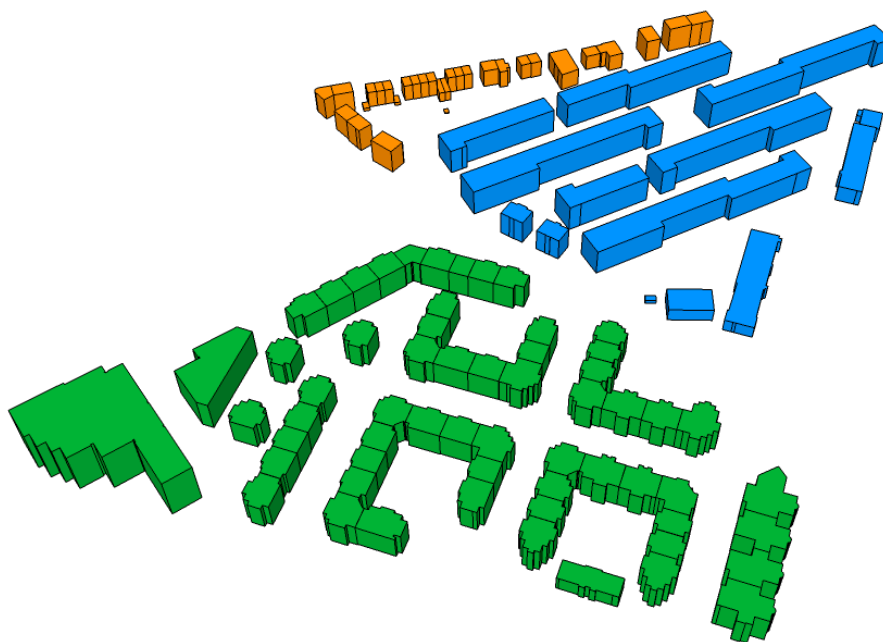


# Etude d'un quartier zurichois

d'un point de vue énergétique à l'aide du logiciel *CitySim*

---



David Besson  
Etudiant Génie mécanique

Projet de semestre LESO  
EPFL - juin 2010

# Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>Objectifs .....</b>	<b>5</b>
<i>But général .....</i>	<i>5</i>
<i>Objectifs concrets.....</i>	<i>5</i>
<b>Modélisation .....</b>	<b>7</b>
<i>Choix du quartier .....</i>	<i>7</i>
<i>Données à disposition.....</i>	<i>7</i>
<i>Outils .....</i>	<i>8</i>
<i>Résultats .....</i>	<i>8</i>
<b>Paramètres physiques .....</b>	<b>13</b>
<i>Données à disposition.....</i>	<i>13</i>
<i>Résultats .....</i>	<i>13</i>
<i>Analyse de sensibilité .....</i>	<i>18</i>
<b>Scénarios .....</b>	<b>21</b>
<i>Amélioration de l'isolation .....</i>	<i>21</i>
<i>Changement du système de chauffage .....</i>	<i>25</i>
<b>Conclusion .....</b>	<b>29</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>31</b>
<i>Propriétés générales .....</i>	<i>31</i>
<i>Réflexion des ondes courtes .....</i>	<i>31</i>
<i>Propriétés matériaux .....</i>	<i>32</i>
<i>Composition des murs .....</i>	<i>32</i>
<i>Graphes de sensibilité.....</i>	<i>33</i>

# Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de semestre au sein du laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESO) de l'EPFL.

Le but de ce projet consiste à mettre en application le logiciel *CitySim* afin de mieux comprendre l'énergétique d'un quartier. Ce logiciel, encore en développement, permet de simuler les flux énergétiques de plusieurs bâtiments en tenant compte de paramètres importants comme la composition des murs ou le climat. Des données clés telles que les besoins de chauffage ou en refroidissement peuvent alors être exploitées.

Ce travail se décompose en quatre parties principales:

- Le premier chapitre décrit le but et les objectifs concrets de ce projet.
- Le deuxième chapitre présente le quartier qui aura été choisi pour la modélisation. La démarche choisie et les outils mis en oeuvre afin de le modéliser sont donnés avant de présenter le résultat de la modélisation.
- Le chapitre suivant donne les différents paramètres physiques qui auront été choisis pour définir le scénario de base, qui constitue le cas réel qui aura été modélisé au mieux. Les besoