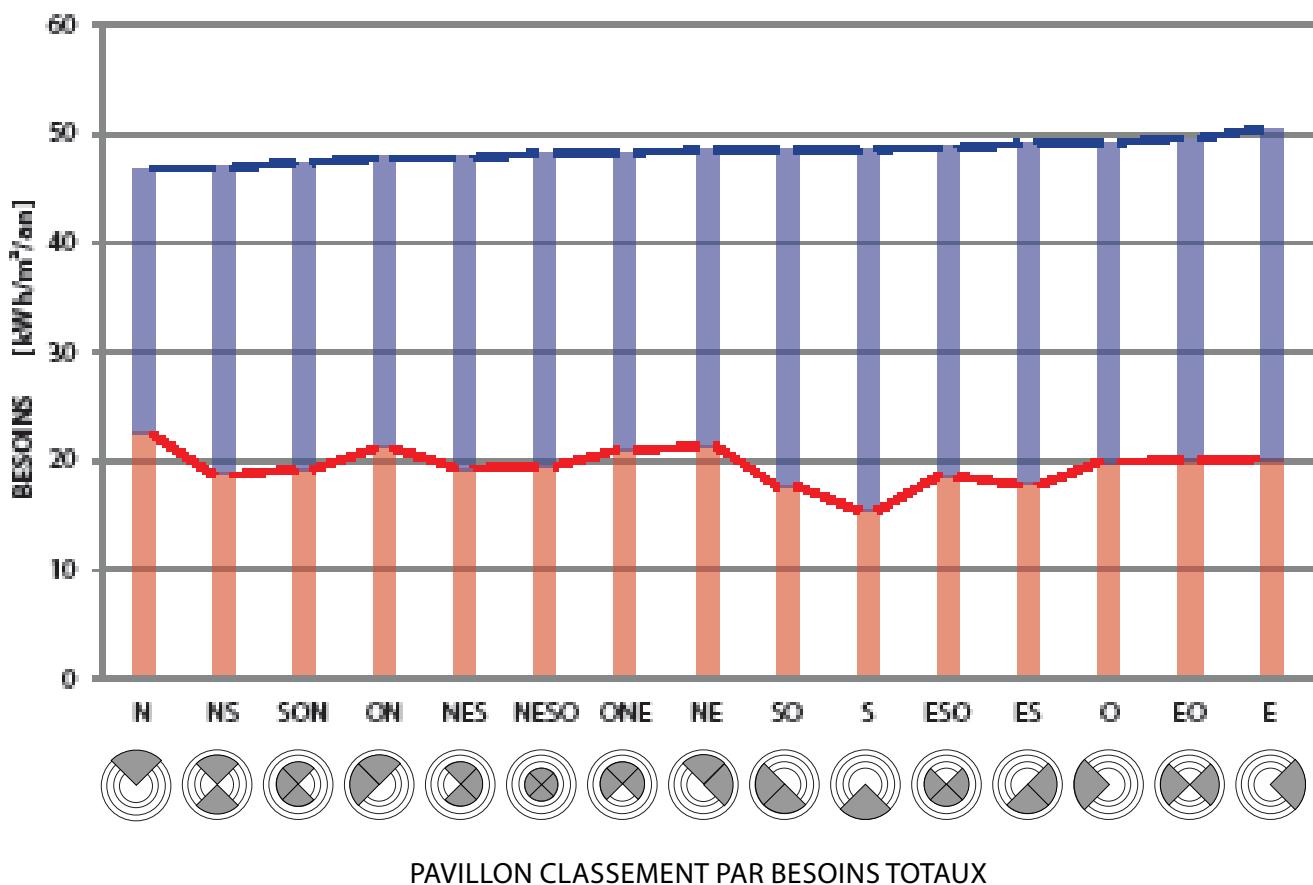
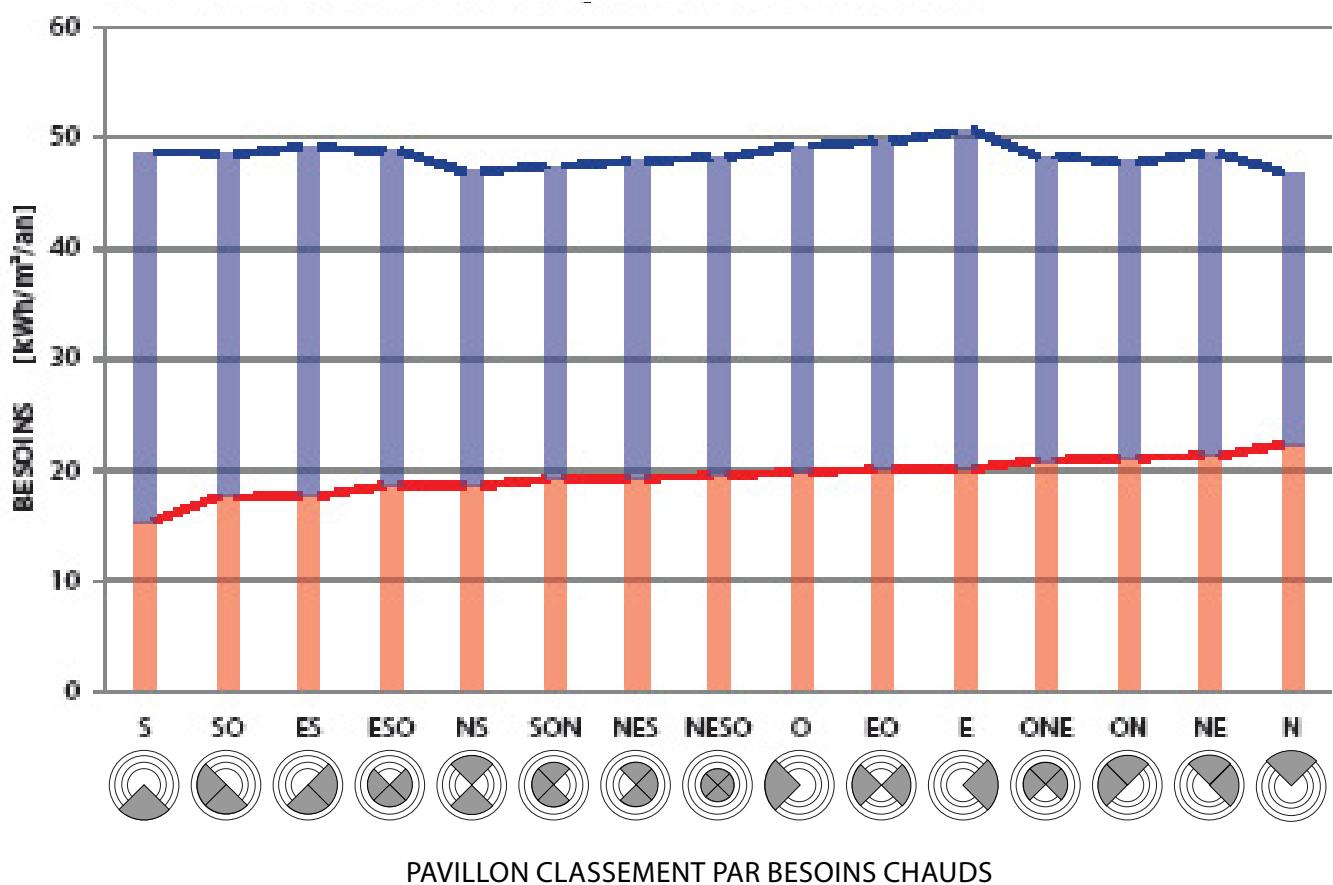
Sur le premier graphique, représentant le classement par besoins chauds dans l'ordre croissant, nous notons sans grande surprise un classement des orientations assez nette: Sud, Ouest, Est et Nord
L'orientation au Sud est celle dont les besoins chauds sont les plus faibles. Tandis qu'au Nord, les besoins chauds sont les plus importants.

Les mono-orientés représentent les extrêmes. En effet, si le pourcentage de vitrage reste constant sur l'ensemble du bâtiment, la surface de vitrage par orientation, elle, varie beaucoup. Entre le mono-orienté et l'isotrope elle est, très logiquement, divisée par quatre et passe de $24m^2$ à $6m^2$ par façade poreuse. Nous nous sommes toutefois attachés à ce que les quantités de vitrage choisie ne dépasse pas 40% pour les mono-orientés et 10% par façade pour le cas de l'isotrope. Nous avons conscience que cela ne représente pas la moyenne néanmoins ces chiffres restent réalistes.

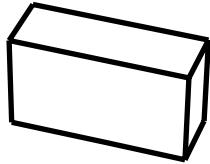
Le graphique du bas de la page, représente le classement par besoins totaux. Cela cumule les besoins chauds et les besoins froids. Dans ce cas, c'est l'orientation Nord qui est la plus favorable avec un très faible risque de surchauffe en été.

Contrairement à ce que l'on a coutume de dire, c'est à l'Est que le risque d'inconfort estival est le plus important. Ce résultat confirme notre première analyse effectuée sur Casanova (voir partie 5) qui pointait du doigt la relation entre la quantité de vitrage et l'influence de l'orientation.

Analyse des premières simulations
EnergyPlus correspondant à la typologie
des pavillons pour la facteur de porosité.



Porosité



Analysons maintenant le comportement de la barre traversante. Nous étudions donc deux variantes : la barre Est/Ouest et la barre Nord/Sud.

Dans le cas de la barre Est/Ouest, au delà d'un certain seuil, autour de 30%, les besoins chauds ne diminuent plus. Ceci n'est pas le cas de l'orientation Nord/Sud.

Malgré cela, les besoins chauds sont équivalents entre les deux variantes. Cela dit, elles se distinguent par leurs besoins froids, que l'on traduit par un risque de surchauffe en été.

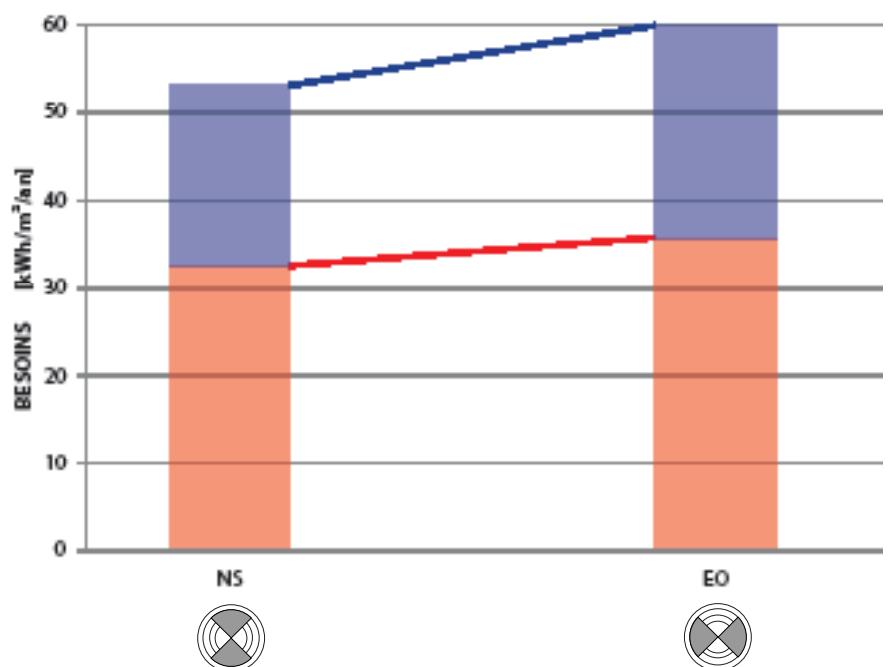
Dans les deux cas, le risque d'inconfort estival augmente avec le vitrage. Cependant, cette augmentation est trois fois plus importante dans le cas de la barre Est/Ouest, où les risques d'inconfort estival sont élevés.

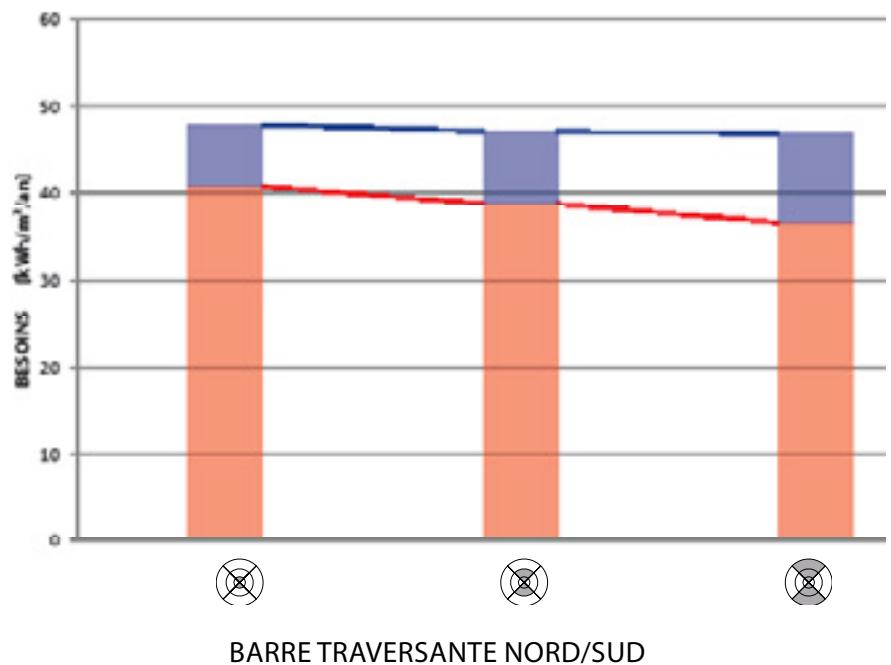
MÉTHODE QUALITATIVE

CLASSEMENT PAR BESOINS TOTAUX ET BESOINS CHAUDS

- BESOIN FROID
[kW/m²/an]
- BESOIN CHAUD
[kW/m²/an]

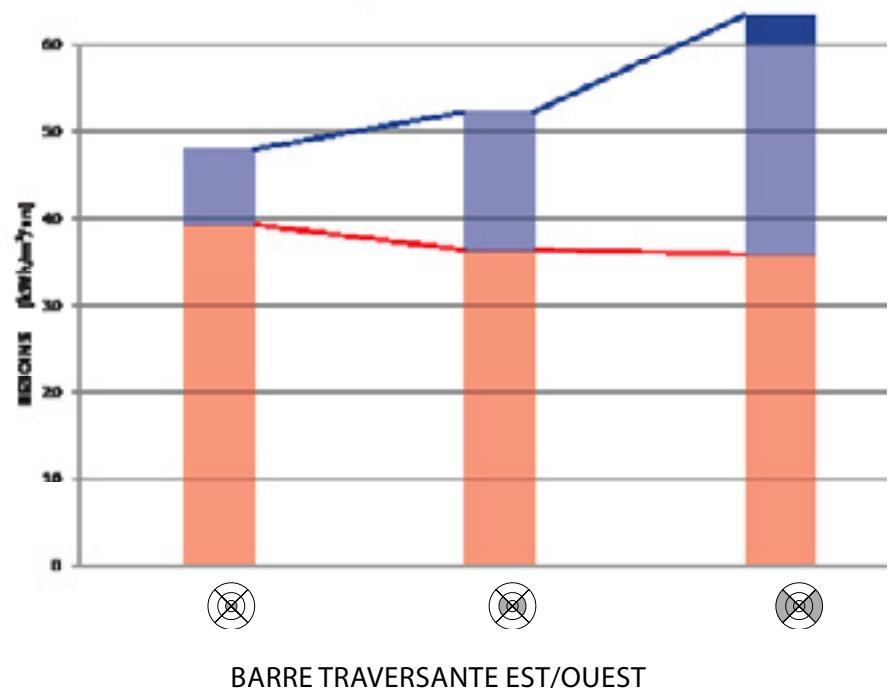
Analyse des premières simulations EnergyPlus correspondant à la typologie des barres pour la facteur de porosité.

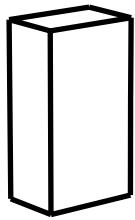




MÉTHODE QUANTITATIVE
CLASSEMENT PAR BESOINS
TOTAUX

■ BESOIN FROID
[kWh/m²/an]
■ BESOIN CHAUD
[kWh/m²/an]





Porosité

Observons maintenant le comportement d'une tour. Elle est caractérisée par son isotropie, avec au moins 3 façades poreuses. Dans ce cas, l'influence de l'orientation est minime pour cette typologie, comme on peut l'observer sur le graphique du haut.

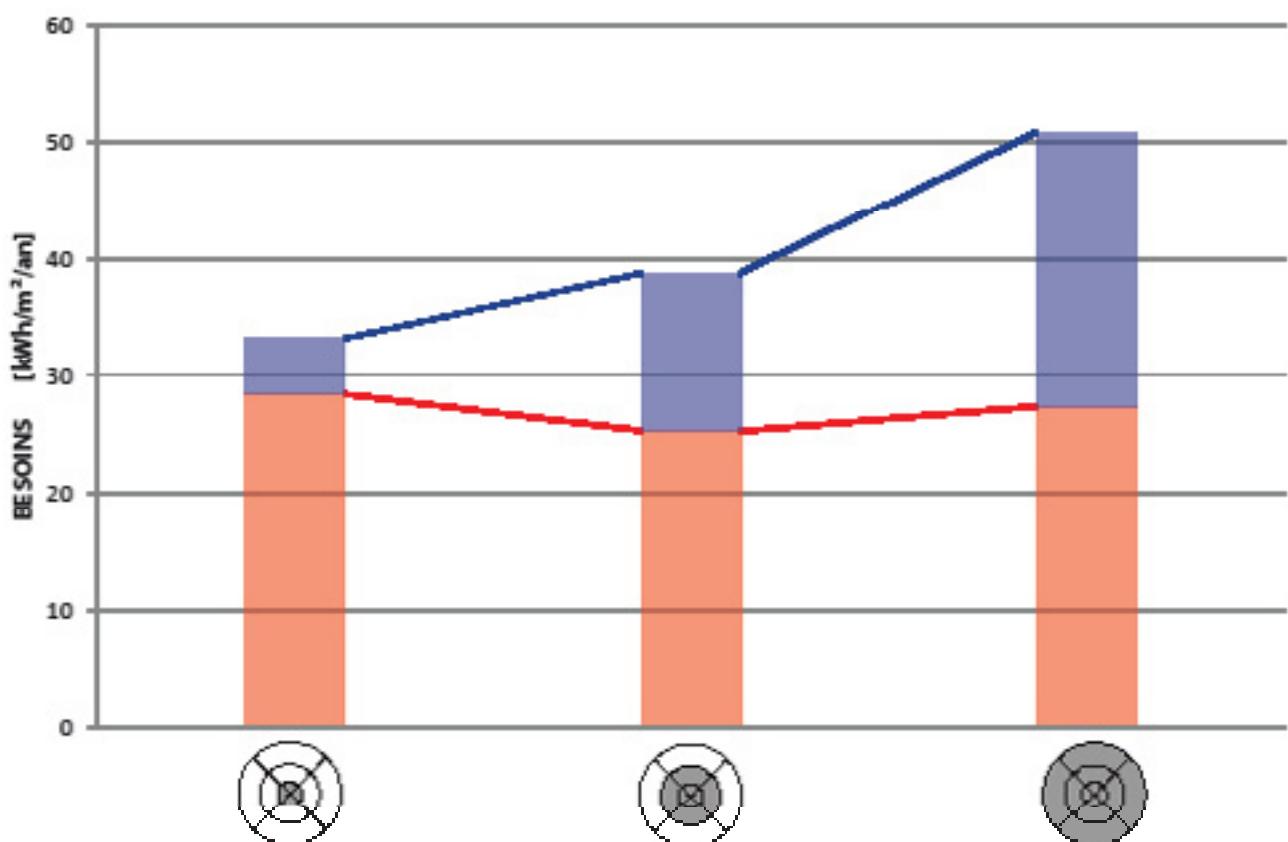
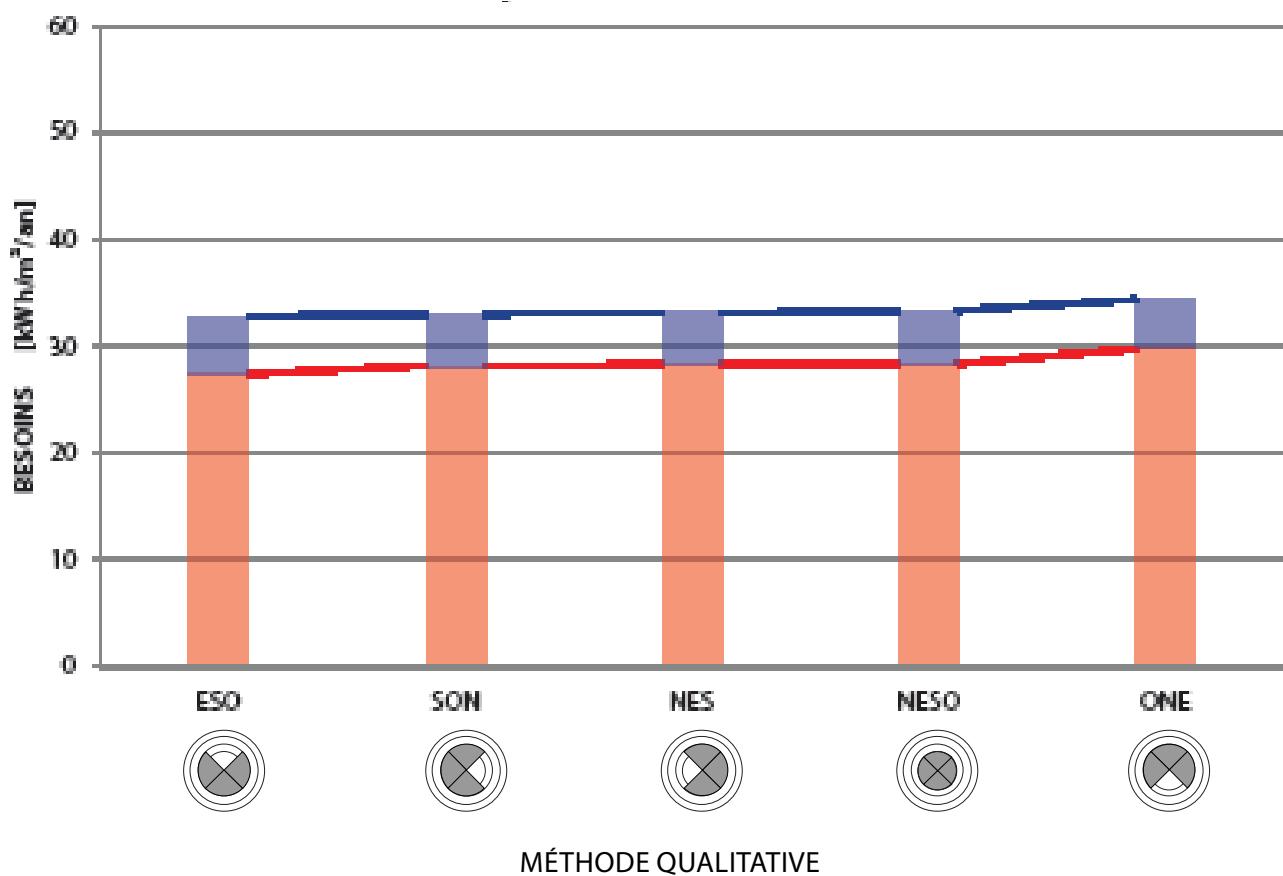
La méthode qualitative n'apporte pas des résultats très intéressants dans le cas de la tour puisqu'il existe très peu de variantes. Cela dit, nous observons une courbe très particulière pour la méthode quantitative (voir graphique du bas).

Un pourcentage de vitrage trop important augmente fortement l'inconfort estival, comme c'est le cas pour la barre.

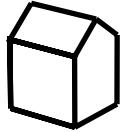
Les besoins froids augmentent linéairement en fonction de l'augmentation du vitrage.

Néanmoins, on observe un seuil de porosité au delà duquel les besoins chauds ne baissent plus. Les besoins chauds entre la porosité à 10% et la porosité à 60% sont quasiment équivalents. Il est certainement intéressant d'affiner les cas de porosité afin de vérifier la justesse de ces résultats.

Analyse des premières simulations
EnergyPlus correspondant à la typologie
des tours pour la facteur de porosité.



Rugosité



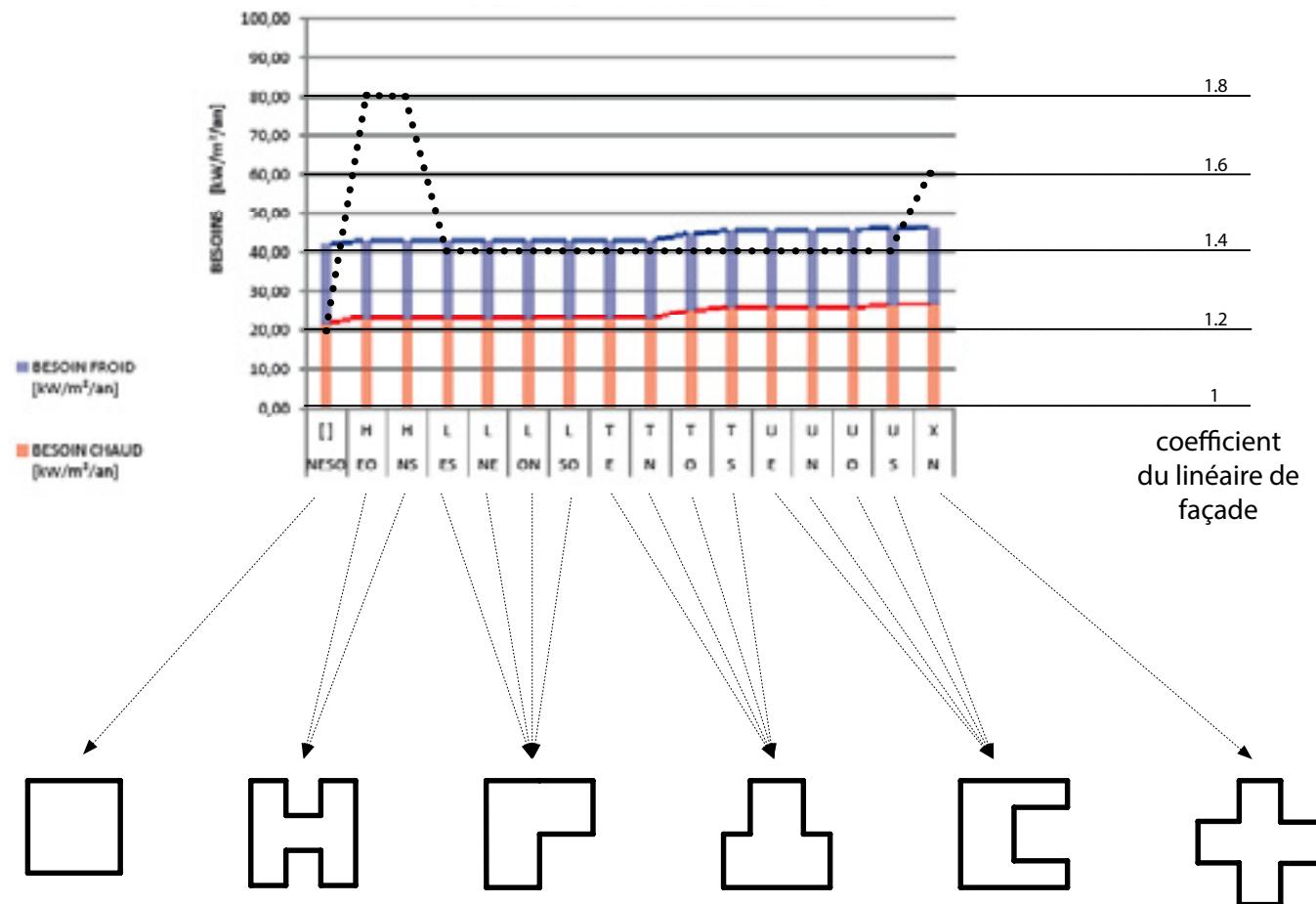
L'augmentation des besoins est proportionnelle au linéaire de façade. On constate une incohérence dans les résultats pour le cas de la forme en H, qui se présente comme étant plus favorable que la forme en L dont le linéaire est bien plus petit.

Nous ne sommes pas parvenu à interpréter ces résultats. Les interrogations demeurent. Il pourrait être intéressant de vérifier ces premiers calculs afin de voir si il est pertinent de poursuivre la recherche dans ce sens.

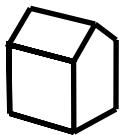
Analyse des premières simulations EnergyPlus correspondant à la typologie des pavillons pour la facteur de rugosité.



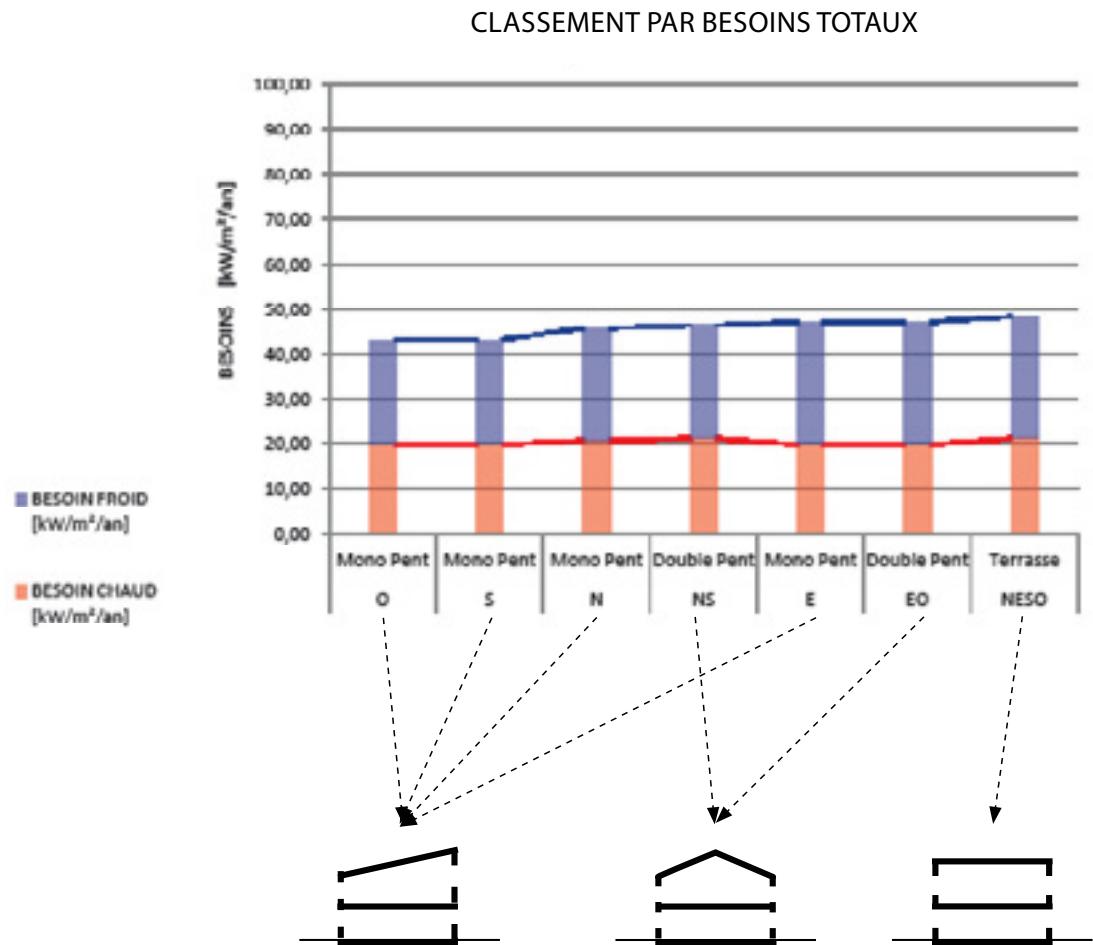
CLASSEMENT PAR LINÉAIRE DE FAÇADE



CLASSEMENT PAR BESOINS CHAUDS



Porosité

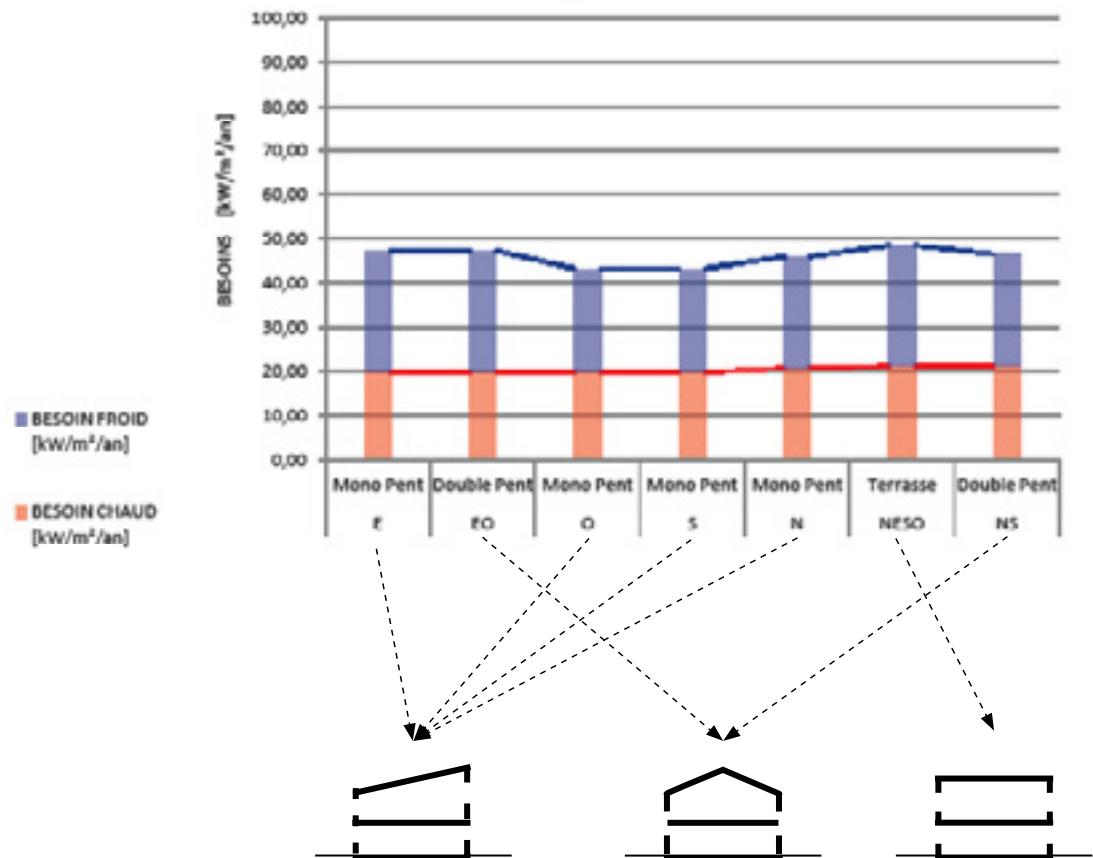


Nous avons étudié de manière très sommaire l'impact de la rugosité en toiture. Les pavillons sont à volume équivalent.

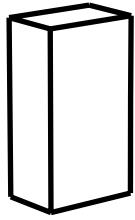
On observe que la toiture plate correspond au cas où les risques de surchauffe estivale sont les plus importants. L'orientation semblant favoriser les surchauffes est l'Est et non le Sud comme nous l'intuitions.

Analyse des premières simulations
EnergyPlus correspondant à la typologie
des pavillons pour la facteur de rugosité de
la toiture .

CLASSEMENT PAR BESOINS CHAUDS



La toiture plate et la double toiture orientée Nord/Sud sont les plus déperditives, donc avec les besoins chauds les plus importants. Contrairement à ce que l'on peut penser, ce n'est pas le type double pente qui est le plus favorable. Toutefois, le cas Est/Ouest est plus avantageux que l'orientation Nord/Sud.



Rugosité

L'objectif pour l'étude de la rugosité de la tour consistait à vérifier que les consommations augmentent linéairement avec l'accroissement du périmètre.

Notons que le volume lisse de base a les besoins chauds les plus importants tandis que les risques d'inconfort estival sont les plus faibles.

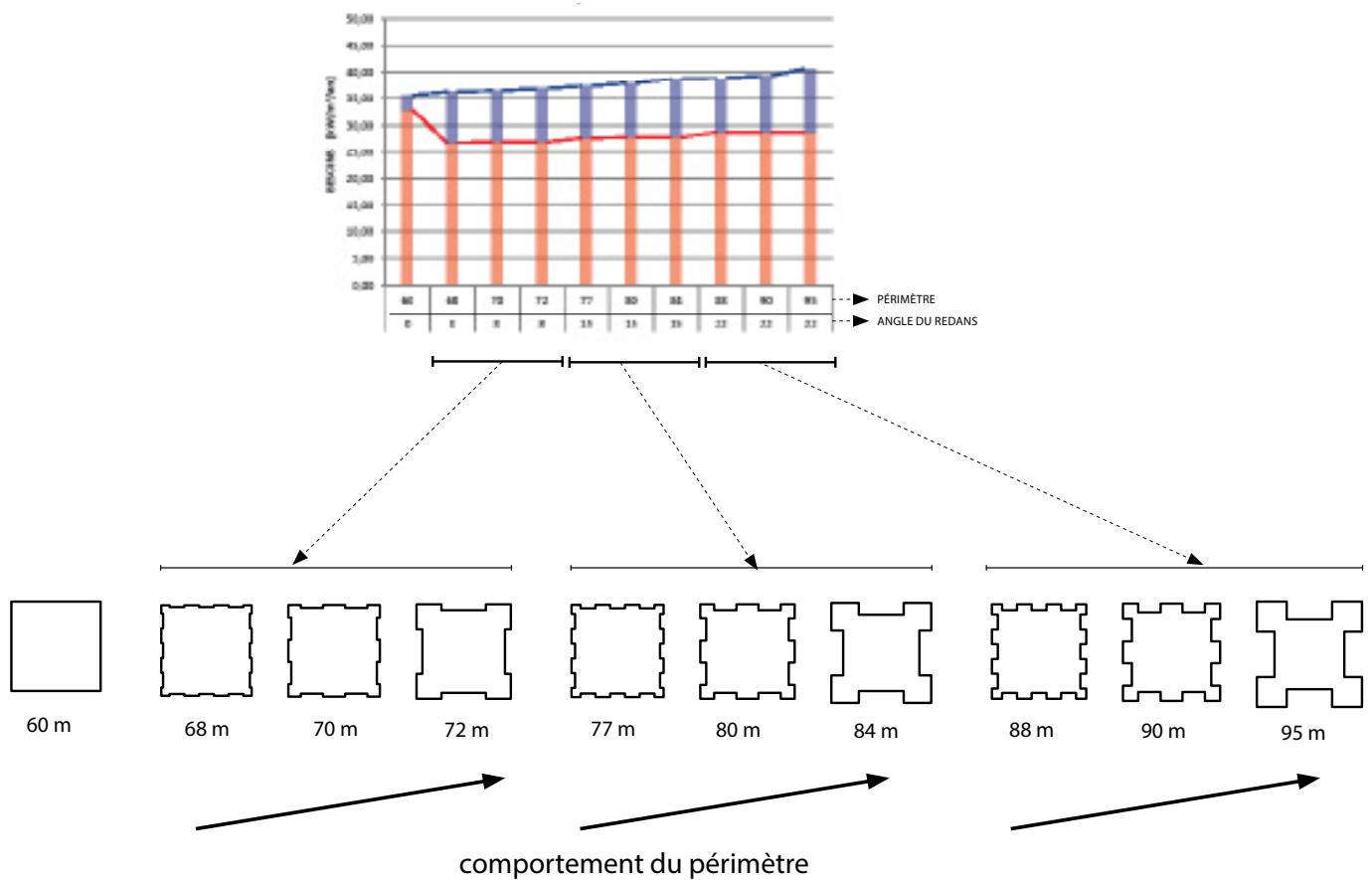
Pour ce qui est des besoins totaux, nous constatons que l'augmentation des consommations évoluent de manière proportionnelle par rapport au développé de façades.

Pour les besoins chauds, on observe un seuil de rugosité correspondant à peu près au périmètre moyen des différentes rugosités étudiées.

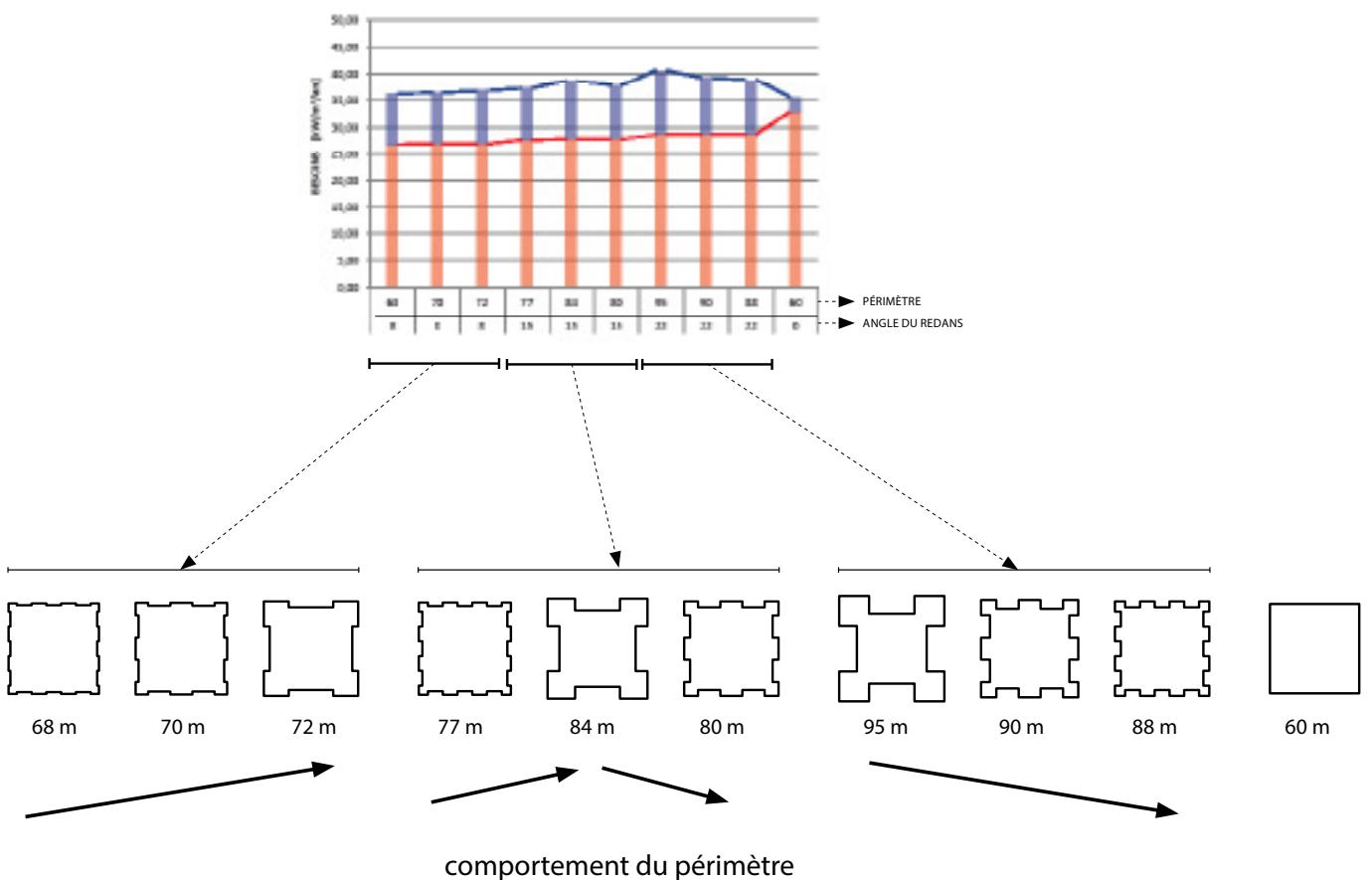
En conclusion, nous pouvons dire qu'au delà d'une certaine profondeur, les besoins chauds sont inversement proportionnels au linéaire de façade. Ce constat sur la géométrie du redan reste à vérifier et à affiner.

Analyse des premières simulations
EnergyPlus correspondant à la typologie
des tours pour la facteur de rugosité.

CLASSEMENT PAR BESOINS TOTAUX



CLASSEMENT PAR BESOINS CHAUDS



8

Conclusion

Portée de l'étude

Cette expérience nous a permis d'apporter notre point de vue sur une recherche déjà en cours. La difficulté a été de se réapproprier le sujet de cette recherche. Nous avons du mettre en place une méthode d'analyse rigoureuse.

Ce projet nous a permis de découvrir le monde de la recherche, tout en étoffant nos connaissances sur le comportement thermique des typomorphologies que l'on a étudiées.

En effet, nous nous sommes servi de notre capacité d'observation et de notre intuition d'architecte pour sélectionner et analyser des formes simplifiées du réel. Notre regard d'architecte nous a permis de poser des hypothèses de départ rapidement.

En tant qu'architectes, nous nous sommes emparés d'outils habituellement utilisés par les ingénieurs. Des outils qui nous paraissaient complexes et que l'on a su utiliser pour notre recherche. Bien que nos connaissances sur ces outils soient encore élémentaires, nous pouvons désormais dialoguer et/ou participer à des processus de recherche avec des ingénieurs dont les connaissances sont plus spécialisées.

La transdisciplinarité dans les métiers de la conception nous semble essentielle pour enrichir le projet.

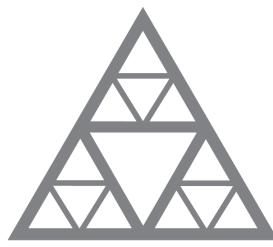
Étudier l'influence d'une combinaison de facteurs morphologiques sur les besoins

Voici les pistes de reflexion que nous proposons pour poursuivre le recherche IMR :

- Affiner les valeurs des paramètres de calcul en fonction des premiers résultats
- Croiser les facteurs en combinant les différents programmes pour faciliter la simulation d'une situation existante et de sa transformation
- Appliquer la même méthode à une enveloppe moins performante pour élaborer des hypothèses de réhabilitation morphologique
- Exercice de comparaison : bâtiment rénové à la forme simpliste VS bâtiment existant à la forme bioclimatique (énergie grise, consommation, coûts des travaux et d'entretien, durée de vie des constituants).
- Identifier des tissus urbains récurrents aptes à bénéficier d'une densification favorable pour chaque typologie.

Annexe 8

Rapport « Forme architecturale et performances énergétiques. Étude paramétrique »



École des Ponts
ParisTech

Rapport de stage scientifique

Mélanie MANGUIN

Elève-ingénieure en 1^{ère} année

Forme architecturale et performances énergétiques : Etude paramétrique

Stage réalisé au sein du laboratoire Navier de l'Ecole des Ponts ParisTech
6-8 Avenue Blaise Pascal, 77 455 Champs-sur-Marne

Avril 2014 - Juillet 2014

Maître de stage : M. Olivier Baverel
Tuteur de stage : M. Olivier Baverel et M. Guillaume Meunier

FICHE DE SYNTHÈSE

- Type de stage : Stage Scientifique
- Année académique : 2013/2014
- Auteur (Nom, Prénom) : Manguin, Mélanie
- Formation (1^{ère} année) : 1^{ère} année (Concours commun)
- Titre du rapport : Corrélation entre forme architecturale et performances énergétiques
- Organisme d'accueil : Ecole des Ponts ParisTech - Laboratoire Navier
- Pays d'accueil : France
- Maître de stage : M. Olivier Baverel
- Tuteur de stage : M. Olivier Baverel et M. Guillaume Meunier
- Mots-clés caractérisant votre rapport (4 à 5 mots maximum) : typologie, facteur morphologique, masque solaire, performance énergétique, réhabilitation.
- Thème Ecole : Architecture, Ville, Energie

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes tuteurs de stage Olivier Baverel et Guillaume Meunier pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter malgré leur emploi du temps chargé. Je remercie particulièrement M. Baverel pour la démarche qu'il m'a conseillé d'adopter, et M. Meunier pour ses explications sur les réglages des logiciels que j'ai pu utiliser. Je remercie également Jean-François Bassel et Raphaël Ménard pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour l'encadrement du projet du DPEA Post-Carbone. Enfin, je remercie les élèves d'architecture du DPEA pour leur investissement à notre projet.

RÉSUMÉ

Quatrième émetteur de gaz à effet de serre en France, le secteur des bâtiments est à l'origine de 18% des émissions nationales. Il est également le premier consommateur d'énergie. Ainsi, les enjeux énergétiques et climatiques que doivent relever les villes depuis une quarantaine d'années ont contribué à l'émergence de travaux scientifiques visant à analyser le lien entre morphologies urbaines et énergie. Il s'agit donc d'une part, de parvenir à définir des critères appelés facteurs morphologiques permettant de caractériser les formes urbaines en fonction de leur consommation d'énergie. D'autre, il est nécessaire de comparer les types de morphologies urbaines selon leur comportement énergétique.

Dans ce rapport nous présentons d'abord l'étude typologique d'un site existant à l'Est de Paris. Après avoir redéfini cette zone par typologies, nous avons identifié des critères de morphologie susceptibles d'influer sur les performances énergétiques. Parmi eux, nous avons choisi de nous intéresser plus spécifiquement à l'étude des masques solaires induits par l'environnement d'un bâtiment donné. Cette phase de recherche achevée, nous avons réalisé des simulations en nous appuyant sur les logiciels de modélisation paramétrique Rhinocéros+Grasshopper, afin de quantifier l'impact d'un masque.

Les résultats obtenus montrent que l'environnement d'un bâtiment joue un rôle prépondérant dans l'accès aux apports solaires et donc dans la consommation en énergie. Il est indispensable en construction d'orienter les percements des bâtiments de manière optimale. De plus, dans le cadre de la réhabilitation, de nombreuses propositions voient le jour, sans pour autant être mises en oeuvre.

TABLE DES MATIÈRES

Fiche de synthèse	2
Remerciements	3
Résumé	4
Table des matières	5
Liste des tableaux	6
Liste des figures	7
Liste des annexes	9
Introduction	10
I Analyse typologique de la Dorsale Est	12
I.1. Prise de connaissance du territoire et redéfinition des typologies par des gabarits	12
I.2. Identification des facteurs morphologiques influant sur les besoins énergétiques	16
I.3. Définition des facteurs par un ensemble de paramètres	20
II Méthodologie et approche	22
II.1. Théorie du rayonnement solaire	22
II.2. Présentation des outils informatiques	27
II.3. Première simulation intuitive pour étudier l'influence d'un masque solaire	29
III Deuxième étude paramétrique, plus typologique	39
III.1. Description des cas d'étude	39
III.2. Paramétrisation sous Rhinocéros+Grasshopper	41
III.3. Résultats et analyse	43
Conclusion et contribution personnelle	49
Annexe 1	51
Annexe 2	52
Bibliographie	53

LISTE DES TABLEAUX

1	Notations et conventions utilisées dans les calculs de rayonnement solaire	22
---	--	----

LISTE DES FIGURES

1	Carte du Grand Paris, montrant la Dorsale Est par rapport à la ville centre	11
2	Carte de la répartition des différentes typologies de logement, réalisée sur Autocad ...	13
3	Comparaison des éléments de morphologie des typologies répertoriées	15
4	Simplification du classement typologique	16
5	Illustration des trois facteurs environnementaux pour chaque typologie	17
6	Illustration des trois facteurs architecturaux pour chaque typologie	18
7	Liens morpho-énergétiques pour le cas du pavillon	19
8	Liens morpho-énergétiques pour le cas de la barre	19
9	Liens morpho-énergétiques pour le cas de la tour	20
10	Définition des facteurs par un ensemble de paramètres	20
11	Apports solaires reçus par une surface : notations et définitions	22
12	Course du Soleil pour une latitude de 46°N. En abscisse, l'azimuth. En ordonnée la hauteur angulaire	23
13	Exemple de carte d'éclairement réalisée sous Diva	27
14	Définition des paramètres de la simulation	27
15	Rayonnement solaire reçu en été en fonction de l'orientation, pour un masque de largeur moyenne	34
16	Rayonnement solaire reçu en hiver en fonction de l'orientation, pour un masque de largeur moyenne	35
17	Rayonnement solaire reçu en été en fonction des dimensions de masque, pour une orientation Sud	36
18	Rayonnement solaire reçu en hiver en fonction des dimensions de masque, pour une orientation Sud	36

LISTE DES FIGURES (2)

19	Rayonnement solaire reçu en été selon différentes positions typo/masque, pour un masque de hauteur 12m et de largeur 5m	37
20	Rayonnement solaire reçu en hiver selon différentes positions typo/masque, pour un masque de hauteur 12m et de largeur 5m	38
21	Influence du biais sur les apports solaires reçus par une tour, pour une orientation Sud	44
22	Rapport entre énergie solaire reçue en hiver et énergie solaire reçue en été, pour tous les cas de figure typologie + masque orientés au Sud	45
23	Rapport entre rayonnement solaire reçu en été et rayonnement solaire reçu en hiver par une maison individuelle, pour tous types de masques, selon l'orientation	47
24	Comparaison de l'impact de différents masques en hiver sur une maison individuelle, selon l'orientation	48
25	Comparaison de l'impact de différents masques en été sur une maison individuelle, selon l'orientation	48
26	Définition des matériaux	52
27	Surface de calcul et problème aux limites	52

LISTE DES ANNEXES

1	Définitions	50
2	Réglages de DIVA et RADIANCE	51

INTRODUCTION

Les préoccupations énergétiques actuelles

Les chiffres actuels affirment que l'humanité aurait besoin de 1,2 Terre pour pouvoir vivre de manière durable. Dans *Limits to Growth*, Dennis Meadows prédisait en 1972 que nous usons les ressources naturelles dont nous disposons plus vite que nous ne le devrions, et que nous avons d'ores et déjà épuisé les capacités de la Terre à fournir une vie durable aux humains. Ce document a représenté une étape clé dans la prise de conscience de l'impasse énergétique vers laquelle le monde se dirige. Aujourd'hui, les chiffres actuels confirment cette tendance, et montrent même qu'elle risque de s'accentuer dans les années à venir. En effet, les besoins énergétiques mondiaux devraient être multipliés par un facteur compris entre 1,5 et 3 d'ici 2100.

Dans ce contexte inquiétant, la recherche d'alternatives durables se développe, notamment en ce qui concerne le secteur du bâtiment. En effet, en France, plus de la moitié du parc bâti est antérieur à 1975 et 75% du parc bâti pour 2050 a déjà été construit. Ainsi, ce n'est pas tant la construction qui primera pour les années à venir, mais la rénovation. De plus, la réhabilitation de ce parc particulièrement énergivore constitue un enjeu majeur dans la réduction des dépenses énergétiques.

Intégrer le fil d'une étude : Ignis Mutat Res

En 2013, des architectes-urbanistes et ingénieurs de l'École nationale supérieure d'architecture de la ville et des territoires (ENSAVT), de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) et du laboratoire UMR Navier se sont emparé du projet de recherche *Ignis Mutat Res* (IMR) «Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie», suite à une initiative lancée par le ministère de la Culture et de la communication. Ils se sont fixés comme objectifs de corrélérer les formes bâties, existantes ou rénovées, avec leurs performances énergétiques, par le biais d'indicateurs simples, que l'on a nommé indicateurs morphologiques (cf. Annexe 1). La « typomorphologie énergétique » ainsi construite constituera un outil de conception, de prévision et de repérage dans l'éventail des postures d'intervention possibles, à l'usage des urbanistes et des architectes : quel comportement énergétique peut-on associer à tel type de forme dans tel type d'environnement à telle période – qu'il soit ou non bâti ?

Ce projet de recherche est ancré sur une situation existante : celle de la « Dorsale Est », représentée sur la Figure 1. L'avantage est que l'on dispose ainsi d'un terrain clairement délimité dans la périphérie orientale de Paris, déjà bien analysé et cartographié, présentant une grande diversité de tissus.

L'équipe de recherche a eu la volonté de donner une dimension pédagogique en incluant au projet des élèves de l'École d'architecture de la ville et des territoires, et des Ponts ParisTech. Mon travail s'insère ainsi dans une étude que j'ai menée avec l'équipe du DPEA Architecture Post-carbone, à la suite du rendu intermédiaire d'IMR. Ce dernier exprimait la nécessité d'un retour sur le choix des typomorphologies. Il nous a été demandé de vérifier les indicateurs morphologiques trouvés lors de la phase précédente de la recherche, et éventuellement d'en dégager de nouveaux. Pour cela, il nous a été proposé d'utiliser des outils informatiques de modélisation et de prévision énergétique.

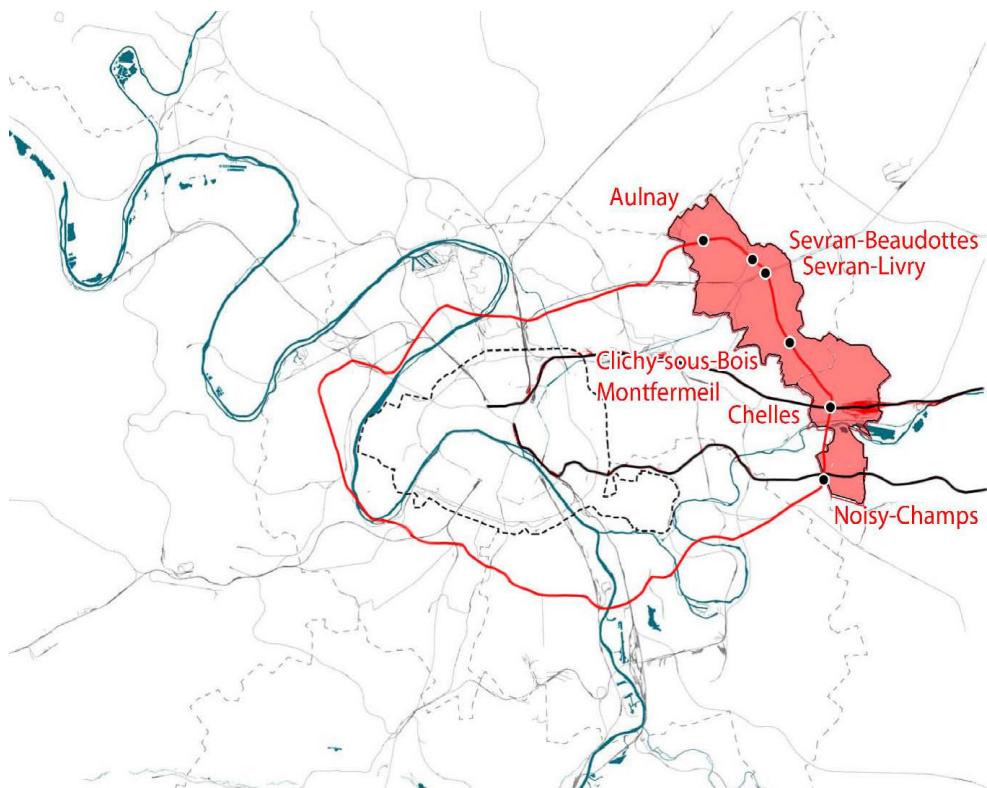


FIGURE 1 : Carte du Grand Paris, montrant la Dorsale Est par rapport à la ville centre

Corréler des critères morphologiques à des comportements énergétiques

A travers l'élaboration d'une méthode basée sur la modélisation du réel et la comparaison de simulations de cas existants, nous avons cherché à corréler la performance énergétique et la forme construite. Notre étude s'est ainsi orientée vers l'impact des différents facteurs morphologiques sur les consommations énergétiques, ce qui peut se problématiser de la manière suivante :

Dans le cadre du logement, en quoi la morphologie a-t elle un rôle à jouer dans la réduction des consommations énergétiques ?

Les élèves du DPEA Post-Carbone et moi-même avons dans un premier temps réalisé un catalogue de typologies existantes, en définissant des gabarits, par l'étude de la cartographie de la Dorsale Est. Puis, à l'aide de nos connaissances théoriques, nous avons déterminé les facteurs morphologiques susceptibles d'influencer les performances énergétiques. Chacun de nous s'est ensuite intéressé à un seul de ces facteurs; en ce qui me concerne, j'ai étudié l'impact des masques solaires (cf. Annexe 1). Pour cela, j'ai modélisé deux cas de figure à l'aide de logiciels de modélisation paramétrique (cf. Annexe 1) que je présenterai en IIe et IIIe partie. S'en est suivi un travail de récupération des données et d'analyse des résultats qui m'a menée à la conclusion de ce rapport.

I. ETUDE TYPOLOGIQUE DE LA DORSALE EST

Cette première partie de mon travail a été réalisée en commun avec les élèves du DPEA Post-Carbone de l'école d'architecture des villes et des territoires.

Cette première phase s'est articulée en deux points : puisque le but était d'établir des liens entre forme architecturale et performances énergétiques, nous nous sommes attachés à caractériser l'un et l'autre. Concernant la forme architecturale, nous avons d'abord pris connaissance du territoire sur lequel est centrée l'étude Ignis Mutat Res, afin de classer les logements existants en typologies. Nous avons ensuite défini un gabarit correspondant à chaque typologie pour pouvoir la représenter dans les logiciels de modélisation que nous avons utilisés par la suite. Puis nous nous sommes interrogés sur les facteurs morphologiques susceptibles d'influer sur les performances énergétiques. Ces facteurs étant ciblés, il a fallu les définir par un ensemble de paramètres pour la modélisation. Enfin, nous avons identifié et créé des cas d'étude basés sur ces paramètres. C'est ainsi tout un travail de pré-analyse que nous avons effectué pour savoir exactement quels fichiers Rhinocéros et Grasshopper (le nom des logiciels utilisés) nous allions créer.

I. 1. Redéfinition des typologies par des gabarits

Le terrain de notre expérimentation est ancrées sur une situation existante : celle de la « Dorsale Est ». Ce terrain, clairement délimité dans la périphérie Est de Paris, regroupe huit municipalités : Aulnay-sous-bois, Sevran, Livry-Gargan, Clichy-sous-bois, Montfermeil, Chelles, Champs-sur-Marne, Noisy-le-Grand. A l'aide du logiciel AUTOCAD et de Google Maps, nous avons fait un état des lieux des formes d'habitat de la Dorsale Est en cataloguant les formes urbaines une à une, comme le présente la carte de la FIGURE 2.

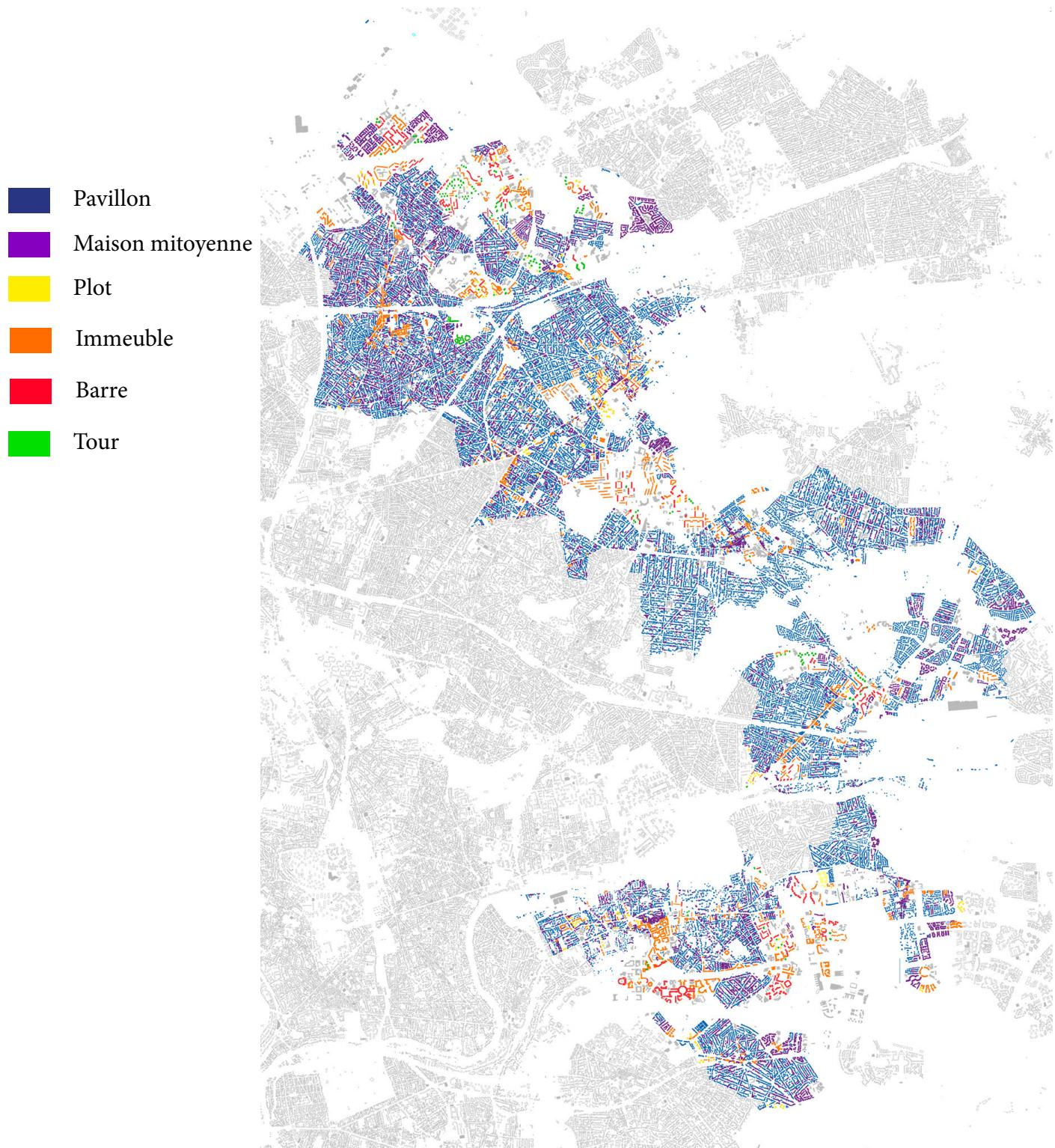
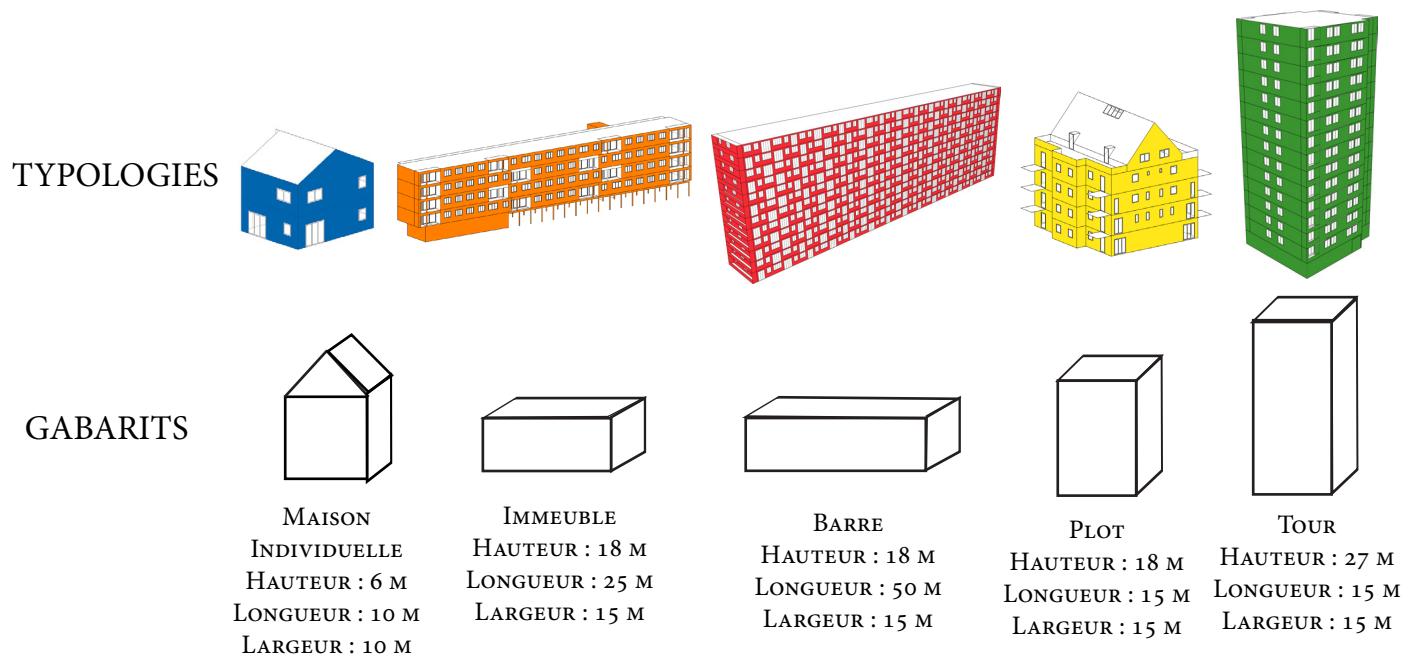


FIGURE 2 : Carte de la répartition des différentes typologies de logement, réalisée sur Autocad.

Dans le précédent rapport IMR, l'étude était menée sur la base de trois typologies de gabarit : le pavillon, la barre et la tour. Le saut d'échelle que ce choix implique nous a semblé exclure un grand nombre de typologies de bâtiments. Nous avons donc redéfini et affiné les formes habitées, aboutissant à six typologies, que l'on a caractérisées par des gabarits différents :



L'élaboration d'une telle carte (FIGURE 2) de la répartition typologique du bâtiment nous a permis de constater que le type pavillonnaire est largement majoritaire sur le territoire. On retrouve aussi un grand nombre de typologies intermédiaires, telles que l'immeuble et la maison en bande.

Comment évaluer des éléments de morphologie ?

Nous avons ensuite identifié des éléments de morphologie qui nous semblaient prévalents : le **pourcentage de surface vitrée**, la géométrie du linéaire de façade et le prospect.

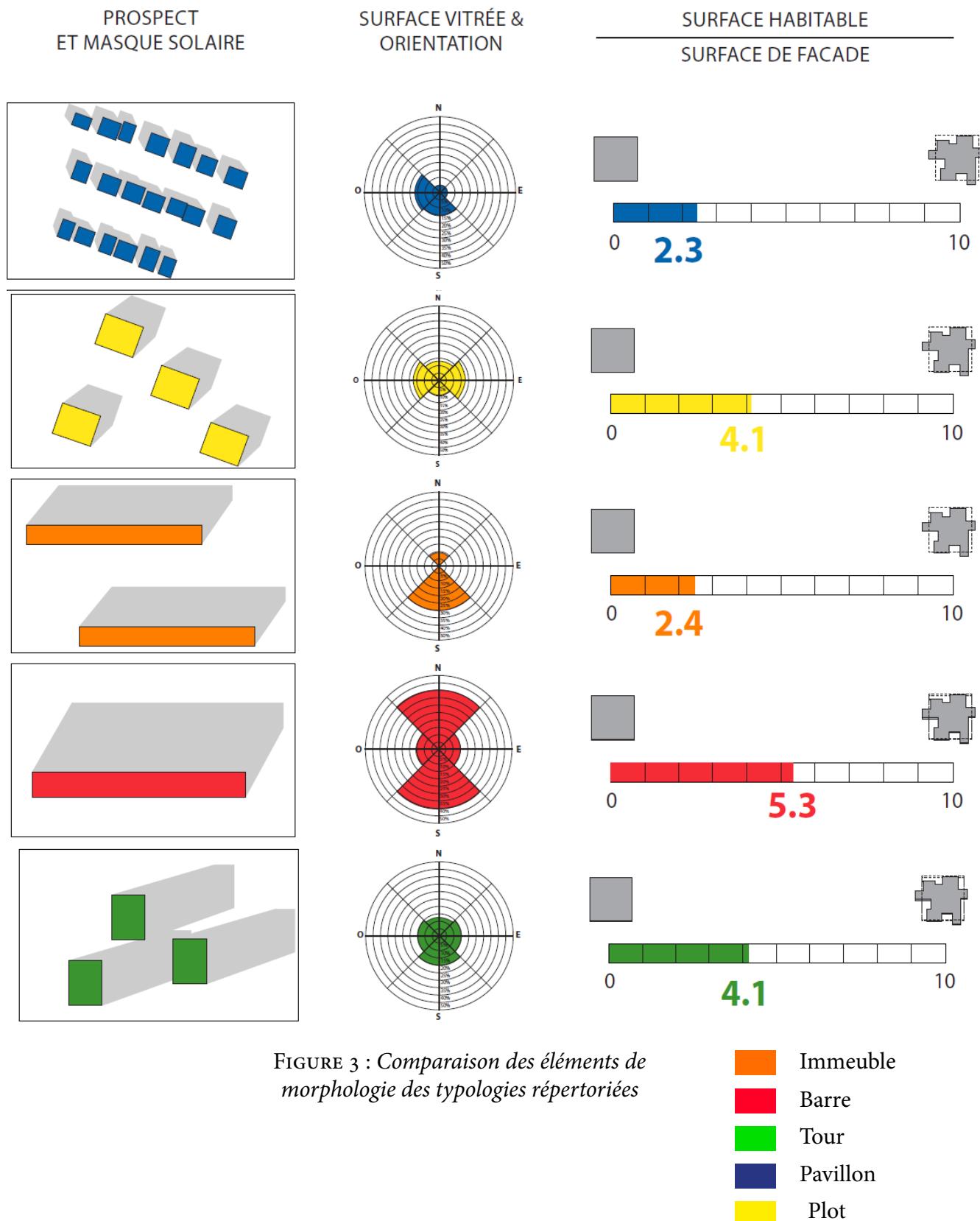
Le **linéaire de façade** (ou **développé de façade**) est en quelque sorte le contour d'un bâtiment. Intuitivement, on comprend bien qu'un bâtiment dont la façade est parfaitement lisse (FIGURE 3) n'aura pas le même comportement énergétique, qu'un bâtiment dont la surface est rugueuse (FIGURE 4), car il est plus profilé à l'air. Pour évaluer le linéaire de façade, on détermine l'**indice de compacité de Gravelius K** du bâtiment, dont la formule est la suivante :

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

avec P le périmètre de la typologie, A son aire. Cet indice correspond au rapport entre le périmètre de la typologie et celui d'un cercle dont le disque est de même aire. Le coefficient le plus petit correspond à des façades lisses. Plus le coefficient est élevé, plus les façades sont rugueuses.

Le **prospect** est une règle d'urbanisme organisant les volumes dans la ville. Se fondant essentiellement sur des considérations comme les ouvertures visuelles ou les apports de lumière dans la rue, le prospect dimensionne en premier lieu l'écart entre les bâtiments et les hauteurs de ceux-ci. Notre étude du prospect s'apparente donc à une étude de densité urbaine.

Pour évaluer ces éléments de morphologie, nous avons sélectionné les modèles que nous avons jugés les plus représentatifs des typologies décrites précédemment afin de trouver une façon de visualiser et de comparer les valeurs mesurées. Ce travail est illustré ci-dessous, en utilisant le même code couleur que précédemment :



1.2. Identification des facteurs morphologiques influant sur les besoins énergétiques

Pour comprendre l'influence de la forme d'un bâtiment, il s'agit de décomposer la forme en différents attributs. Ce sont ces attributs que l'on nomme **facteurs morphologiques**. Nous avons donc commencé par lier les différents facteurs morphologiques identifiés à des sous-catégories énergétiques. Selon la typologie, certaines influences sont à priori plus importantes. C'est lors de cette phase de réflexion que nous avons choisi de simplifier notre classement typologique Pavillon - Immeuble - Barre - Plot - Tour en Pavillon - Barre - Tour.

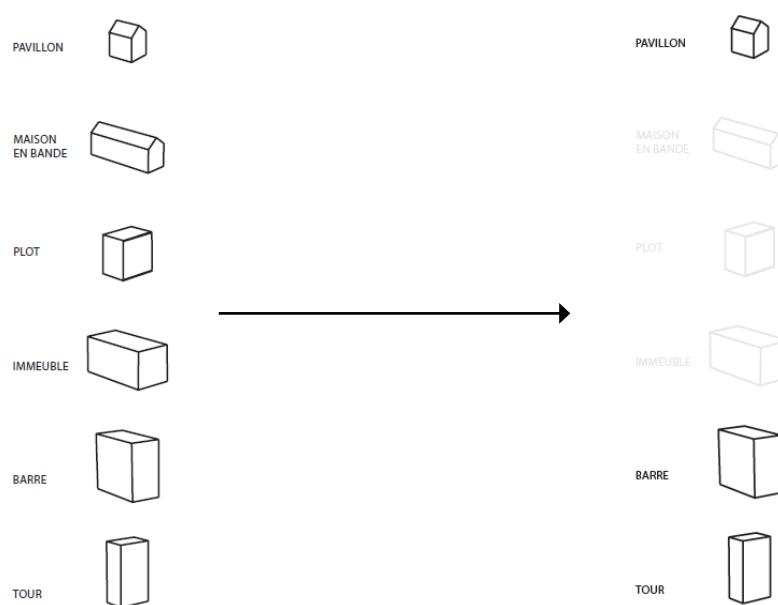


FIGURE 4 : *Simplification du classement typologique*

Nous avons effectué cette simplification car le classement en 6 typologies n'était pas très pertinent. En effet, entre le plot et la tour ainsi qu'entre l'immeuble et la barre, seul le nombre de niveaux diffère. De même, entre le pavillon et la maison en bande, c'est uniquement la **mitoyenneté** qui entre en jeu. Nous nous sommes donc concentrés sur la caractérisation des facteurs morphologiques en traversant les trois typologies déjà mis en avant précédemment dans la recherche : le pavillon, la barre, la tour.

Pour chaque type de gabarit, nous avons cherché à anticiper les facteurs morphologiques qui auraient le plus d'impact sur le bilan énergétique global. À l'issue de cette phase de recherche, nous avons choisi de concentrer notre étude sur quatre facteurs morphologiques : les **masques urbains**, l'**assemblage mitoyen**, la **porosité** (% de vitrage) et la **rugosité** (développé de façade).

Notons plusieurs points importants cadrant notre étude :

- nous avons considéré l'entité bâtie dans son ensemble sans la décomposer par cellule de logement afin de ne pas perturber l'analyse morphologique.

- notre point focal étant l'échelle du bâtiment, nous avons considéré uniquement l'enveloppe et les planchers. Ainsi, la **distribution intérieure** (définition en ANNEXE 1) sort du cadre que l'on s'est fixé.

- de plus, la position du soleil en fonction des heures et des saisons (**orientation**) ne peut être étudiée indépendamment du reste. C'est un facteur environnemental à coupler avec chacun des autres facteurs morphologiques.

Deux types de morphologie

Nous nous sommes aperçus qu'il y avait deux échelles de qualification des facteurs morphologiques : celle de l'environnement et celle du bâtiment.

Morphologie environnementale

L'environnement influe sur les consommations énergétiques du bâtiment. Parmi les facteurs morphologiques traitant de l'échelle de l'environnement, on retrouve : l'orientation, facteur transversal comme je l'ai expliqué ci-dessus, les masques urbains et l'assemblage mitoyen.

Le facteur assemblage s'apparente à l'étude de l'influence des bâtiments proches sur les déperditions et les apports solaires. Cela consiste à répertorier les différentes mitoyennetés.

L'évaluation des masques urbains est l'analyse de l'impact de l'environnement urbain sur les apports solaires au niveau du plan de façade et à l'intérieur des volumes. C'est ce facteur sur lequel je me suis penchée.

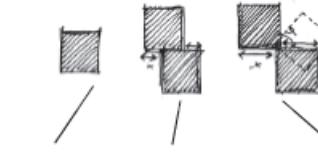
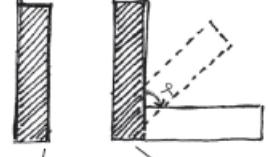
TYPE	TISSU URBAIN	ASSEMBLAGE	MASQUES
		 isolé accolé aggloméré	
		 isolé accolé en angle	
		 isolé en angle	

FIGURE 5 : Illustration des trois facteurs environnementaux pour chaque typologie

Morphologie architecturale : à l'échelle du bâtiment

À cette échelle, la forme et le percement de l'enveloppe agissent directement sur les apports solaires et les déperditions. Les deux facteurs étudiés sont la porosité et la rugosité.

Dans la composition de l'enveloppe, on s'intéresse au pourcentage de surface vitrée (que l'on appelle porosité) en fonction de l'orientation. Ce paramètre joue un grand rôle dans ses échanges avec l'extérieur. En effet, on sait que dans la construction, on aura tendance à privilégier les ouvertures au Sud puisque c'est cette orientation qui reçoit le plus d'apports solaires. Au contraire, des ouvertures au Nord sont bannies. La porosité a ainsi un réel impact sur la qualité de l'éclairage naturel et donc sur le confort visuel ainsi que la consommation d'électricité.

Concernant la rugosité, il s'agit d'étudier l'influence de l'augmentation du développé de façade et sa forme sur les performances énergétiques d'une typologie.

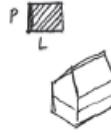
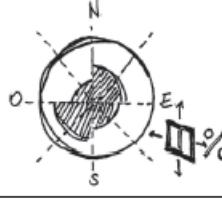
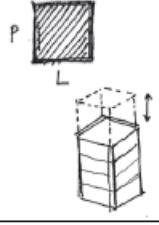
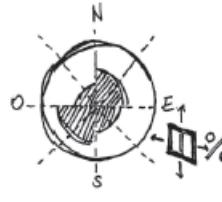
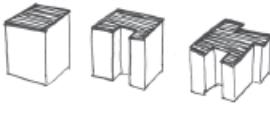
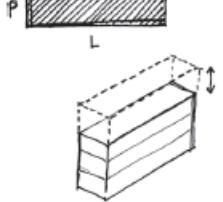
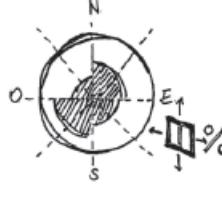
TYPE	GABARIT MOYEN	POROSITÉ PAR ORIENTATION	RUGOSITÉ
	 		
	 		
	 		

FIGURE 6 : Illustration des trois facteurs architecturaux pour chaque typologie

Les FIGURES 7, 8 et 9 schématisent les liens plus ou moins forts (selon l'épaisseur du trait) entre facteurs morphologiques et sous-catégories énergétiques, selon que le bâtiment soit un pavillon ou maison individuelle, une barre, ou une tour.

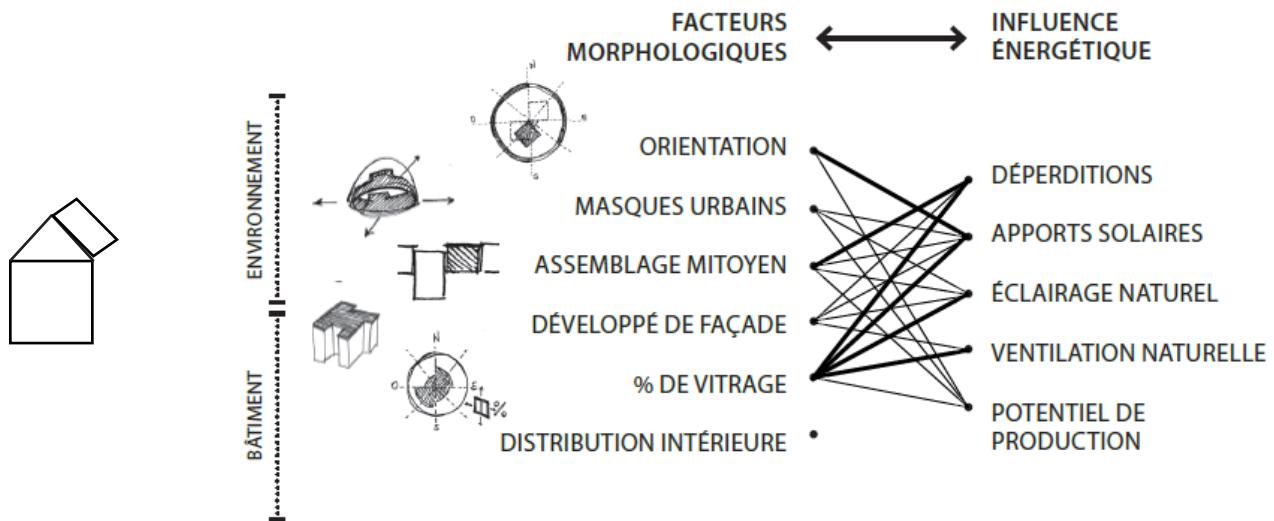


FIGURE 7 : Liens morpho-énergétiques pour le cas du pavillon

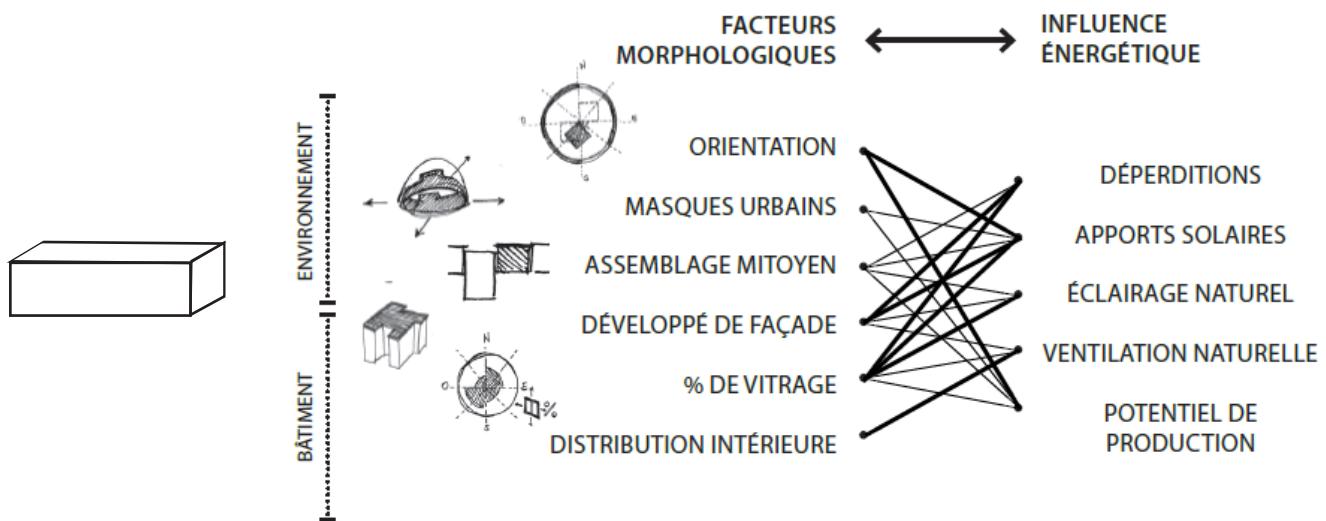


FIGURE 8 : Liens morpho-énergétiques pour le cas de la barre

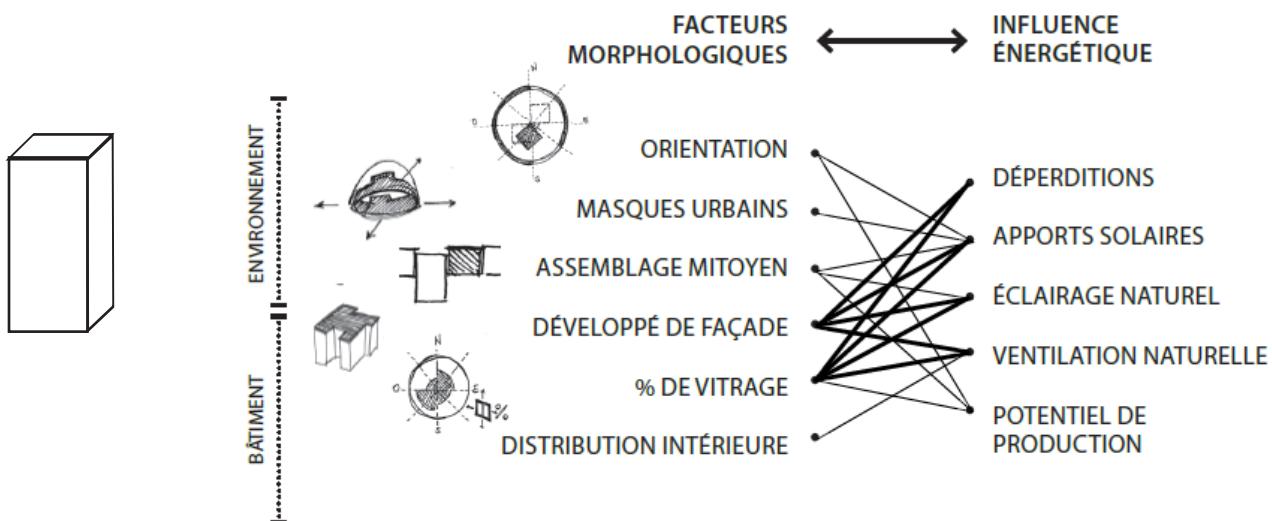


FIGURE 9 : Liens morpho-énergétiques pour le cas de la tour

I.3. Définition des facteurs par un ensemble de paramètres

Ayant identifié les facteurs morphologiques dont nous souhaitions quantifier l'impact, nous les avons défini par un ensemble de paramètres. Le schéma-bilan de ce processus de recherche est représenté sur la FIGURE 10.

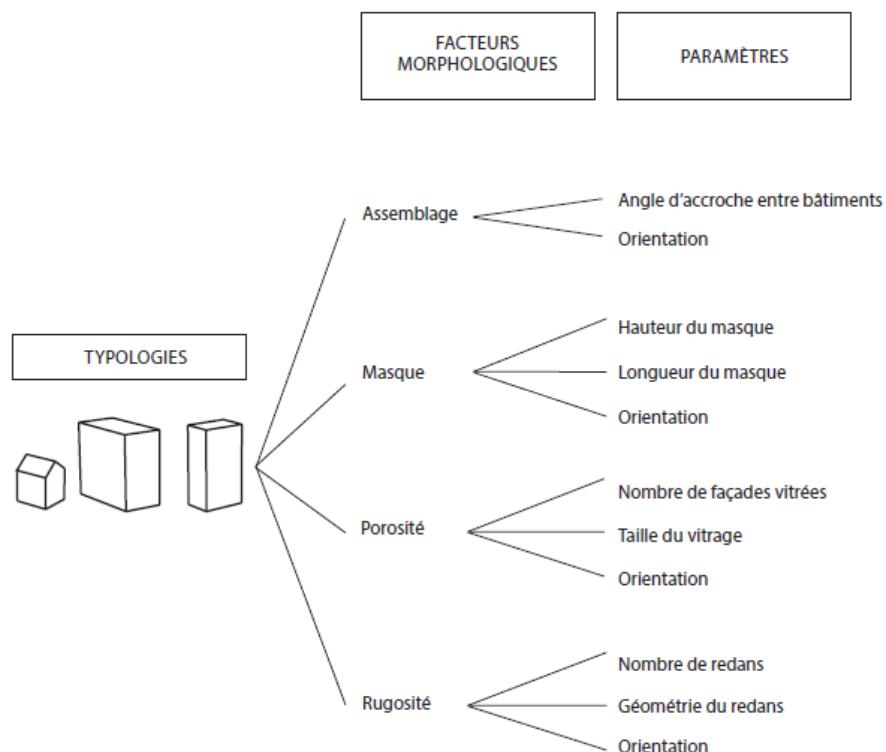


FIGURE 10 : Définition des facteurs par un ensemble de paramètres

Pour étudier l'impact d'un facteur morphologique indépendamment des autres, nous avons construit un cas d'étude relatif à chaque facteur, en faisant varier celui-ci et en gardant les autres fixes. La description des cas d'étude sur l'assemblage, la porosité et la rugosité ne seront pas présentés ici. La description de l'étude sur les masques solaires sera faite en IIe et IIIe partie, puisque c'est sur celle-ci que j'ai orienté la deuxième partie de mon stage de recherche.

II. METHODOLOGIE ET PREMIERE APPROCHE

II.1. Théorie du rayonnement solaire

Masques solaires

Les masques solaires désignent tout ce qui constitue une zone d'ombre pour un bâtiment donné. En bloquant le rayonnement incident sur celui-ci, ils ont des répercussions sur la qualité de l'éclairage naturel à l'intérieur et donc le confort visuel, la quantité d'énergie reçue et donc la consommation d'électricité.

Ils peuvent être répertoriés en deux catégories : masques lointains et masques proches. Les masques lointains bloquent une direction du Soleil, c'est-à-dire que quel que soit le point du bâtiment étudié, l'effet de masque est le même. Pour ce genre de masques, on définit un profil à l'horizon sous forme de hauteur angulaire de soleil masqué pour un **azimut** donné (définition en ANNEXE 1). C'est ce type de masques que constituent les bâtiments voisins d'un bâtiment étudié. Dans cette section, nous nous intéresserons à l'énergie solaire reçue par une surface vitrée, en expliquant de quoi cette énergie est constituée.

Nous allons d'abord introduire quelques notations et définitions à l'aide de la FIGURE 9 et du TABLEAU 1 :

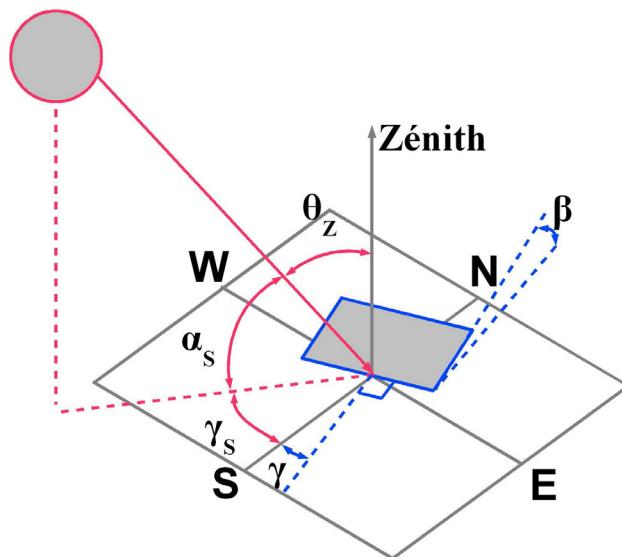


FIGURE 11 : *Apports solaires reçus par une surface : notations et définitions*

La position du Soleil dans le ciel dépend donc de la date et de l'heure dans la journée. La FIGURE 12 montre la course apparente du Soleil dans le ciel pour une latitude de 46°N (ce qui correspond à la France). On observe ainsi qu'entre décembre et juin la course du Soleil est de plus en plus haute puis, entre juin et décembre sa trajectoire se rapproche de l'horizon.

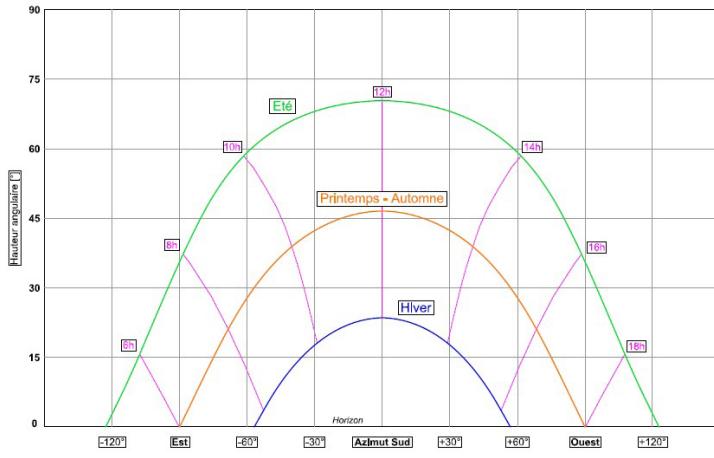


FIGURE 12 : Course du Soleil pour une latitude de 46°N. En abscisse, l'azimuth. En ordonnée la hauteur angulaire.

φ	Latitude ($-90^\circ < \varphi < 90^\circ$), le Nord étant compté positivement
δ	Déclinaison ($-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$) : position angulaire du Soleil lorsque celui-ci est sur le méridien local, par rapport au plan de l'Équateur
β	Inclinaison de la surface étudiée
γ	Azimut de la surface ($-180^\circ < \gamma < 180^\circ$), l'Est étant compté négativement
ω	Angle horaire, déplacement angulaire du Soleil vers l'Est ou l'Ouest à cause de la rotation de la Terre, négatif le matin, positif le soir (à raison de $15^\circ/\text{heure}$)
θ	Angle d'incidence entre le rayon du Soleil et la normale à la surface
θ_z	Angle zénithal, angle entre la verticale du lieu donné et le rayon du Soleil
α_s	Angle d'altitude solaire, complémentaire de l'angle zénithal
γ_s	Azimut solaire indiquant la position à l'Est ou à l'Ouest du Sud de la projection horizontale du rayon (l'Est étant compté négativement)

TABLEAU 1 : Notations et conventions utilisées dans les calculs de rayonnement solaire

Calcul de l'énergie reçue par une surface vitrée

On s'intéresse à une surface vitrée, dont l'orientation et la taille jouent un rôle important dans les apports solaires reçus, et donc dans la consommation d'énergie. En effet, un vitrage possède un fort coefficient de transmission du rayonnement solaire, allant de 50% pour un triple vitrage, 76% pour un double vitrage à 85% pour un simple vitrage. Il est nécessaire de bien le positionner, car en règle générale, une surface vitrée sud fait baisser la consommation, tandis qu'au Nord, elle l'augmente.

L'énergie solaire est disponible sous forme de rayonnement électromagnétique essentiellement composé de lumière visible. N'importe quel corps absorbant constitue un capteur de chaleur : le rayonnement solaire est absorbé par le corps qui s'échauffe et restitue l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge et conduction.

Ainsi lorsque le rayonnement solaire pénètre à l'intérieur de la maison par une fenêtre, il est absorbé par le plancher et les autres corps absorbants. Ceux-ci réemettent l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge, chauffent l'air et les objets en contact par conduction. L'air chauffé circule dans la pièce et transporte la chaleur. Le vitrage permet à la fois de prévenir les échanges convectifs (définition de la **convection** en ANNEXE 1) entre air intérieur et air extérieur, de limiter les échanges par conduction entre ceux-ci et de piéger le rayonnement infrarouge émis par les objets se trouvant dans la pièce. En effet une vitre est quasiment transparente au rayonnement visible (cf les taux de transmission cités plus haut), mais pratiquement opaque aux ondes infrarouges.

Trois types de rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi

L'énergie reçue par une surface vitrée est faite de trois composantes : le direct, le diffus et le réfléchi. Le diffus notamment représente plus de 50% dans les pays tempérés, il n'est donc absolument pas à négliger.

Le **rayonnement direct** correspond aux rayons issus directement du Soleil. Ils sont parallèles et leur direction dépend du moment de l'année (pour la déterminer, il faut ainsi calculer la position du Soleil à un moment donné) et de la position géographique du récepteur.

Le **rayonnement diffus** résulte de la diffusion du rayonnement par l'atmosphère. Ce rayonnement vient donc de toute la voûte céleste. L'intensité du rayonnement, même diffus, n'est jamais uniforme sur tout le ciel. Trois zones peuvent être distinguées suivant les conditions météorologiques :

1. Une part isotrope venant de tout le ciel (par ciel couvert, il n'y a que cette part dans le rayonnement diffus)
2. Une zone circumsolaire qui est une zone plus claire autour du Soleil. Cette partie diffuse se propage dans la même direction que le rayonnement direct. Cette zone est visible par temps dégagé ou voilé.
3. Une bande horizon : un éclaircissement au niveau de la ligne d'horizon, également visible par temps dégagé ou voilé.

Le **rayonnement réfléchi** provient de la réflexion du rayonnement direct et diffus sur les obstacles proches de la vitre étudiée. Suivant la nature des surfaces des obstacles cette réflexion peut être très directionnelle (ex. : miroir) ou diffuse (surface rugueuse). Elle peut également être plus ou moins intense selon le degré d'absorption du rayonnement par la surface de l'obstacle (que l'on appelle albédo, cf. ANNEXE 1). La couleur de celui-ci va notamment jouer un rôle important.

L'expression suivante décrit la décomposition de la densité de flux de rayonnement total en ses diverses composantes (I est en kW/m^2). La densité de flux d'énergie qui arrive sur une surface vitrée inclinée I_T (T : *tilted*) est la somme de trois composantes : le flux d'énergie dû au rayonnement direct $I_{T,b}$ (b : *beam*), celui dû au rayonnement diffus $I_{T,d}$ (d : *diffuse*), et celui dû au rayonnement réfléchi $I_{T,refl}$ ($refl$: *reflected*).

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d} + I_{T,refl}$$

Le flux d'énergie dû au rayonnement diffus peut à son tour être décomposé en trois composantes. La composante isotrope venant de tout le ciel est notée avec un indice *iso*. La composante circumsolaire, notée *cs*, vient d'une zone entourant le Soleil, bien plus lumineuse que les autres zones. Cette composante a une direction privilégiée, celle des rayons solaires directs. La dernière composante vient de la ligne d'horizon, également plus lumineuse que le reste du ciel. Elle est notée *hz*. On peut donc réécrire la formule précédente sous la forme :

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl}$$

En général, on ne connaît pas la densité de flux arrivant sur une surface d'inclinaison arbitraire, mais on dispose d'informations sur les densités de flux d'énergie émises dans la direction de propagation de rayonnement sur un plan horizontal. Il faut donc transposer ces données pour calculer le flux d'énergie arrivant sur une surface inclinée arbitrairement. La quantité d'énergie émise par un émetteur et la quantité d'énergie reçue par un récepteur sont liées par une relation géométrique. On utilise soit des rapports géométriques R pour des rayonnements directionnels, c'est-à-dire se dirigeant suivant la direction des rayons du Soleil (comme le rayonnement direct b et le rayonnement circumsolaire cs), soit des facteurs de forme F pour des rayonnements provenant de plusieurs directions (ce qui est le cas des rayonnements diffus hz , iso et du rayonnement réfléchi $refl$).

Le rapport géométrique R donne le rapport entre la quantité d'énergie émise dans la direction du rayonnement et l'énergie reçue sur une surface d'orientation arbitraire. Il s'agit simplement de faire une projection géométrique des rayons sur la surface réceptrice.

Le facteur de forme $F_{A \rightarrow B}$ donne le rapport entre la quantité d'énergie émise par une surface A (d'une certaine géométrie, pas nécessairement plane) et une surface B qui est celle de la surface vitrée à laquelle on s'intéresse.

Ainsi, en connaissant les densités de flux d'énergie émise et les albédos ρ_i des i surfaces réfléchissantes, on peut exprimer le flux d'énergie reçu par une surface vitrée A_{sv} par :

$$A_V I_T = A_V R_b I_b + I_{d, iso} A_S F_{S \rightarrow V} + I_{d, cs} R_b A_V + I_{d, hz} A_{hz} F_{hz \rightarrow V} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i \rightarrow V}$$

Dans cette expression, plusieurs grandeurs sont mal définies : A_s l'aire du ciel, A_{hz} l'aire de l'horizon, et les A_i surfaces réfléchissantes vues par le vitrage. On peut alors utiliser la relation de réciprocité liant aire de la surface émettrice, aire de la surface réceptrice, et facteurs de forme direct et inverse entre ces deux surfaces :

$A_A F_{A \rightarrow B} = A_B F_{B \rightarrow A}$ qui permet de s'affranchir de ces grandeurs mal définies. On doit alors, en pratique, déterminer $F_{V \rightarrow S}$ et $F_{V \rightarrow hz}$ facteurs de forme entre le capteur et le ciel ou la ligne d'horizon. Ces facteurs de forme sont les rapports entre le rayonnement qui serait émis par le vitrage et celui qui serait reçu par le ciel ou la zone d'horizon. Ce sont des facteurs géométriques qui quantifient la quantité de ciel «vue» par le vitrage. La démarche est identique pour les surfaces réfléchissantes qui renvoient du rayonnement au vitrage : on remplace $\sum_i I_i \rho_i A_i F_{i \rightarrow V}$ par $\sum_i I_i \rho_i A_V F_{V \rightarrow i}$.

Cependant, afin de simplifier davantage les calculs de rayonnement réfléchi, on assimile toutes les surfaces réfléchissantes caractérisées par leur facteur de réflexion ρ_i à une seule surface équivalente composite caractérisée par un facteur de réflexion appelé albédo ρ_T qui serait équivalent au mélange pondéré des facteurs de réflexion de toutes les surfaces. L'approximation suivante consiste à assimiler cette surface à celle du sol, dont l'albédo est noté ρ_G . Ainsi, l'expression précédente se simplifie (on a également simplifié par la surface du vitrage) :

$$I_T = R_b I_b + I_{d, iso} F_{V \rightarrow S} + I_{d, cs} R_b + I_{d, hz} A_{hz} F_{V \rightarrow hz} + I \rho_G F_{C \rightarrow G} \quad (\text{II.1.1})$$

Plusieurs manières de simplifier l'équation (II.1.1) sont possibles. Le modèle que l'on choisit ici consiste à calculer d'une part les apports dûs au direct, et d'autre part les apports dûs au réfléchi et au diffus, en prenant un albédo du sol différent de 1. On pourrait aussi rendre les calculs plus précis en ajoutant la composante circumsolaire, celle due à l'éclaircissement de l'horizon, mais cela ne sera pas fait ici. Ci-dessous sont présentées les bases du calcul de chacune de ces composantes.

Calcul du rayonnement direct

Pour calculer l'énergie reçue par une surface vitrée, nous avons besoin de connaître la direction de propagation des rayons et disposer de données climatiques. Ces données statistiques proviennent de stations météo-

-rologiques. Nous pouvons donc avoir accès pour une journée moyenne de chaque mois à la variation horaire du rayonnement global et diffus reçus sur un plan horizontal. L'énergie reçue sur un plan incliné peut être déduite de ces données et de l'angle d'incidence θ sur le plan incliné en utilisant le rapport géométrique R_b ci-dessous (d'après les notations du TABLEAU 1) :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

et la densité de flux d'énergie directe reçue sur un plan incliné est alors : $I_{T,b} = R_b I_b$ avec I_b l'intensité du rayonnement émis dans la direction de propagation des rayons solaires.

Calcul du rayonnement diffus

Différents modèles de ciel existent, correspondant à différentes manières de traiter les trois composantes du rayonnement diffus : circumsolaire, isotrope et venant de l'horizon. L'approche que nous adopterons ne prend en compte que la part isotrope, ce qui simplifie l'expression (II.1.1) en :

$$I_T = R_b I_b + I_{d,iso} F_{V \rightarrow S} + I_{d,cs} R_b + I_{d,hz} A_{hz} F_{V \rightarrow hz} + I \rho_G F_{C \rightarrow hz} \approx R_b I_b + I_d F_{V \rightarrow S} + I \rho_G F_{C \rightarrow hz} \quad (\text{II.1.2})$$

Calcul du rayonnement réfléchi

Comme mentionné précédemment, il existe plusieurs stratégies pour le calcul du rayonnement réfléchi reçu par un vitrage. Celle que nous utiliserons est simple et peu coûteuse en termes de calculs : elle consiste à prendre le facteur géométrique complémentaire de celui obtenu pour le diffus, $F_{V \rightarrow S}$, d'associer un albédo commun à tous les obstacles et à considérer que l'énergie qu'ils reçoivent est égale au rayonnement diffus reçu sur un plan horizontal. Ainsi on assimile à tous les obstacles un plan horizontal d'albédo «moyenné».

En l'absence d'obstacles proches, l'équation (II.1.2) peut se simplifier en :

$$I_T \approx R_b I_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I \rho_G \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{II.1.3})$$

avec les parts respectives du rayonnement direct, diffus et réfléchi :

$$\bullet \text{ direct : } I_{T,b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} I_b \quad \bullet \text{ diffus : } I_{T,d} = I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad \bullet \text{ réfléchi : } I_{T,refl} = I \rho_G \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

En pratique, ces expressions sont valables dans le cas où il n'y aurait pas d'obstacles proches autour de la surface vitrée. Toutefois, dans l'étude que nous souhaitons faire, les bâtiments voisins agissent comme masques solaires et modifient grandement les expressions établies. Les facteurs de forme et les densités de flux d'énergie notamment, dépendent de trop de variables pour que l'on puisse obtenir un résultat analytiquement. C'est là qu'interviennent les logiciels de simulation thermique tels que GRASSHOPPER (celui que j'ai employé) qui permettent d'obtenir des approximations satisfaisantes de la solution exacte de rayonnement solaire reçu. GRASSHOPPER est une plate-forme permettant de lancer le moteur de calcul RADIANCE, utilisant une méthode numérique de résolution d'équations aux dérivées partielles appelée «hybride stochastique-déterministe». La manière dont j'ai programmé mes simulations et l'analyse des résultats obtenus sont présentés en II.2 et II.3 et III^e partie.

II.2. Présentation des outils informatiques

II.2.1. Rhinocéros, Grasshopper et DIVA

- **RHINOCEROS**

Le logiciel Rhinoceros est un modeleur 3D permettant de concevoir des formes complexes. C'est un outil informatique plébiscité aussi bien par les architectes, les ingénieurs, que les joailliers. C'est une plate-forme pour Grasshopper.

- **GRASSHOPPER**

Plug-in de Rhinoceros, Grasshopper est un outil de programmation algorithmique très visuel et ne requiert pas de compétences en programmation «traditionnelle». Il donne la possibilité de modéliser en 3D de manière paramétrique, ce qui permet de contenir une multitude de cas en un seul fichier. Enfin, on peut y greffer de nombreux plugs-in pour réaliser des calculs de thermique, rayonnement solaire, et les visualiser.

L'avantage de Grasshopper est qu'il offre des possibilités de calcul infinies, mais il faut se méfier de la paramétrisation à outrance : plus il y a de paramètres, plus on risque de s'y perdre et de s'éloigner de la problématique de départ. C'est pourquoi dans les simulations que j'ai effectuées, j'ai au préalable défini un bestiaire des cas d'étude.

- **DIVA**

Diva est un plug-in de Grasshopper spécialisé dans l'analyse de la thermique des bâtiments et de l'éclairement. Pilotant les moteurs de calcul RADIANCE et ENERGYPLUS, il comprend des fonctionnalités telles que la réalisation de cartes d'éclairement comme l'illustre la FIGURE 13 le calcul de lumière du jour ou d'énergie solaire reçue par un bâtiment, cette dernière étant celle qui m'a servi. Pour plus de précisions concernant les réglages de ces logiciels, consulter l'ANNEXE 2.

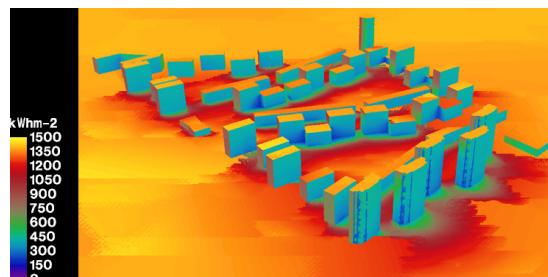


FIGURE 13 : Exemple de carte d'éclairement réalisée sous Diva

SIMULATION EN BOUCLE (BATCH SIMULATION)

J'ai pu lancer mes simulations en boucle en utilisant un «template» existant : un petit programme réalisé sur Grasshopper qui fait varier les paramètres de manière automatique, et qui, une fois la simulation finie, exporte les résultats dans un tableau Excel. La FIGURE 14 est un extrait du «code» de ce programme. Il suffit de définir les trois paramètres à faire varier, leur valeurs initiale et finale ainsi que le pas de variation.

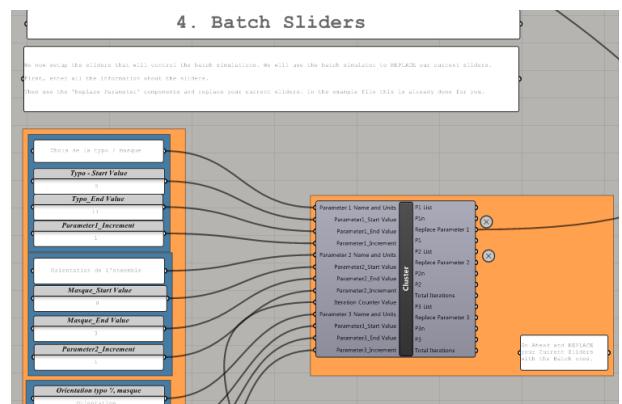
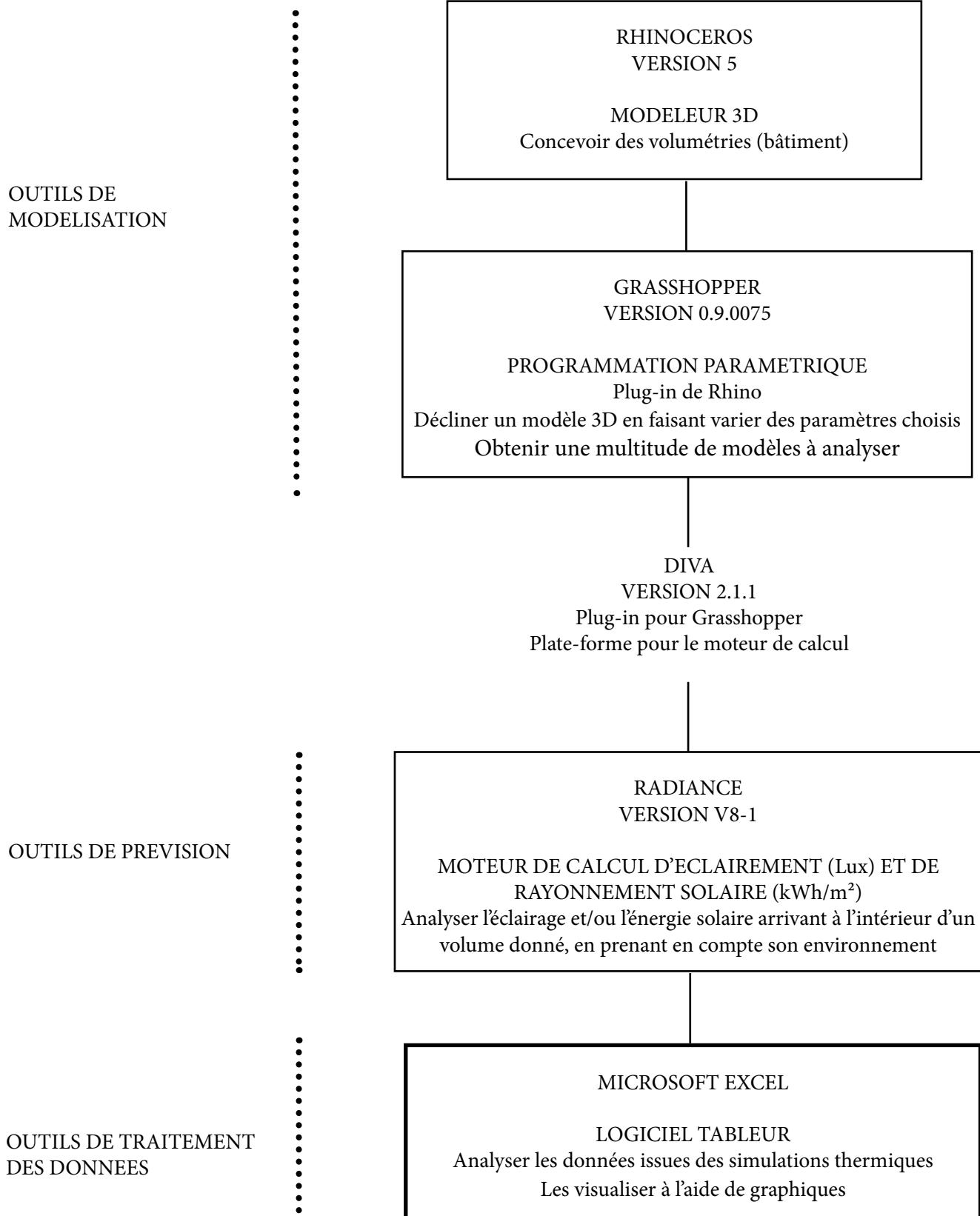


FIGURE 14: Définition des paramètres de la simulation

II.2.2. Chaînage des logiciels



II.3. Première approche pour étudier l'influence d'un masque solaire

Première étude intuitive : morphologie

OBJECTIF :

- **QUANTIFIER** l'effet d'un masque sur un bâtiment aux dimensions fixes selon son orientation et selon ses paramètres morphologiques, par calcul de **RAYONNEMENT SOLAIRE**. (volonté de s'abstraire de la typologie)
- **NUANCER** l'influence de ce masque selon la période de l'année
- Proposer un catalogue de solutions pour **MINIMISER L'INFLUENCE** d'un tel masque

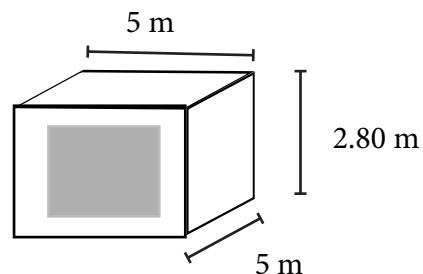
L'idée était de s'abstraire du classement par typologies et de tirer des conclusions des résultats des simulations en fonction de la taille du masque *proportionnellement* à celle de la typologie. C'est pourquoi dans cette étude, on a modélisé typologie étudiée et masque par des formes primitives ; et c'est aussi pourquoi dans les graphes illustrant les résultats, les dimensions de masque sont présentées sous la forme d'un pourcentage de celles de la typologie.

II.3.1. Bestiaire : choix des modèles à calculer

TYPOLOGIE URBAINE

modélisée par un cube percé d'un vitrage, qui couvre 50% de la surface d'une face.

DIMENSIONS : côté 5 m, hauteur 2.80 m



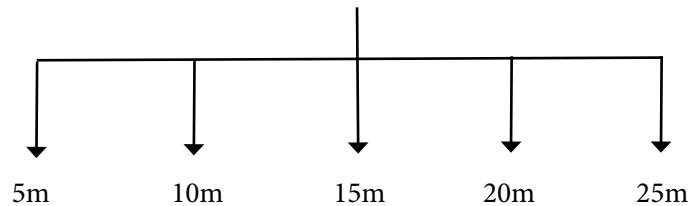
MASQUE ENVIRONNANT

modélisé par une surface rectangulaire, à la hauteur et largeur variable.



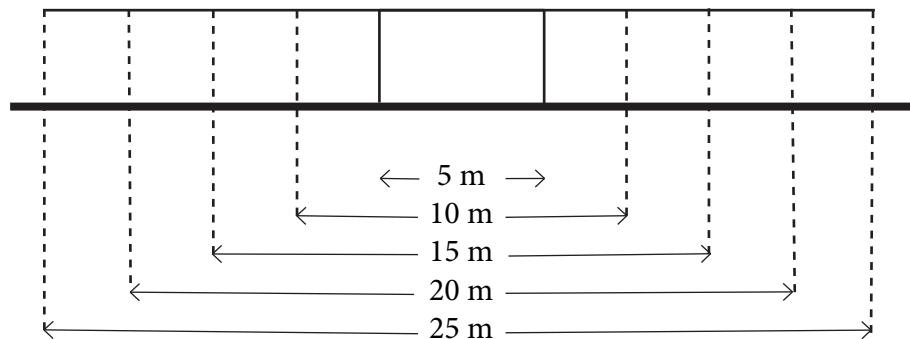
PARAMETRISATION DU MASQUE

MASQUE MODÉLISÉ PAR
UN PARALLÉLÉPIPÈDE
RECTANGLE



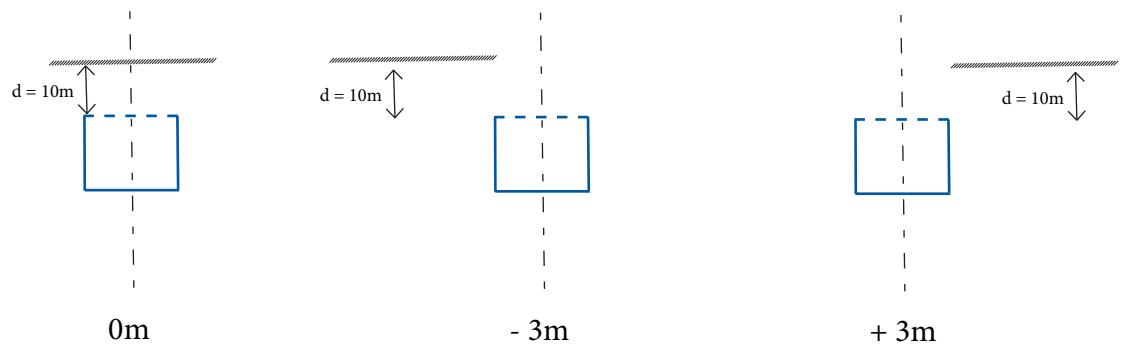
5 LONGUEURS DE MASQUE

X 5 CAS

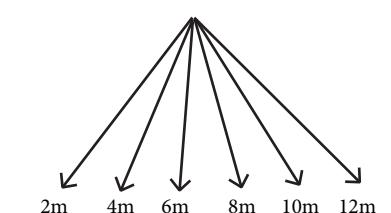
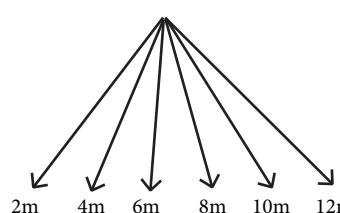
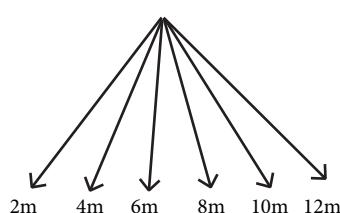


DECENTRAGE
MASQUE / TYPO

X 3 CAS

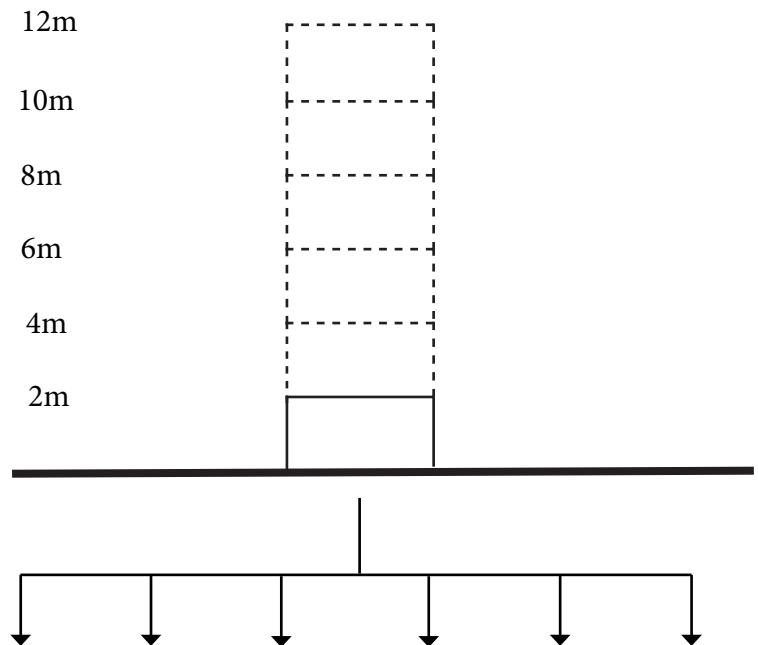


+ X



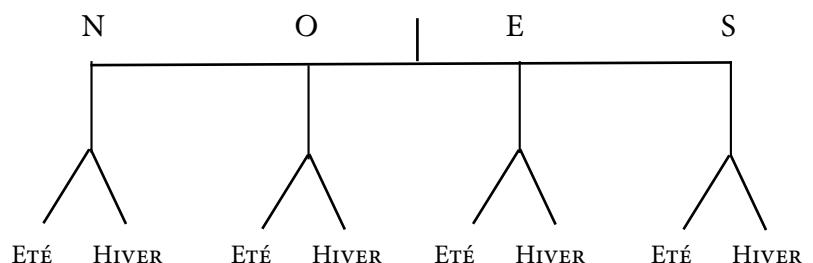
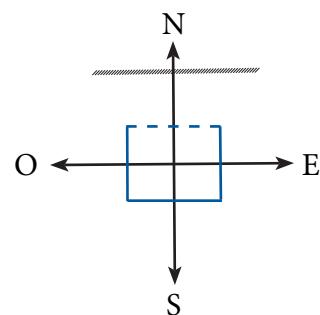
6 HAUTEURS DE
MASQUE

X 6 CAS



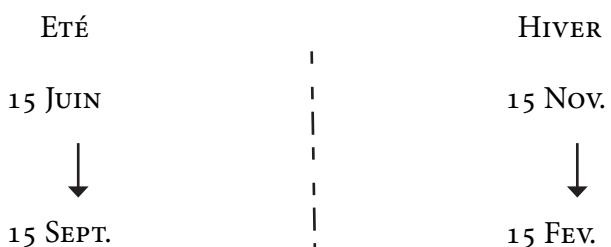
4 ORIENTATIONS
POUR L'ENSEMBLE
MASQUE/TYPO

X 4 CAS



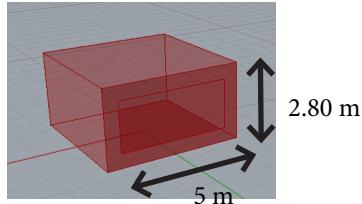
CALCUL SAISONNIER

X 2 CAS



II.3.2. Paramétrisation sous Rhinocéros+Grasshopper

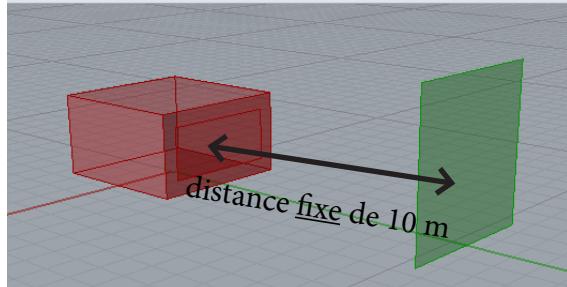
Dans cette partie est détaillée la manière dont j'ai programmé le script sous Rhinocéros et Grasshopper.



Typologie urbaine modélisée par un cube percé d'un vitrage, qui couvre 50% de la surface d'une face.

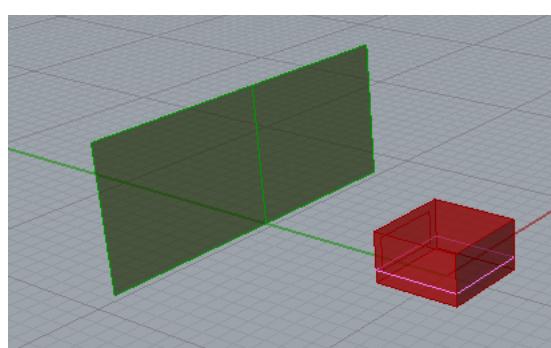
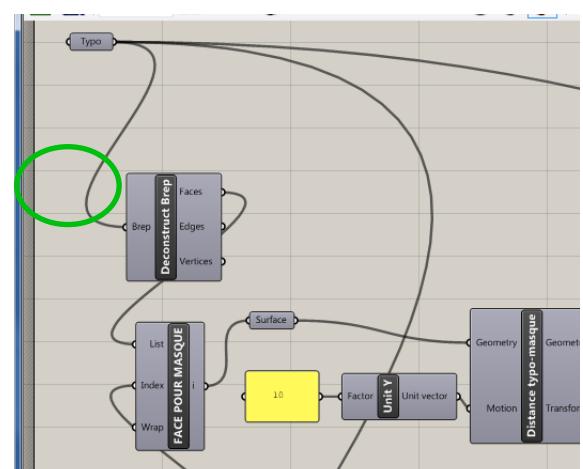
DIMENSIONS : côté 5 m, hauteur 2.80 m

RHINO



DISTANCE MASQUE '/', TYPO : Partant du cube, on applique une translation de 10 m à une face, qui sera le masque. Le redimensionnement se fait par une mise à l'échelle non uniforme selon les axes X, Y, et Z.

GRASSHOPPER

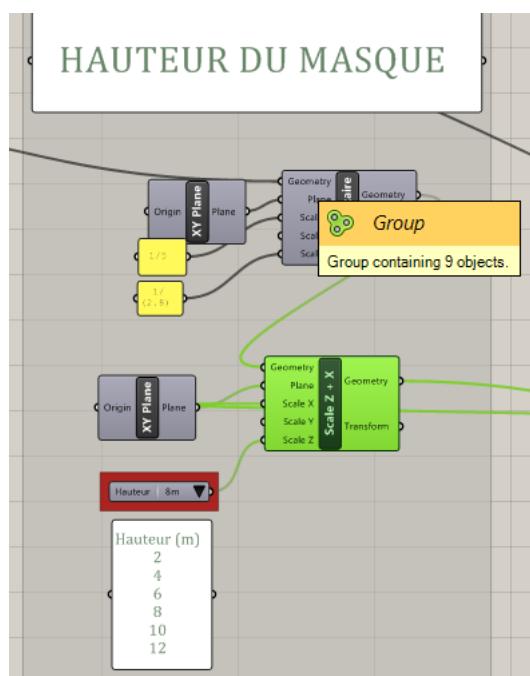


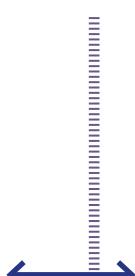
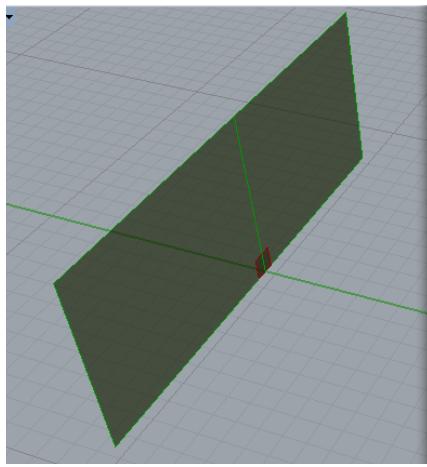
PARAMÉTRISATION DE LA HAUTEUR :

On part d'une surface carrée unitaire que l'on redimensionne. On accède au bloc «Hauteur du masque» d'où l'on peut donner autant de valeurs que souhaitées à la hauteur. J'ai défini 6 valeurs :

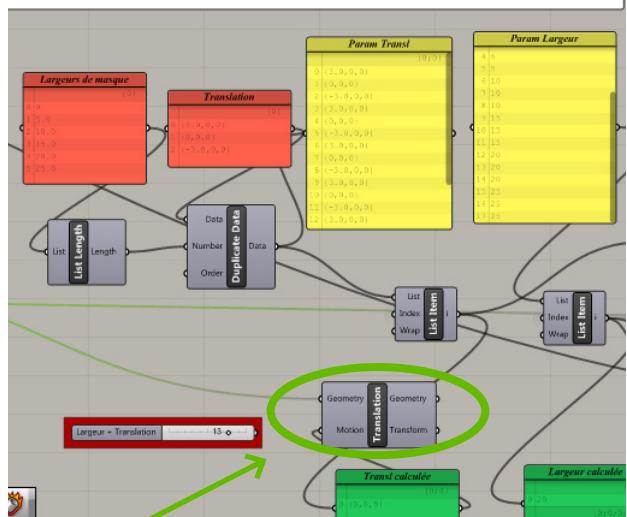
2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12 m

HAUTEUR DU MASQUE



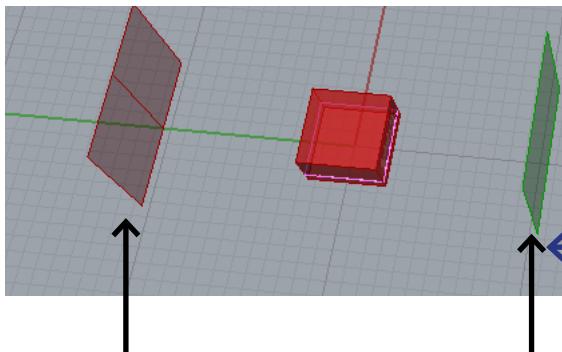
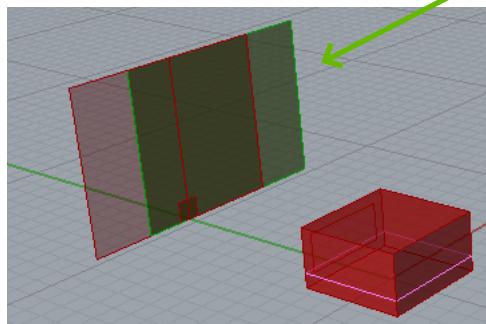


LARGEUR ET TRANSLATION DU MASQUE



PARAMÉTRISATION DE LA LARGEUR :

De la même manière que pour la hauteur de masque, on peut affecter autant de valeurs que souhaitées pour la largeur. J'ai donc défini 5 valeurs : 5 - 10 - 15 - 20 - 25 m, sans oublier le cas 'pas de masque' pour une largeur nulle.

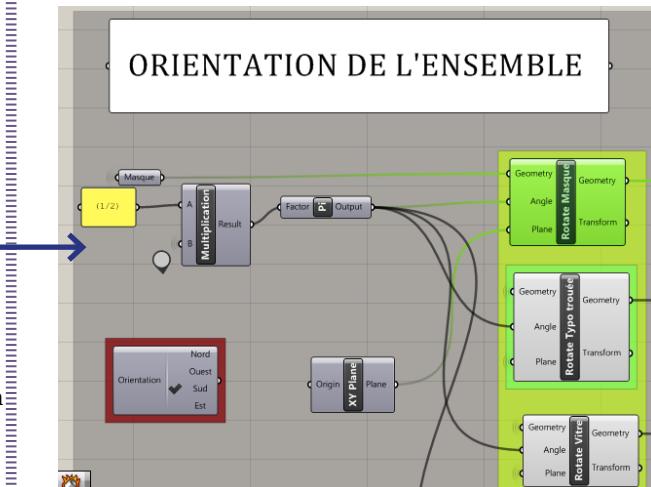


Masque orientation initiale
(par défaut, Nord)

Masque orientation
Sud

PARAMÉTRISATION DE LA TRANSLATION :

Dans le cadre de l'étude de l'existant, il m'a paru intéressant et indispensable d'étudier des cas de figure où le masque solaire est excentré par rapport à la typologie en comparaison au cas de figure «face-à-face». Cela permettra de mesurer l'inégale composition du rayonnement solaire reçu (plus de direct dans le cas de l'excentration).



PARAMÉTRISATION DE L'ORIENTATION :

On applique une rotation de $i \pi/2$, i allant de 0 à 3, ce qui correspond à 4 orientations : Nord, Ouest, Est, Sud.

II.3.3. Résultats de la simulation et analyse

Les premiers résultats que je présente dans cette partie ne représentent pas une avancée majeure, mais ils confirment une évolution des apports solaires reçus en fonction de l'orientation, des dimensions de masque, ou de l'excentration que l'on pouvait intuiter. Ces résultats m'ont permis de confirmer les hypothèses que j'avais émises, mais également de vérifier la fiabilité de DIVA. Toutefois, j'ai choisi la résolution la plus faible pour privilégier la rapidité des résultats, ce qui donne lieu à une imprécision de 2 à 3% pour chaque calcul. Cette résolution correspond aux réglages suivants de DIVA : (Se reporter à l'annexe 1 pour l'explication des réglages de DIVA) -ab 1 -ad 256 -as 256 -ar 128 -aa 0.15.

Par la suite, j'ai opté pour une résolution plus élevée (cf 3e partie de mon rapport).

Pour chacun des trois critères que j'ai voulu étudier - orientation, dimensions de masque, excentration du masque-, j'ai comparé le graphe des apports solaires reçus en été, à celui des apports reçus en hiver. En effet, une étude temporelle est indispensable, car les besoins ne sont pas les mêmes en été et en hiver. Ainsi, on voudra minimiser l'énergie reçue en été, quand en hiver on voudra la maximiser. Il s'agit de trouver un optimum entre les deux.

J'ai défini l'hiver et l'été selon les plages de températures maximales et minimales pour Paris-Orly, ce lieu étant celui qui correspond à la Dorsale Est. Ce sont donc un été et un hiver «météorologiques», et non pas conventionnels.

II.3.3.1. Influence de l'orientation

Ayant fixé une largeur moyenne au masque (15 m), j'ai tracé deux graphes, l'un en été, l'autre en hiver, pour chacune des 5 hauteurs de masque, ainsi que le cas nul, afin d'étudier l'impact de l'orientation de l'ensemble typologie/masque sur l'énergie solaire reçue.

La FIGURE 15 est le graphe sur la période d'été, et la FIGURE 16 est le graphe sur la période d'hiver.

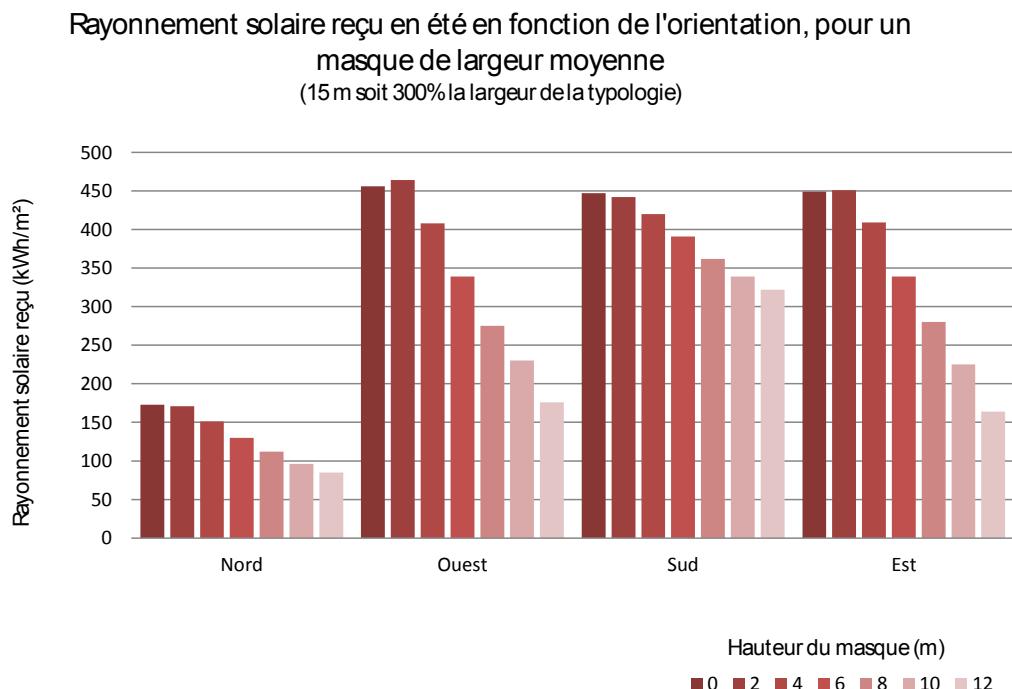


FIGURE 15

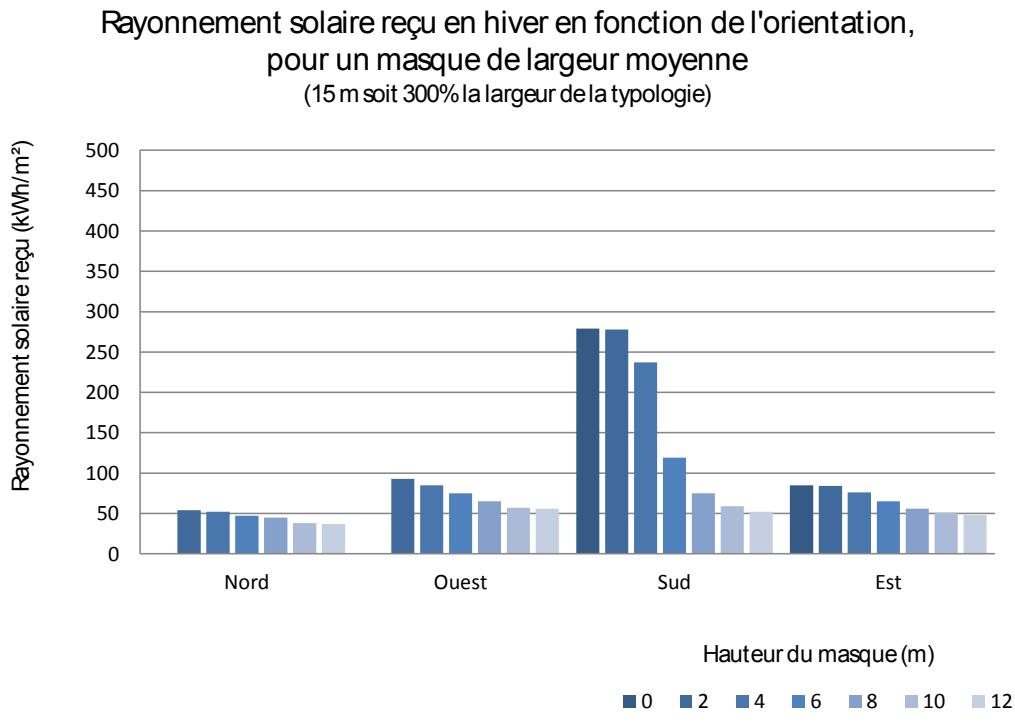


FIGURE 16

De la comparaison de ce deux graphes, on peut noter plusieurs choses remarquables, que l'on peut plus ou moins intuiter :

- L'influence de l'orientation est plus importante en hiver qu'en été : en effet, une façade Sud en hiver reçoit presque trois fois plus de rayonnement solaire que toutes les autres orientations, dont les apports sont du même ordre de grandeur, -faible-, tandis qu'en été, les disparités sont moins criantes : une façade Ouest reçoit quasi-mérit autant qu'une façade Sud ou Est.
- On peut également formuler une remarque concernant la hauteur du masque : son impact est beaucoup plus fort en été qu'en hiver (la variation entre les groupes de bâtons est plus grande), pour laquelle la hauteur du masque influe seulement pour une orientation Sud.
- Enfin, il faut rester très critique sur la précision de ces résultats, puisqu'on peut dénoter une incohérence dans le graphe de l'été, pour l'orientation Ouest : les apports reçus seraient plus forts avec un masque de hauteur 2m et de largeur 15m, que sans masque... Ceci est dû au choix de la résolution des calculs qui, comme je l'ai précisée

Dans un second temps, il faudrait déterminer des tranches de confort vis-à-vis des apports solaires : par exemple, une valeur maximale en été au-delà de laquelle il y a surchauffe, et une valeur minimale en hiver. Puis, en entrecroisant les graphiques, on pourrait établir un classement des situations, de la plus à la moins défavorable.

II.3.3.2. Influence des dimensions de masque

L'étude des deux graphes précédents (FIGURES 15 ET 16) m'a permis de dégager une orientation favorable, le Sud, pour laquelle les apports solaires sont suffisamment importants pour pouvoir étudier l'influence conjointe des dimensions du masque sur la quantité d'énergie reçue, toujours en comparant été (représenté sur la FIGURE 17) et hiver (sur la FIGURE 18).

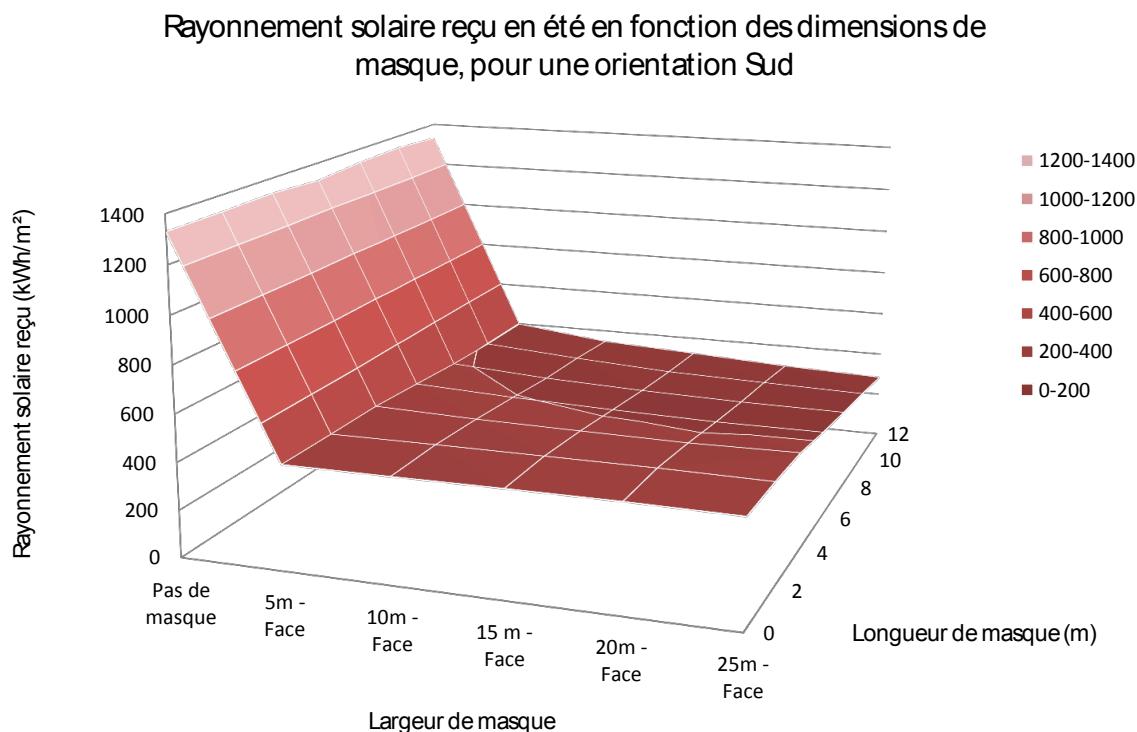


FIGURE 17

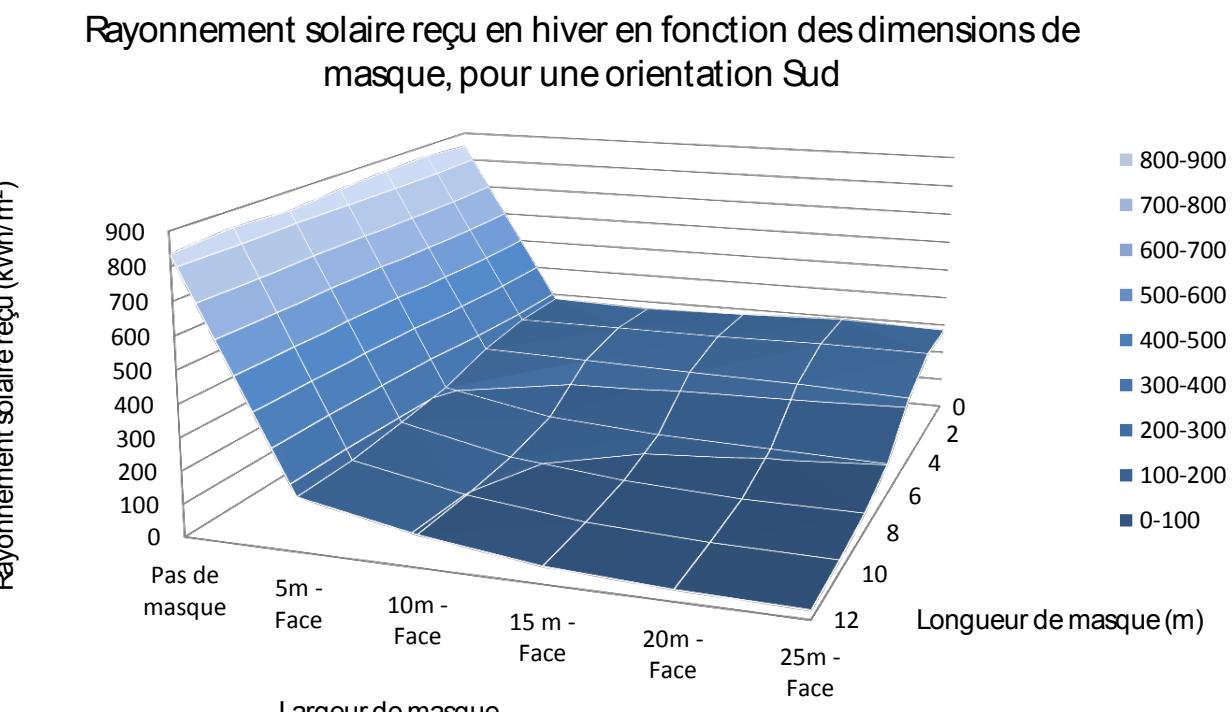


FIGURE 18

Ici, la représentation 3D est très utile pour comparer l'influence conjointe de la largeur et de la hauteur de masque, on peut ainsi noter que :

- l'influence de la largeur est prépondérante sur celle de la hauteur : à largeur fixée, on voit bien que la hauteur varie très peu, d'où une surface constituée quasiment de deux plans
- Toutefois, la hauteur joue un rôle plus important en hiver qu'en été sur le rayonnement solaire reçu; en effet, le quadrillage plus courbe de la surface obtenue pour l'hiver dénote une variation plus importante des apports reçus en fonction de la hauteur
- La forme de la surface obtenue est frappante : deux (quasi-)plans bien distincts, qui soulignent qu'il existe un seuil, autour de 5m de largeur de masque, avant lequel les apports solaires diminuent linéairement et au-delà duquel, quelle que soit la longueur de masque, ils restent constants fixés à une faible valeur.

Par la suite, il faudrait se focaliser sur un intervalle [0, 10 m] de largeur de masque, avec un pas plus fin et une résolution meilleure, afin d'analyser plus précisément une telle variation d'énergie solaire reçue.

II.3.3.2. Influence de l'excentration (biais gauche, face et biais droite)

Ici, j'ai voulu étudier comment un masque de dimensions données, selon qu'il soit placé face à la typologie étudiée ou en décalage, pouvait altérer de manière plus ou moins forte les apports solaires reçus. Pour ce point, il m'a paru important de nuancer cet impact selon l'orientation, c'est pourquoi j'ai tracé 4 courbes pour chacune de ces orientations. En revanche, les dimensions importaient peu, c'est pourquoi je leur ai attribué une valeur fixe. Encore une fois, j'ai comparé les graphes été (FIGURE 19) et hiver (FIGURE 20).

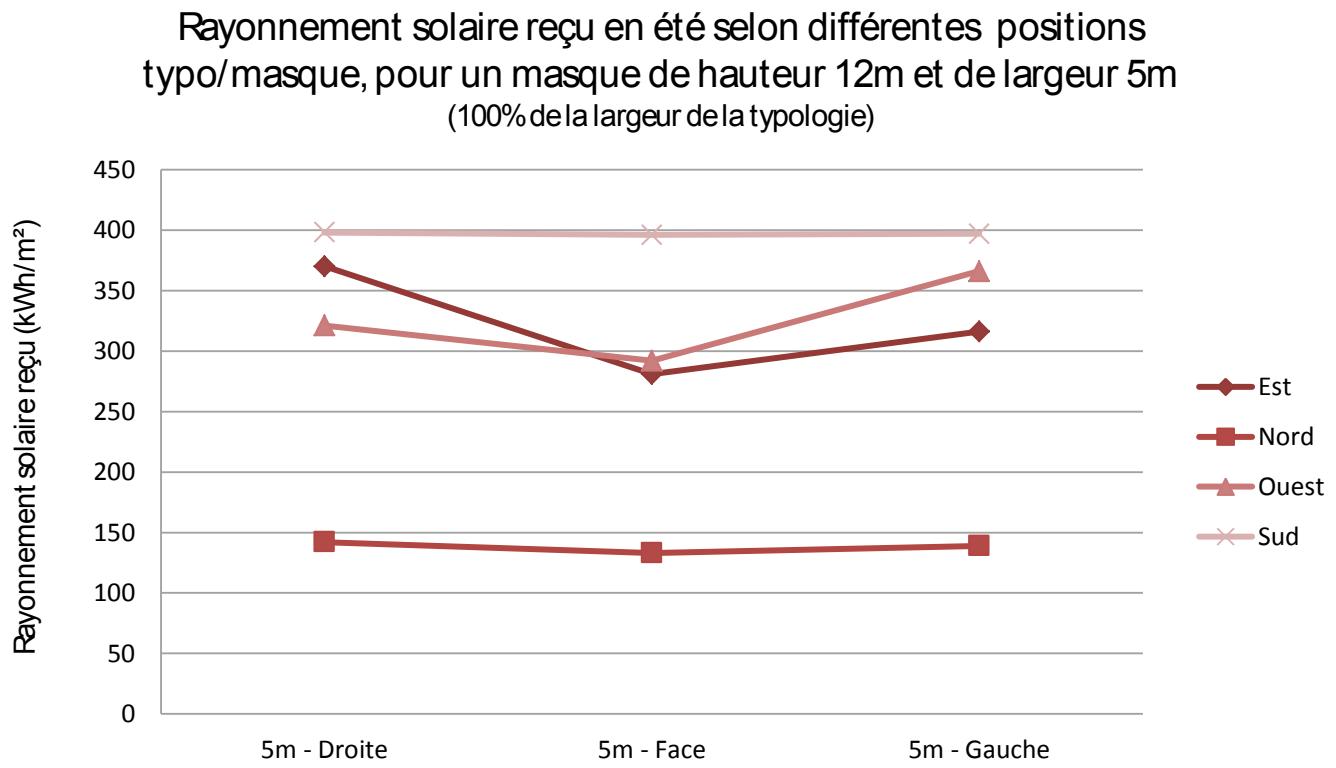


FIGURE 19

Rayonnement solaire reçu en hiver selon différentes positions typologique/masque, pour un masque de hauteur 12m et de largeur 5m
(100% de la largeur de la typologie)

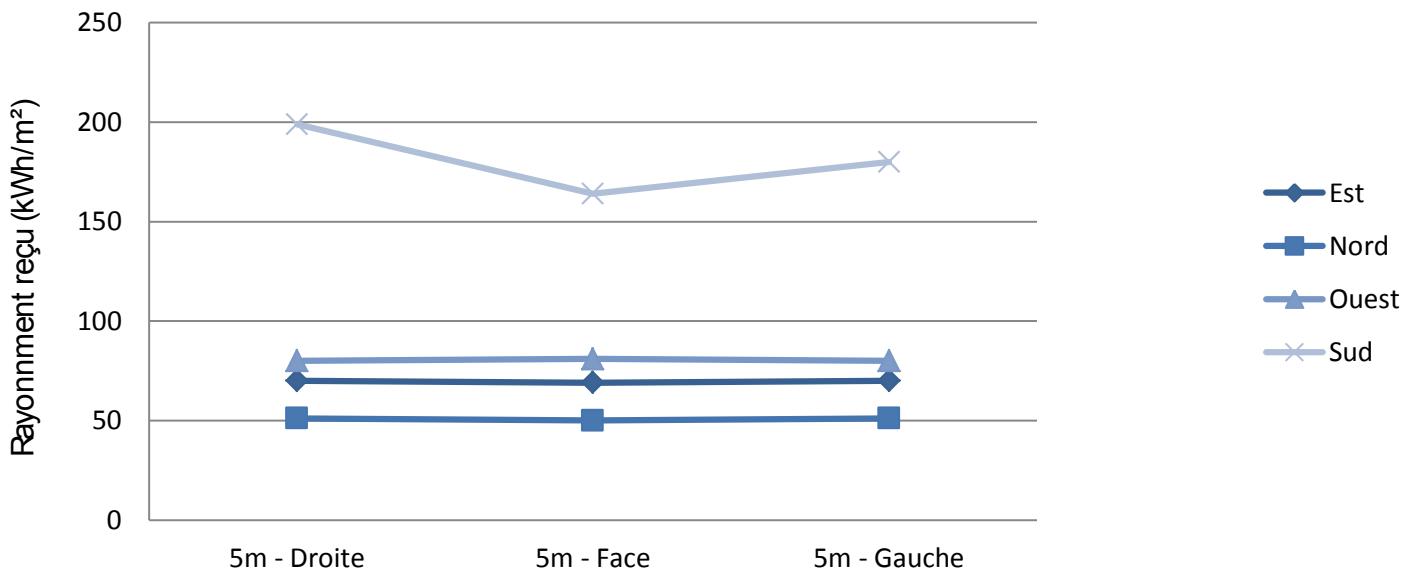


FIGURE 20

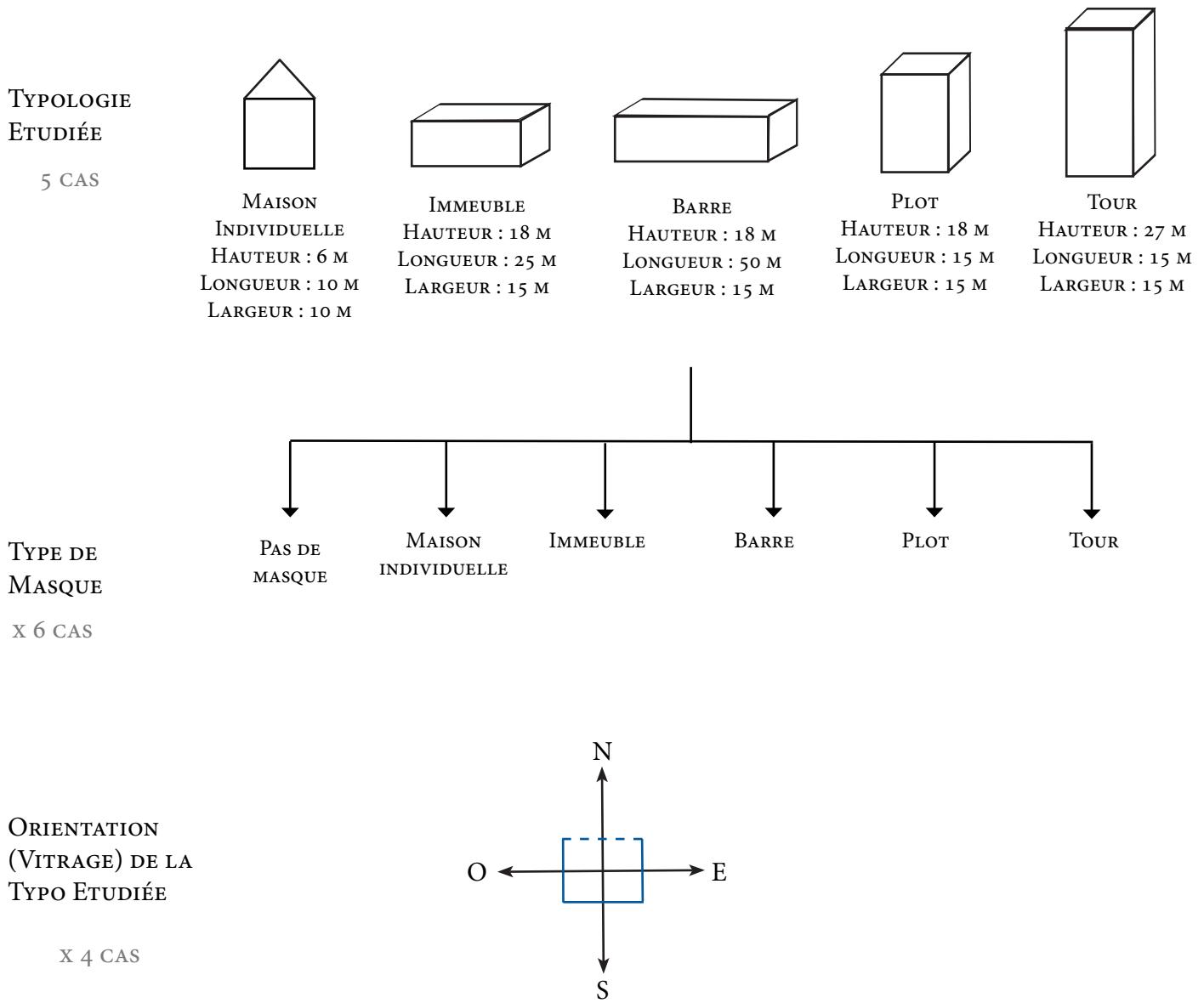
Tout d'abord, on peut noter qu'un masque placé en face de la typologie a une influence plus néfaste qu'un masque placé en biais vis-à-vis de la typologie. Ceci s'explique par le fait qu'un masque en face bloque plus de rayons arrivant perpendiculairement sur la façade de la typologie, qui sont plus énergétiques. Ainsi cette première analyse confirme que l'on pouvait présupposer.

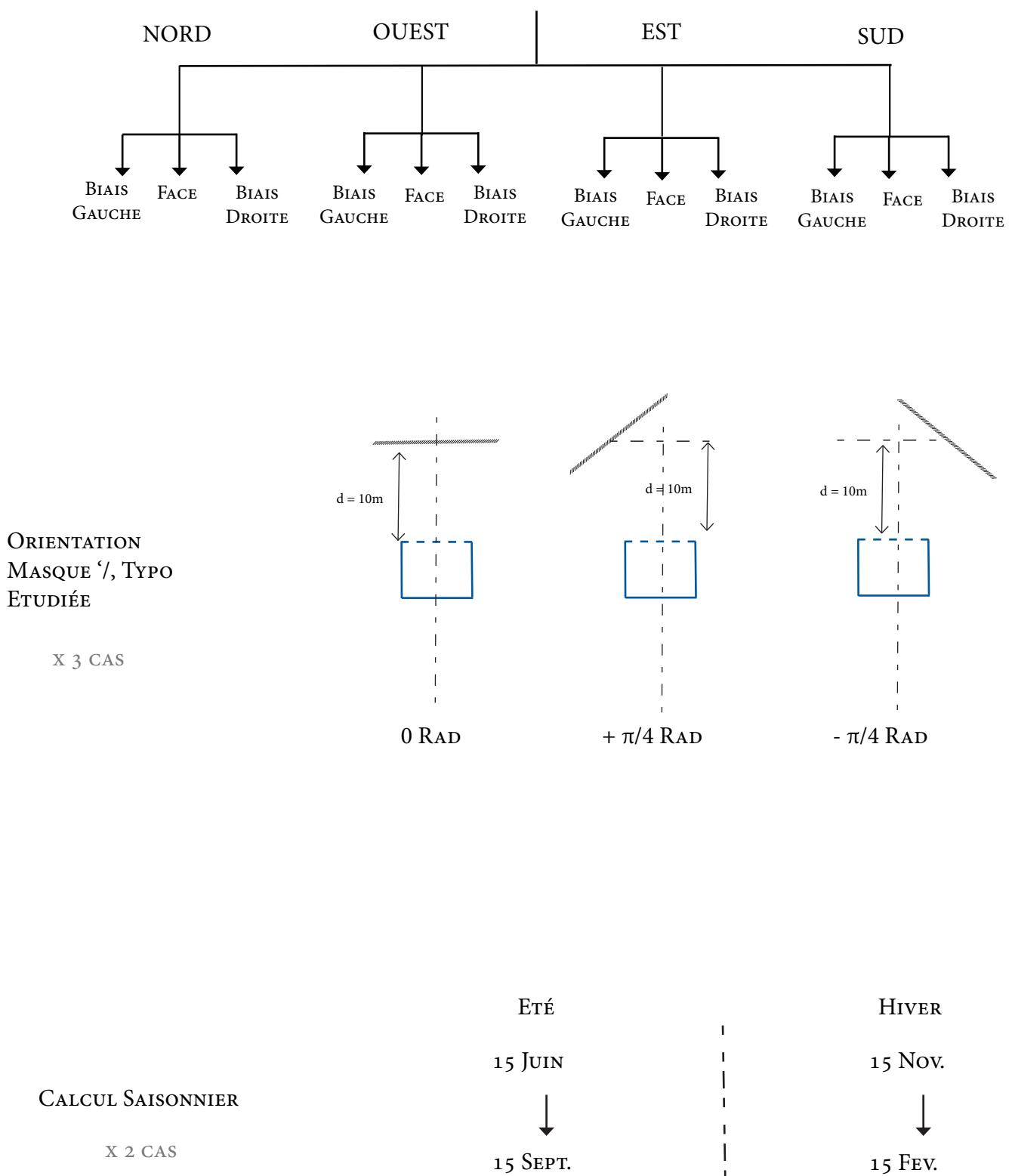
Par ailleurs, l'étude comparée entre été et hiver montre que les orientations affectées par l'excentration ne sont pas les mêmes : Ouest et Est pour l'été, Sud pour l'hiver. On peut supposer que les apports solaires en été sont suffisamment élevés au Sud pour ne pas subir une variation trop importante. A l'inverse, ils seraient suffisamment bas en hiver à l'Est et à l'Ouest pour ne pas varier de manière trop significante. Ces différences peuvent d'autre part être expliquées par l'**azimut solaire**. Ce terme désigne la position à l'est ou à l'ouest du sud de la projection horizontale des rayons solaires. En hiver, l'azimut est compris dans un intervalle bien plus petit qu'en été, comme le montre la FIGURE 10. Les rayons sont donc bien plus concentrés au Sud, ce qui explique pourquoi le Sud est la seule orientation affectée de manière notable par un décalage de masque en hiver, tandis qu'en été ce sont l'Est et l'Ouest.

III. DEUXIEME ETUDE PARAMETRIQUE : METHODE, RESULTATS ET ANALYSE

En se plaçant dans l'optique d'une étude de l'existant, j'ai réalisé un deuxième programme sur Rhino/Grasshopper en me basant cette fois sur le découpage en typologies de la Dorsale Est, que j'ai présenté en première partie. Le but est ainsi de se demander, pour tel type de bâtiment avec tel environnement donné, quelle est la forme de l'énergie solaire reçue, temporellement parlant (c'est-à-dire en faisant la distinction été et hiver). En pratique, ce programme pourrait ainsi servir à déterminer des profils énergétiques pour en déduire des comportements à adopter : l'implantation de panneaux photovoltaïques par exemple. Ou, ce programme permettrait de connaître les pertes induites par une nouvelle construction devant un bâtiment existant.

III.1. Bestiaire : choix des modèles à calculer



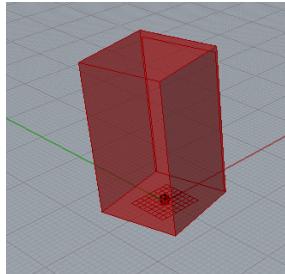


III.2. Paramétrisation sous Rhinocéros+Grasshopper

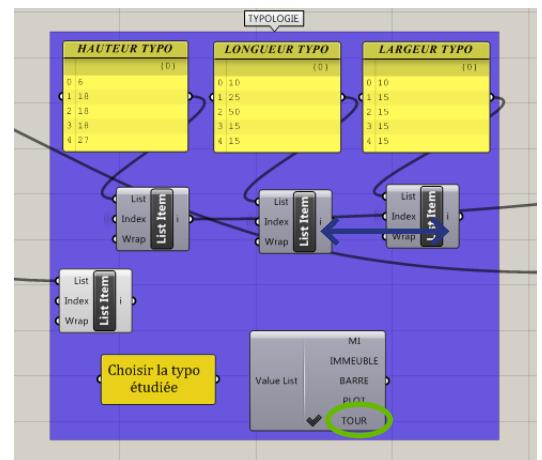
Ci-après, je détaille la manière dont j'ai réalisé le script sous Rhinocéros+ Grasshopper et comment on peut le modifier pour le réutiliser.

N.B : Pour analyser les résultats, j'ai automatisé la simulation, comme je l'ai expliqué à la partie II.2.1. On peut toutefois réaliser les calculs manuellement pour uniquement les cas de figure qui nous intéresseraient, c'est cette démarche que j'explique ci-après.

RHINO

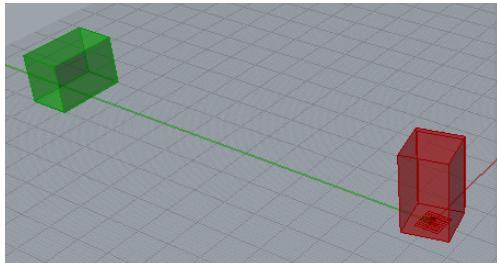


GRASSHOPPER



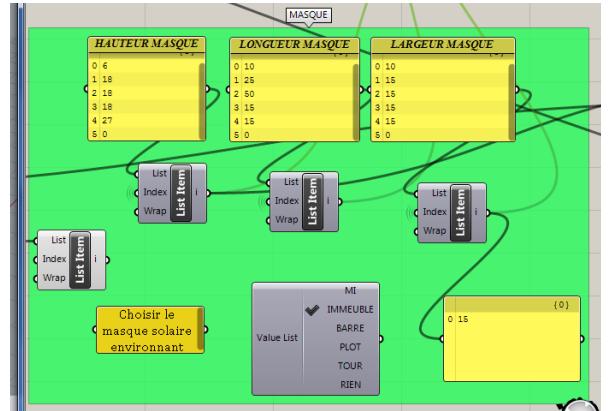
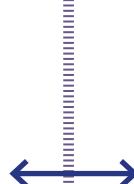
CHOIX DE LA TYPOLOGIE ETUDIÉE

On peut choisir le bâtiment à étudier parmi les cinq typologies définies en partie I. Je leur ai affecté les dimensions moyennes que nous avons relevé; celles-ci sont modifiables directement dans les trois listes en jaune.



CHOIX DU MASQUE ENVIRONNANT

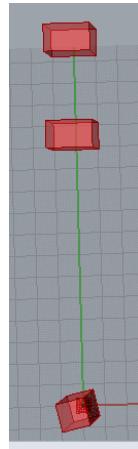
On peut choisir le masque parmi les cinq typologies définies en partie I, et l'option 'sans masque'. Comme pour le bâtiment étudié, les dimensions sont modifiables parmi les trois listes.



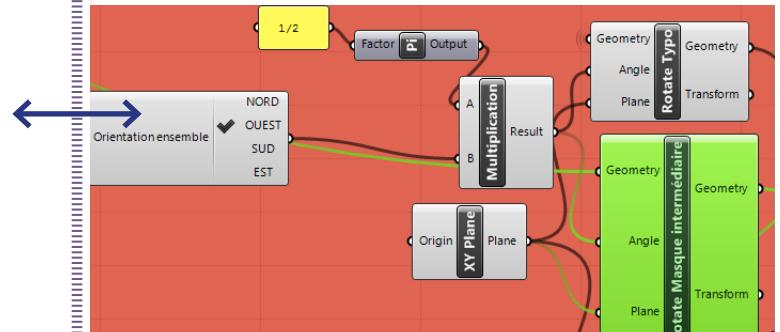
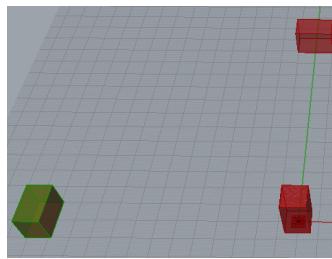
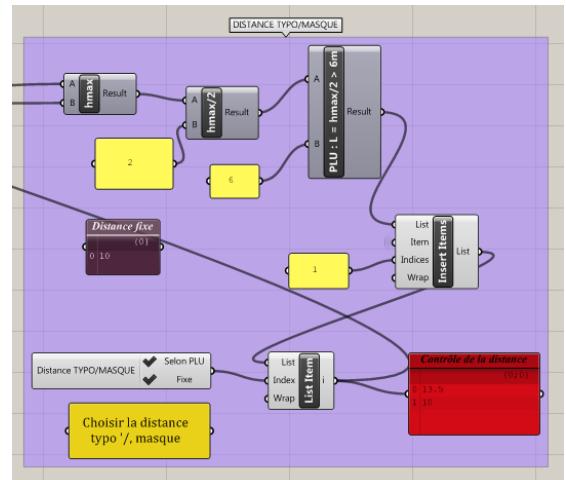
RHINO

CHOIX DE LA DISTANCE TYPO/MASQUE

On peut choisir une distance fixe de 10m, ou choisir d'appliquer la règle du Plan Local d'Urbanisme (P.L.U) (définition en ANNEXE 1). Toutefois cette dernière option n'était pas pertinente dans mon étude puisqu'avec une distance proportionnelle à la hauteur du bâtiment, les masques auraient tous été vus sous le même angle et auraient par conséquent eu des effets très similaires, alors que le but était justement de discerner des différences.

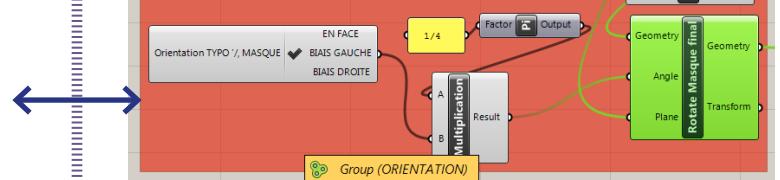
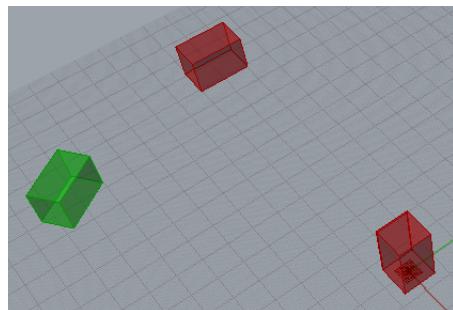


GRASSHOPPER



CHOIX DE L'ORIENTATION DE L'ENSEMBLE

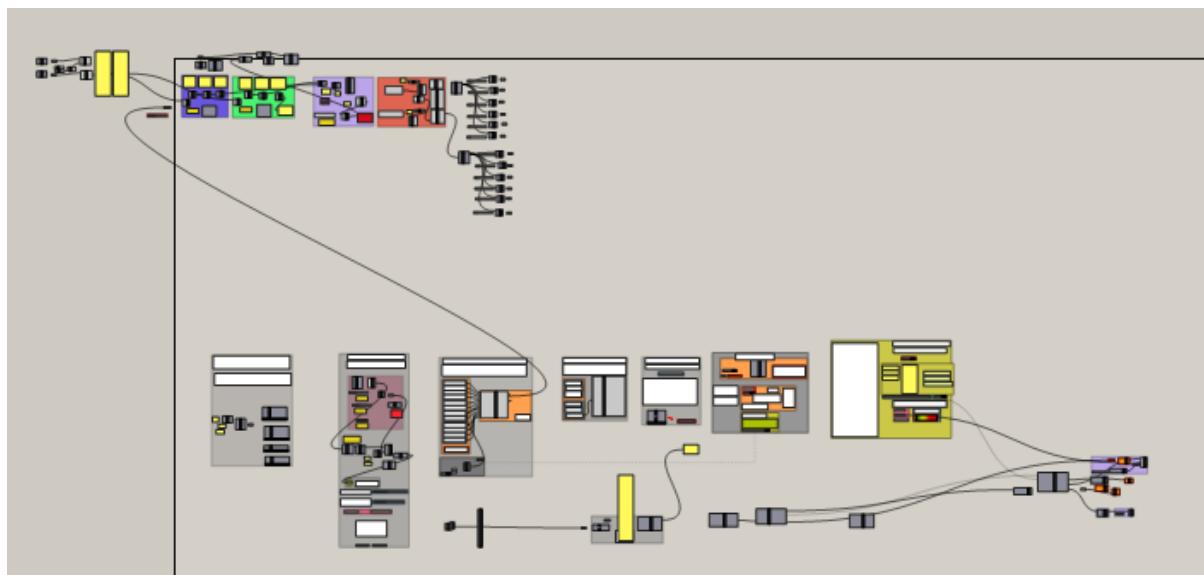
On choisit parmi les orientations Nord, Ouest, Sud, Est celle voulue. L'orientation est paramétrée de la même manière que pour la première étude.



CHOIX DE L'ORIENTATION DU MASQUE '/, TYPOLOGIE

On applique une rotation de $\pm \pi/4$ rad selon que l'on veuille un biais gauche ou droite, et aucune rotation pour un masque en face.

Vue d'ensemble du code Grasshopper :



III.3. Résultats des simulations et analyse

Ci-dessous sont présentés quelques graphiques que j'ai obtenus après avoir réalisé ces simulations. La résolution des calculs étant plus élevée que pour la première série (correspondant au réglages suivants de DIVA : `-ab 1 -ad 256 -as 256 -ar 128 -aa 0.15` - cf ANNEXE 1-), les valeurs obtenues sont supposées bien plus justes.

Ayant lancé les calculs pour un nombre important de cas de figure (360), je ne pouvais tous les faire apparaître sur un seul et même graphe sans rendre ce dernier illisible. C'est pourquoi j'ai réfléchi à quels types de graphes je pouvais faire apparaître. J'ai d'abord cherché à savoir si le «biais», c'est-à-dire l'inclinaison de $\pm \pi/4$ rad du masque par rapport à la typologie avait une réelle importance ou non. Puis j'ai adopté deux points de vue pour cette étude : le premier est un point de vue que je qualifie de global, car le but est de se demander, en analysant tel graphique, quelle situation typologie/masque est la mieux pour une orientation donnée. Le second est le point de vue du particulier qui, possédant une maison individuelle, explore l'éventail des possibilités : quel est le meilleur ou le pire en terme de masque, pour une orientation donnée ?

III.3.1 Influence du «biais» du masque par rapport à la typologie

La FIGURE 21 compare l'effet sur une tour de chacun des 6 masques possibles (Maison, Immeuble, Barre, Plot, Tour, Rien) selon qu'ils soit en biais gauche, en face, ou en biais droit. J'ai choisi d'illustrer l'influence du biais sur une tour car c'est cette typologie qui reçoit le plus d'énergie solaire, ceci en été et pour l'orientation la plus favorable aux apports, le Sud. Toutefois, quelles que soient la typologie, l'orientation ou la saison choisies, la conclusion est la même : l'influence du biais est négligeable. Cela nous permet de diminuer le nombre de cas «pertinents» parmi les valeurs à visualiser.

Influence du biais sur les apports solaires reçus en été par une tour, pour une orientation Sud

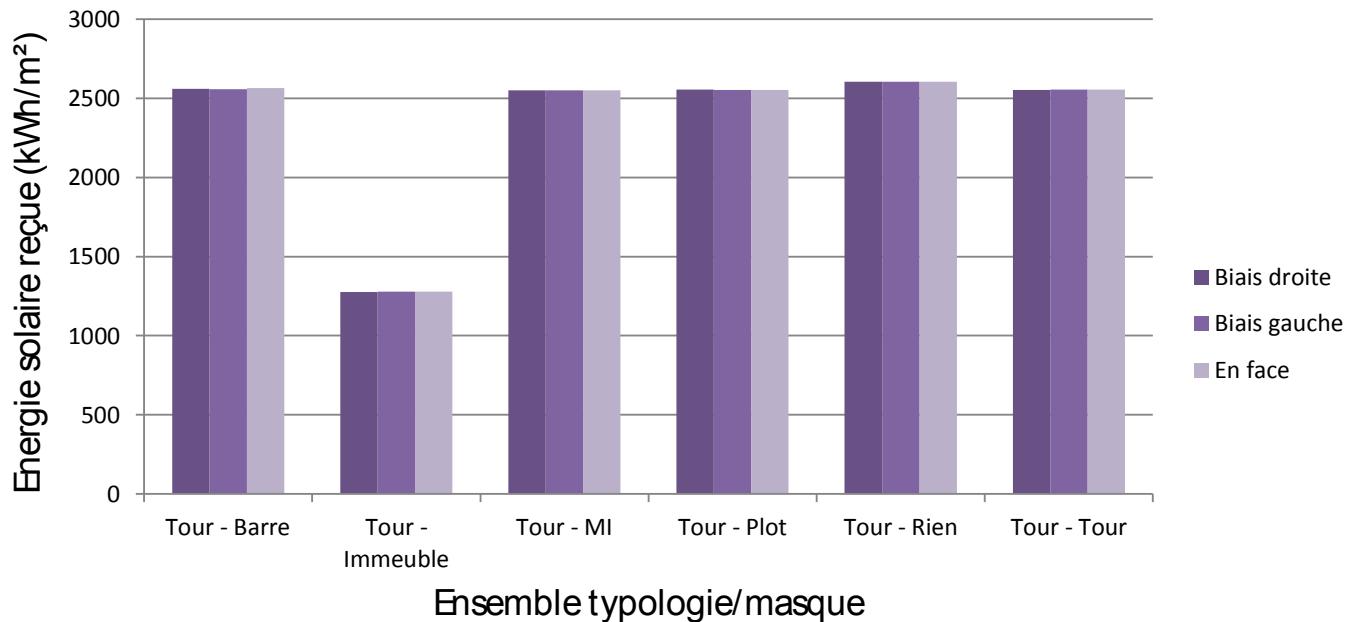


FIGURE 21

III.3.2 Point de vue global : comparaison entre énergie reçue en hiver et énergie reçue en été

La FIGURE 22 donne le rapport entre l'énergie solaire reçue en été et l'énergie solaire reçue en hiver, pour tous les cas de figure typologie/masque et ce au Sud. La première chose remarquable est que ce rapport s'approxime très bien par une droite affine : les apports solaires en hiver sont une fonction affine de ceux reçus en été. On peut donc en déduire qu'il n'y a pas de situation donnée «typologie+masque» optimale, où l'on maximisera les apports reçus par la typologie étudiée en hiver, tout en minimisant ceux reçus en été.

En outre, il faut examiner à quelle situation correspond chaque point de ce graphique. On peut distinguer 4 agglomérats de points : le premier regroupe des ensembles typologie+masque à faibles apports solaires en été et en hiver; il correspond à une petite typologie pavillonnaire qui fait face à de grands masques tels que la tour, l'immeuble, le plot, la barre. Ce résultat pouvait être intuité compte tenu du rapport des dimensions respectives pavillon/grand masque. Le second agglomérat correspond à quatre ensembles typologie+masque : Tour/Immeuble (l'un et l'autre typologie étudiée puis masque) et Barre/Plot (la même chose). Je commenterai la position de ce second groupe après avoir défini à quoi correspondent les deux derniers agglomérats. Le troisième est fait de deux situations : Pavillon/Pavillon et Pavillon/aucun masque. On remarque ainsi que pour un pavillon, la différence des apports solaires reçus entre le cas où il fait face à un masque de la même typologie et le cas où il ne subit aucun masque est minime, en comparaison aux apports solaires reçus dans les cas de grands masques. En effet, l'énergie solaire reçue aussi bien en été qu'en hiver est près de deux fois plus faible si le pavillon subit un grand masque, ou du moins un masque dont la largeur est plus importante. Notons qu'on retrouve bien l'évolution que laissait prévoir les FIGURES 15 et 16 (II.3.3.2) : les apports solaires restent faibles et varient peu dès que les dimensions de masque dépassent celles de la typologie.

Enfin, le quatrième groupe de points correspond aux situations typologie+masque restantes, c'est-à-dire masque et typologie de grandes dimensions. On précise que le calcul de l'énergie solaire reçue a bien été ramené au m^2 , sinon les différents cas de figure ne seraient absolument pas comparables. Pour ce type de situations où la typologie étudiée, bien que faisant face à un grand masque, reçoit beaucoup d'apports en été comme en hiver, il y a un réel potentiel de production d'énergie via les systèmes de panneaux solaires photovoltaïques (cf. page suivante sur l'électricité solaire photovoltaïque).

Ayant identifié le quatrième groupe de points, on peut donc revenir au second (correspondant aux situations Tour/Immeuble et Barre/Plot) pour le commenter. Il paraît étrange que le comportement énergétique des ensembles Tour/Immeuble et Barre/Plot soit si éloigné de celui des grands ensembles typologie+masque. Pour vérifier que cela n'était pas dû à un bug du moteur de calcul, j'ai relancé des simulations uniquement pour cas de figure et les résultats restent les mêmes. Pourquoi des apports reçus si faibles en été comme en hiver ? La seule explication que je puisse donner est que cela est peut-être dû à une différence importante entre les deux gabarits typologie et masque : par exemple, pour le cas de figure Tour/Immeuble, la tour est l'ensemble le plus haut, mais n'est ni large ni longue. A l'inverse, l'immeuble est de forme allongée et peu haut. Néanmoins, on pourrait se demander pourquoi le profil énergétique de l'ensemble Barre/Tour ne suit pas la même tendance, alors que la barre et la tour ont des gabarits exactement opposés. Je suppose que c'est parce que la barre est suffisamment longue pour compenser les pertes induites par un masque «tour», alors que l'immeuble non. On pourrait raisonner de la même manière pour le cas de figure Barre/Plot en comparaison à Barre/Tour.

Rapport entre énergie solaire (kWh/m^2) reçue en hiver et en été, pour tous les cas de figure typologie + masque orientés au Sud

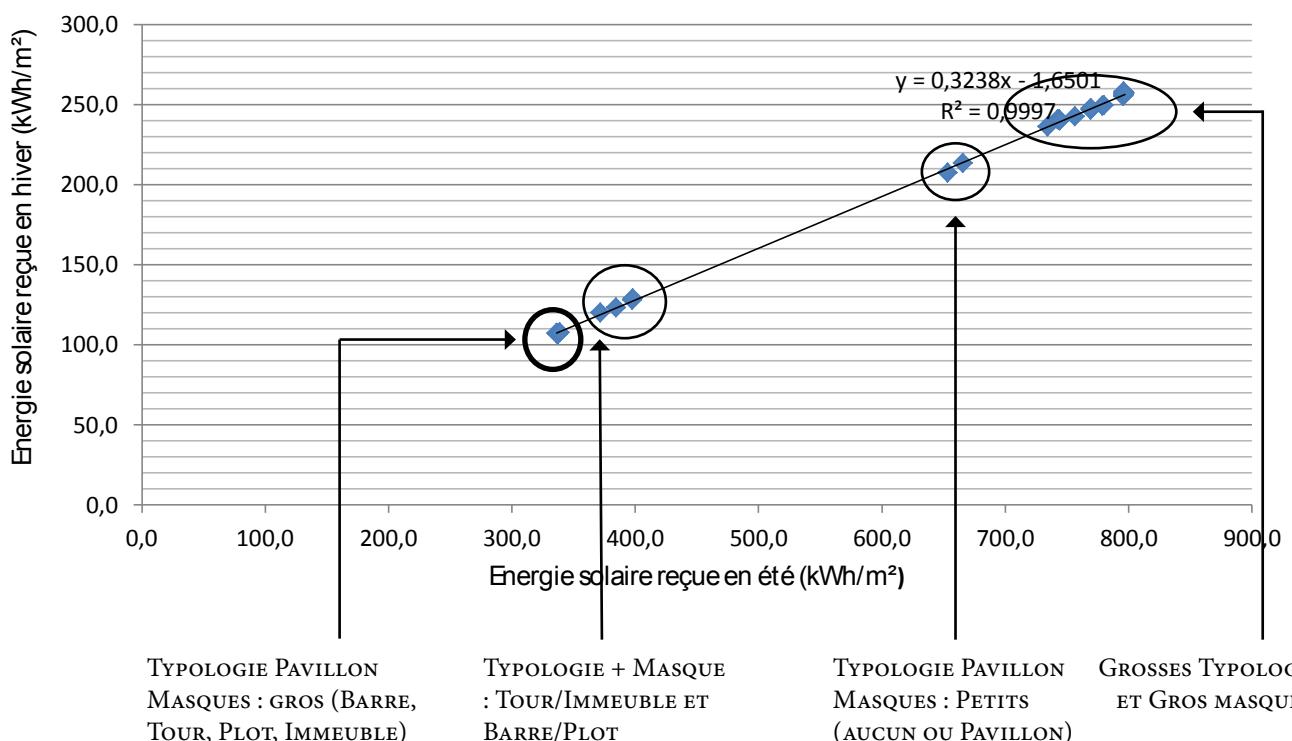


FIGURE 20

Electricité solaire photovoltaïque

Les cas de figure typologie+masque du 4ème agglomérat de points de la FIGURE 20 ont un réel potentiel de production d'électricité. Détaillons un peu comment est produite puis réutilisée l'électricité solaire. Tout d'abord, le principal défaut de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire est le fait qu'on a besoin de batteries pour stocker l'énergie si la demande en électricité n'est pas simultanée à la disponibilité de l'énergie lumineuse. Pour les sites isolés (en zone rurale par exemple) où le réseau d'électrification n'est pas assez rentable, la production d'électricité peut être réalisée en utilisant les photopiles. Des batteries de stockage sont alors indispensable pour assurer un service ininterrompu. Par ailleurs, dans l'optique de diversifier les ressources d'énergie, de nombreuses initiatives encouragent l'implémentation de panneaux solaires photovoltaïques en zone urbaine. Ces systèmes sont alors raccordés au réseau : l'énergie nécessaire y est puisée et l'énergie produite y est injectée. Le réseau permet alors d'absorber les variations de production journalière et saisonnière.

III.3.2 Point de vue du particulier : comparaison de l'impact de différents masques sur une maison individuelle, selon l'orientation et les saisons

Ici, on peut se placer dans la peau d'un particulier qui veut construire sa maison (ou son pavillon). La question à se poser est : quel environnement proche (quels masques à quelles orientations) est-il le plus favorable à l'énergie solaire que recevra ma maison ?

La FIGURE 23 fait apparaître les rapports entre énergie reçue en hiver et énergie reçue en été, pour toutes les orientations et tous les profils typologie/masque. Le premier constat à faire est le fait que quelle soit l'orientation de l'ensemble typologie+masque, ce rapport s'approxime toujours parfaitement par une droite affine. On remarque ainsi que la pente pour les orientations Nord, Ouest et Est est sensiblement la même, alors qu'elle est plus élevée pour le Sud (environ 1.7 fois en faisant le rapport des coefficients directeurs). Ce qui signifie que pour de mêmes apports solaires en été pour le Sud et une autre orientation, le Sud reçoit 1.7 fois plus d'apports en hiver. Ceci illustre bien le fait que l'énergie solaire reçue en hiver est concentrée au Sud.

On peut par ailleurs commenter le placement des points de chacune de chaque courbe, qui est similaire : dans le sens des abscisses croissantes, on retrouve pour chacune d'elles un groupe de points, puis un point isolé puis un autre. Le premier groupe de points correspond aux ensembles «pavillon + grand masque (tour, barre, immeuble, plot)», le second au cas de figure «pavillon + aucun masque», et le dernier «pavillon + pavillon». Ainsi, avec de grands masques autour d'elle, une maison reçoit bien moins d'énergie solaire que dans le cas où le masque est induit par une autre maison. De plus, la différence d'apports est plus importante en été qu'en hiver, ce qui n'est pas une mauvaise chose puisque les apports en été, en France, sont superflus. Il paraît en outre étrange qu'une maison subissant un masque de type maison, reçoive plus d'apports qu'une maison n'ayant aucun masque. Ceci est probablement dû aux réglages de RADIANCE qui prennent en compte le rayonnement solaire réfléchi par la maison agissant comme masque.

On notera aussi qu'un grand masque au Sud (courbe en violet, premier agglomérat de points) a un même impact en hiver qu'un masque de type maison ou aucun masque à l'Ouest et à l'Est (courbes en bleu et vert, derniers points) : l'énergie solaire reçue (en ordonnée) est la même. Ce grand masque Sud induit moins d'apports en été, mais cela n'a pas d'importance puisque les besoins en chaud en été sont quasi-nuls. Ainsi on privilégiera toujours des ouvertures au Sud pour la construction, quels que soient les masques en face.

Rapport entre rayonnement reçu en été et rayonnement reçu en hiver par une maison individuelle, pour tous types de masques, selon l'orientation

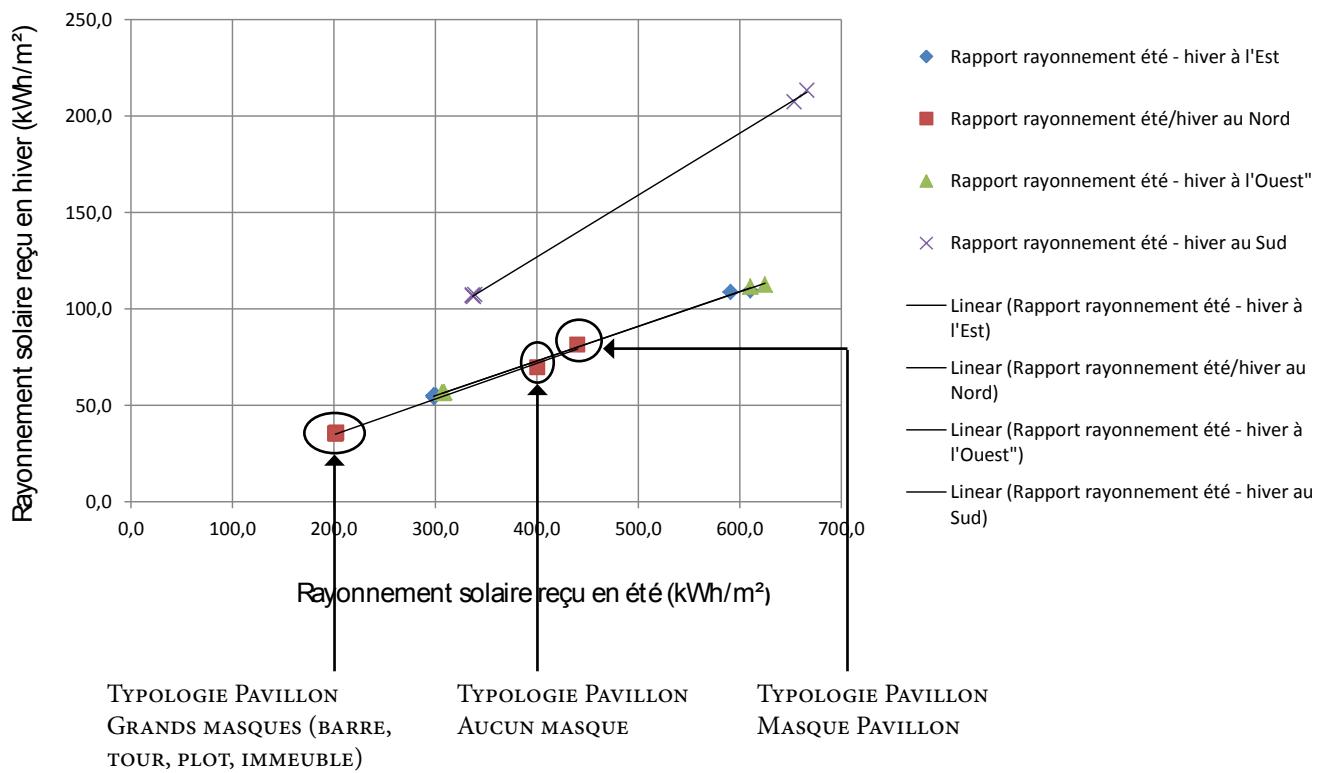


FIGURE 23

Après avoir étudié le rapport été/hiver concernant l'énergie solaire, j'ai voulu tracer des graphiques me permettant de mieux comparer l'impact des différents masques par orientation. Il sont représentés sur les FIGURES 22 et 23. En comparant l'allure des courbes d'hiver et d'été, on remarque distinctement que le Sud est l'orientation prépondérante pour les apports solaires et ce, bien plus en hiver qu'en été. On voit également pour chaque saison que les courbes MI(Maison Individuelle)-Tour, MI-Barre, MI-Plot et MI-Immeuble sont confondues, ce qui rejoint mon analyse du graphe précédent : les grands masques influent quasiment de la même manière sur le rayonnement reçu. Les courbes MI-aucun masque et MI-MI sont proches également, et on remarque que la courbe MI-MI dépasse MI-aucun masque pour l'orientation Sud seulement. Ceci s'explique par le grand nombre de rayons solaires au Sud et donc le grand nombre de réflexions sur la maison agissant en tant que masque. Ces réflexions sont alors assez nombreuses pour que le rayonnement reçu soit plus important que sans masque.

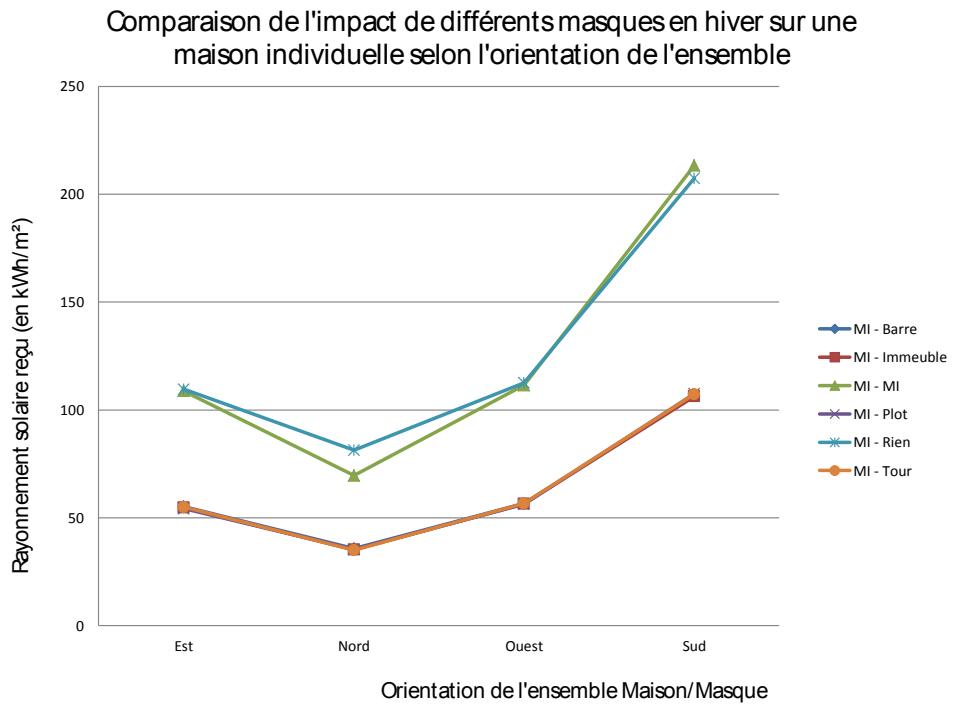


FIGURE 24

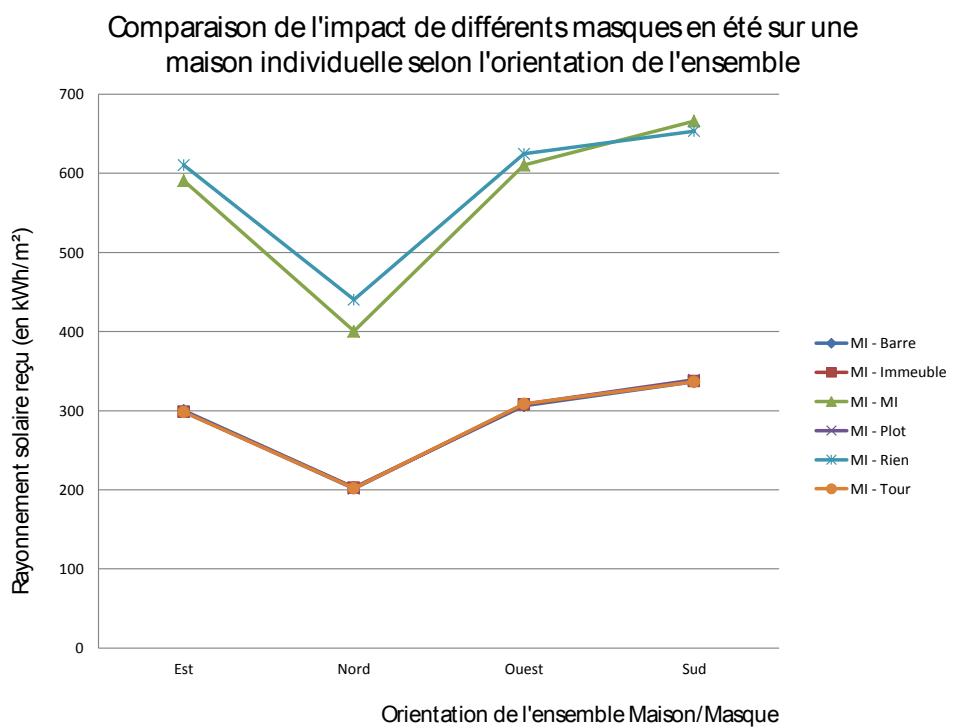


FIGURE 25

CONCLUSION ET BILAN PERSONNEL

CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche *Ignis Mutat Res* «Penser la ville, l'architecture et les paysages au prisme de l'énergie. Auparavant, l'équipe de recherche s'est attachée à décrire les bâtiments en corrélation avec leurs performances énergétiques par l'intermédiaire d'indicateurs de forme tels que la Morphologie, ou la Porosité. Cela a permis de commencer un classement des typologies. Le projet que j'ai mené de front avec les élèves du DPEA Post-Carbone avait pour but de valider le choix des typomorphologies fait en amont, de vérifier les critères morphologiques et éventuellement d'en dégager de nouveaux. Nous avons orientés notre recherche vers la mise en évidence de paramètres morphologiques. Nous nous sommes fixés l'objectif de léguer un programme de modélisation qui permettra de diagnostiquer des situations réelles.

Concernant mon étude seule sur les masques solaires, il s'avère qu'elle mettait en oeuvre un très grand nombre de paramètres. Pour la 2^e version qui fait l'objet de ma III^e partie, il y avait 5 typologies différentes, 6 masques possibles, 4 orientations de l'ensemble typologie+masque et 3 biais -ou excentration- de masque, et 2 saisons sur lesquelles lancer les simulations. La difficulté a été de sélectionner les données pour obtenir les graphes les plus clairs possibles.

Une conclusion immédiate que l'on peut tirer est le fait que les bâtiments environnants pour une typologie jouent un rôle clé. En outre, cette étude m'a permis d'affiner l'influence de chaque paramètre de masque, à savoir : hauteur, largeur, orientation de l'ensemble typologie+masque, et excentration -ou biais- du masque. La première étude que j'ai réalisée ne modélisait pas la réalité et servait tout d'abord à échelonner l'importance de chacun d'eux. La seconde étude en revanche, avait pour but de réaliser un catalogue des situations existantes et de les classer. Ainsi, tant qu'un masque reste de dimensions voisines (inférieures ou égales) à celles de la typologie concernée, il fait peu baisser les apports solaires reçus. En revanche, dès que ses dimensions dépassent celles de la typologie, l'énergie solaire reçue diminue beaucoup et rapidement. -Il semble par ailleurs qu'il faille éviter les cas de figure du type «Barre - Plot» ou «Tour - Immeuble» où des bâtiments de dimensions opposées se font face et où les deux en pâtissent. Enfin, le Sud étant quasiment la seule orientation recevant du rayonnement solaire en hiver, il est préférable d'avoir ses vitrages au Sud quel que soit le masque en face.

Dans le cadre d'une stratégie de rénovation pour un bâtiment donné, il s'agit de minimiser l'influence des masques environnants. Pour cela, de nombreuses solutions sont actuellement proposées : le recouvrement des façades par des peintures à faibles albédos, la végétalisation des façades...

Il s'agit en fait de «rendre la ville énergétiquement résiliente». Ce terme désigne à l'origine une propriété mécanique, la capacité d'un matériau à résister aux chocs. Par extension à l'architecture, il s'agit de rendre nos bâtiments et nos villes à résister à des chocs environnementaux et, plus particulièrement dans le cadre de la recherche *Ignis Mutat Res*, à la double contrainte de la raréfaction des ressources en énergie fossile et de l'incertitude climatique.

BILAN PERSONNEL

Ce stage scientifique m'a permis de comprendre les enjeux actuels de l'urbanisme en intégrant un projet de recherche en cours de route. J'ai pu développer une méthode de réflexion basée sur l'étude des avancées actuelles dans ce domaine, ce qui fait qu'une partie non négligeable de mon travail lors de ce stage a été de la recherche bibliographique. J'ai également appris à manipuler les logiciels Rhinocéros et Grasshopper qui sont des outils très puissants pour la conception architecturale, via lesquels on peut non seulement lancer des calculs liés au rayonnement solaire, mais de l'optimisation, des besoins en chaud, en froid, en électricité... Je pense que ces connaissances informatiques me serviront par la suite. Par ailleurs, j'ai pu appréhender la manière de travailler des architectes en travaillant en commun avec des élèves en post-master à l'ENSAVT. Ce projet était ainsi aussi bien enrichissant sur le plan technique que sur le plan de la réflexion.

ANNEXE 1 : DÉFINITIONS

- **ALBÉDO** : Pour un matériau, c'est le pourcentage de rayonnement solaire incident réfléchi. Cette valeur est dépendante de la longueur d'onde du rayonnement incident. L'indice est exprimé entre 0 et 1. Il exprime donc la capacité d'un matériau à réfléchir l'énergie incidente et donc à ne pas l'absorber et à ne pas chauffer. Par exemple, un miroir parfait aura un albédo de 1, car il renvoie tous les rayons. A l'inverse, une surface parfaitement noire aura un albédo nul.
- **AZIMUT** : C'est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence. Dans les domaines de l'urbanisme et de l'architecture, cette direction est le Sud.
- **CONVECTION** : Mode de transfert thermique par déplacement de matière.
- **CONDUCTION** : Mode de transfert thermique sans déplacement de matière, pouvant être interprété comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique.
- **DISTRIBUTION INTÉRIEURE** : C'est la manière dont sont répartis les échanges énergétiques à l'intérieur d'un bâtiment.
- **INDICE DE COMPACITÉ DE GRAVELIUS K** : C'est un outil d'évaluation de morphologie. Il correspond au rapport du périmètre P de la morphologie à évaluer sur le périmètre d'un cercle dont le disque est de même aire A . Il est donné par :
$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$
- **MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE** : Les moteurs de modélisation paramétrique s'appuient sur des paramètres (chiffres ou caractéristiques) afin de déterminer le comportement d'une entité graphique et définir les relations entre les composants du modèle. Un avantage considérable de la modélisation paramétrique est qu'elle permet de coordonner les modifications.
- **PLAN LOCAL D'URBANISME (P.L.U)** : C'est le principal document de planification de l'urbanisme au niveau communal. Il définit entre-autres le projet d'aménagement et de développement durable (PADD), les orientations particulières d'aménagement, et les règles d'urbanisme. Notamment, la règle qui m'a intéressée est la distance l à respecter entre deux bâtiments : $l = h_{max}/2 \geq x$, avec :
 h_{max} : hauteur du plus grand des deux bâtiments en question
 x : distance minimale définie dans le PLU. Pour le territoire de la Dorsale Est, elle est par exemple de 6m, ce qui est peu dense.
- **SURFACE HABITABLE** (selon les 2e et 3e alinéas de l'article R. 111-2 du code de la construction et de l'habitation) : « La surface habitable d'un logement est la surface de plancher construite, après déduction des surfaces occupées par les murs, cloisons, marches et cages d'escaliers, gaines, embrasures de portes et de fenêtres ; le volume habitable correspond au total des surfaces habitables ainsi définies multipliées par les hauteurs sous plafond. Il n'est pas tenu compte de la superficie des combles non aménagés, caves, terrasses, loggias, balcons, vérandas, volumes vitrés prévus à l'article R. 111-10, locaux communs et autres dépendances des logements, ni des parties de locaux d'une hauteur inférieure à 1,80 mètre. »

ANNEXE 2 : RÉGLAGES DE DIVA ET RADIANCE

RÉGLAGES DE DIVA

Pour lancer une étude concernant le rayonnement solaire via DIVA, il est nécessaire de définir les matériaux composant l'environnement étudié, à savoir : le type de sol extérieur, le type de plancher, le type de façade, le type de murs intérieurs, les vitrages et les éventuelles surfaces d'eau. On peut choisir parmi une gamme de référence, dont le menu déroulant est visible sur la FIGURE mais il est toujours possible de charger son propre fichier matériau au format Radiance (.rad).

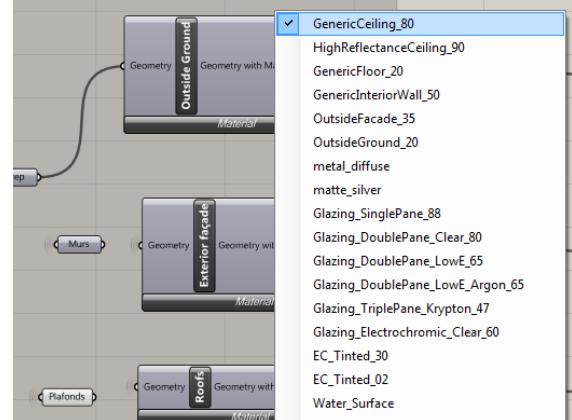


FIG. 26 : Définition des matériaux

PROBLÈMES AUX LIMITES

Une fois les matériaux choisis, il faut définir une surface de référence pour le calcul de l'énergie solaire reçue. Cette surface est quadrillée, et le calcul est fait en chaque noeud du maillage, dont on peut définir la finesse. Surtout, il est nécessaire de prendre garde aux limites : on doit s'assurer que la surface de calcul est à au moins 5 cm de tout autre mur et qu'elle n'intersecte aucune géométrie. Sur la FIGURE, par exemple, on a voulu connaître l'éclairement arrivant sur une face. On voit bien que la surface de calcul est légèrement plus petite et avancée par rapport à cette face. En effet, d'une manière générale, il faut éliminer tous les problèmes aux limites pour les moteurs de calcul.

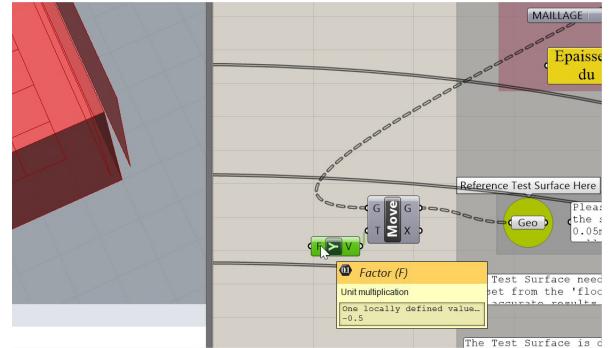


FIG. 27 : Surface de calcul et problème aux limites

RÉGLAGES DE RADIANCE :

DIVA pilote le moteur de calcul RADIANCE, dont les paramètres peuvent être réglés comme indiqué ci-dessous :

-ab *n* -ad *m* -as *p* -ar *res* -aa *acc*

n : Définit le nombre de réflexions pour chaque rayon solaire incident, pris en compte dans le calcul du rayonnement solaire indirect.

m : Définit la précision dans le calcul de rayonnement indirect (l'erreur étant inversement proportionnelle à la racine carrée de *m*).

p : Définit l'échantillonnage supplémentaire, appliqué entre deux valeurs trop distantes de l'algorithme itératif

res : Définit la résolution du calcul. Ce nombre détermine l'intervalle entre les valeurs utilisées pour l'interpolation. Plus cet intervalle est petit, plus la résolution est grande. Une valeur de 0 signifie une résolution infinie.

acc : Définit la précision du calcul. Cette valeur serait environ égale à l'erreur obtenue lors du calcul de rayonnement indirect fait par interpolation. Une valeur de 0 équivaut à aucune interpolation.

RADIANCE prend en compte le calcul de rayonnement direct, diffus et réfléchi. La justesse de ses calculs devra être vérifiée par la suite, par une comparaison à des calculs théoriques, ou à d'autres logiciels de simulation thermique si besoin.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. NEIL ADGER, *Building resilience to promote sustainability, IHDP Update*, 2:1 3, 3003.
- [2] L. ARANTES, *L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. O. Baverel), 2013.
- [3] COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, *Chiffres clés de l'énergie*, édition 2012, 2012.
- [4] AURÉLIE DE BOISSIEU, *Conception architecturale et/ou modélisation paramétrique ?*, www.complexitys.com, 2011.
- [5] ELIOTH, EGIS CONCEPT, *Guide d'interactions énergie-climat, Volume 2 «Résilience»*, 2013.
- [6] ERIC HOLLNAGEL & DAVID D. WOODS, *Resilient Engineering : Concept and Precept*, Ashgate, 2006.
- [7] EQUIPE IGNIS MUTAT RES (ENSAVT/ENPC/Navier), *Penser la ville, l'architecture et les paysages au prisme de l'énergie, «Vers une ville énergétiquement résiliente»*, 2013.
- [8] J-M. JANCOVICI, www.manicore.com.
- [9] J-A JAKUBIEC, *Diva 2.0 : Integrating daylight and thermal simulations using Rhinoceros 3D, Daysim and EnergyPlus*, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2011.
- [10] N. KOTELNIKOVA-WEILER, *Optimisation mécanique et énergétique d'enveloppes en matériaux composites pour les bâtiments*, thèse de doctorat ADEME/CSTB/Navier (dir. O. Baverel et J-F. Caron), 2012, pp.44-57.
- [11] MAIRIE DE CLICLY-SOUS-BOIS, *Plan local d'urbanisme*, approuvé en 2010.
- [12] DONELLA & DENNIS MEADOWS, J. RANDERS, *Limits to Growth - The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing, 2004.
- [13] M. MUSY, *Cours sur le micro-climat et formes urbaines, Indicateurs*, 2012.
- [14] A. PAYEN, *Performances énergétiques de tissus urbains*, projet de fin d'étude des Ponts ParisTech CSTB (dir. S. Salat et B. Peuportier), 2011.
- [15] B. PEUPORTIER, *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*, Presse des Mines ParisTech, 2008
- [16] C. RATTI, D. RAYDAN, K. STEEMERS, *Building form and environmental performance : archetypes, analysis and an arid climate*, Energy and Buildings, 35:49-59, 2003.
- [17] S. SALAT, F. LABBÉ, C. NOWACKI, *Les Villes et les Formes, Sur l'urbanisme durable*, éditions Hermann, 2011.
- [18] SOLEMMA LLC, www.diva4rhino.com, 2014.
- [19] G.J. WARD, *The Radiance Lighting Simulation and Rendering System*, Computer Graphics (Proceedings of '94 SIGGRAPH conference), July 1994, pp. 459-72

Annexe 9

Données, rapport de stage post DPEA

Résumé des hypothèses choisies pour l'étude théorique de la morphologie du bâti. On se limite ici à la variation de trois paramètres:

- Les masques solaires représentant les bâtiments environnants.
- La rugosité qui regroupe à la fois l'orientation du bâtiment et son développement de façade.
- La porosité étant le rapport entre les ouvertures et les parties pleines des façades du bâtiment.

0. TYPOLOGIE

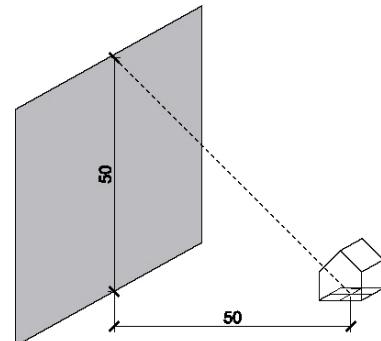
Les gabarits initiaux:

- PAVILLON _ Base: 9m X 12m, R+1 + combles (pente à 45°)
- BARRE _ Base: 15m X 42m, R+6
- TOUR _ Base: 18m X 24m, R+14

A noter : On a fixé la hauteur d'un niveau à 3m

1. MASQUES

On définit le masque comme un écran carré de 50m de haut par 50m de long, situé à une distance de 50m entre le masque et la projection au sol du centre du bâtiment. Cela correspond à un masque significatif qui pourrait être celui d'une barre ou d'un pavillon en tissu dense.



En croisant les typologies de masque avec les 8 orientations principales, on obtient donc 9 choix possibles de masques :

0. NORD
1. NORD EST
2. EST
3. SUD EST
4. SUD
5. SUD OUEST
6. OUEST
7. NORD OUEST
8. AUCUN

2. ZONE THERMIQUE

Pour définir la zone thermique, on détermine tout d'abord l'orientation principale du bâtiment

Est/Ouest, Nord/Sud, Nord Est/Sud Ouest et Nord Ouest / Sud Est

1. Rugosité

On détermine ensuite la rugosité du bâtiment qui est liée au linéaire de façade de celui-ci. On fait le choix d'une rugosité est identique sur toutes les façades verticales du bâtiment. Elle se caractérise par un coefficient et pas par une orientation.

Définition du coefficient de rugosité =

Périmètre du bâtiment

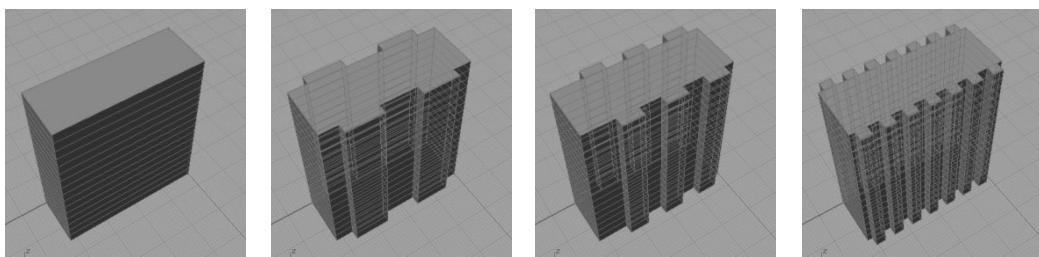
Périmètre minimal de la surface au sol du bâtiment ($2\pi\sqrt{S}/\pi$)

Pour chacune des 3 typologies, on obtient 16 choix possible de zones thermiques :

0. FORT _ EST/OUEST
1. FORT _ NORD/SUD
2. FORT _ NORDOUEST/SUDEST
3. FORT _ SUDOUEST/NORDEST
4. MOYEN _ EST/OUEST
5. MOYEN _ NORD/SUD
6. MOYEN _ NORDOUEST/SUDEST
7. MOYEN _ SUDOUEST/NORDEST
8. FAIBLE _ EST/OUEST
9. FAIBLE _ NORD/SUD
10. FAIBLE _ NORDOUEST/SUDEST
11. FAIBLE _ SUDOUEST/NORDEST
12. LISSE _ EST/OUEST
13. LISSE _ NORD/SUD
14. LISSE _ NORDOUEST/SUDEST
15. LISSE _ SUDOUEST/NORDEST

PAVILLON (échelle de rugosité à déterminer)

BARRE



On ajoute des redans à la barre sur les deux façades les plus longues. On fait le choix de fixer la profondeur du redans à 2m, équivalent à un très grand balcon. On fait seulement varier sa largeur, donc le nombre de redans.

LISSE sans redans (coef 1,28)

FAIBLE largeur de 9,4m (coef 1,39) ; pour une barre de 42m, 2 redans

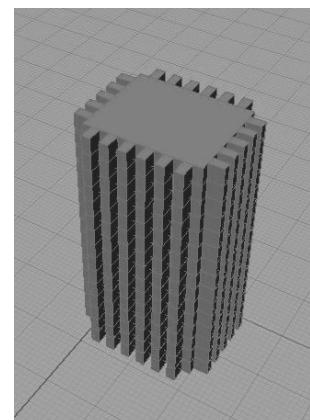
MOYEN largeur de 5,6m (coef 1,61) ; pour une barre de 42m, 4 redans

FORT largeur de 3m (coef 1,93) ; pour une barre de 42m, 7 redans

TOUR

De la même façon que pour la barre à redans, on dispose des ajouts sur les façades. Ici pour la tour, les ajouts sont sur les quatre façades simultanément.

- LISSE (coef 1.13) correspond au modèle lisse sans redans
- FAIBLE(coef 1.51) correspond à des redans de 3m de large et de 1,2m de profondeur
- MOYEN(coef 1.97) correspond à des redans de 1,5m de large et de 1,2m de profondeur
- FORT (coef 2.93) correspond à des redans de 1,5m de large et de 2,6m de profondeur



2. Assemblage

Uniquement pour les cas du pavillon et de la barre.

Les deux étapes du paramètre assemblage:

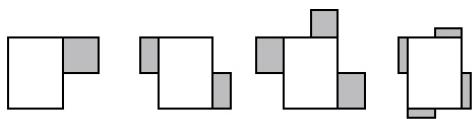
1. Faire tourner le bâtiment selon les 4 orientations (E/O, N/S, NE/SO et NO/SE)
2. Faire varier la géométrie de l'assemblage

PAVILLON

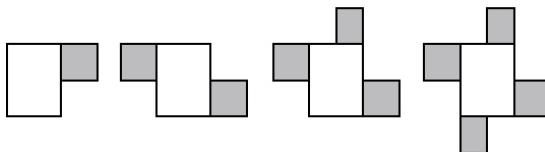
La rugosité pour le pavillon consiste à créer une extension. Les modèles suivants possèdent une extension sur chacune des quatre faces. La longueur de l'extension est égale à la moitié de la longueur de la face. On fait varier la profondeur de ces extensions (solution A) :

- LISSE correspond quasiment au modèle sans extension
- 1 extension correspond à 6m de profondeur
- 2 extensions correspond à 3m de profondeur
- 3 extensions correspond à 4,5m de profondeur
- 4 extensions correspond à 1,5m de profondeur

Ou bien avec une profondeur déterminer de 6 m, en faisant uniquement varier le nombre d'extension (solution B)



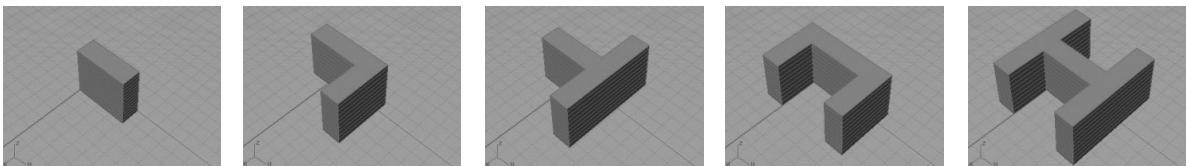
Solution A



Solution B

On obtient 20 cas pour les pavillons ou 36 cas si on étudie les deux solutions

BARRE



Les formes étudiées :

- plan en I (4 cas)
- plan en L (16 cas)
- plan en T (8 cas)
- plan en U (8 cas)
- plan en H (4 cas)

On fixe la longueur du retour comme égale à 1/2 la longueur du bâtiment.

Ce qui donne 40 cas pour la barre.

3. OUVERTURES

La porosité est répartie de manière identique sur toutes les faces principales du bâtiment.

Elle ne varie pas selon les orientations du bâtiment.

Le pourcentage correspond au rapport entre la surface d'ouverture et la surface de la façade.

Les surfaces d'ouvertures sont disposées au centre de la face et se multiplie avec le nombre de niveau. Une surface est donc proportionnelle à la longueur de la face et à la hauteur d'un niveau.

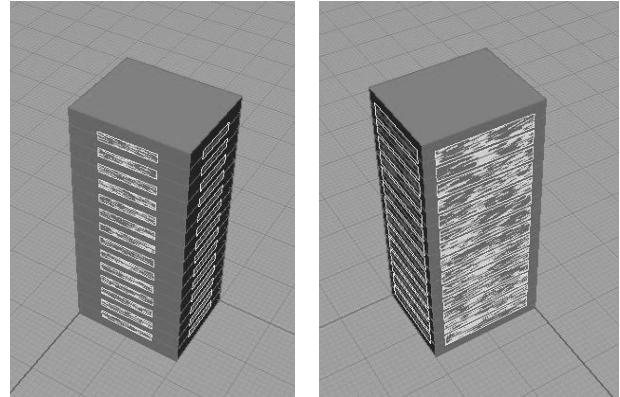
On détermine donc 4 choix possible de pourcentage d'ouverture :

0. 25%

1. 40%

2. 50%

3.65%



4. BILAN

Le nombre de cas à calculer :

-masque = 8 cas

-rugosité = 16 cas (pavillon) + 16 cas (barre 1) + 16 cas (tour) = 48 cas

-assemblage = 40 cas

-porosité = 4 cas

1 536 cas pour la rugosité

1 280 cas pour l'assemblage

TOTAL: 2 816 CAS

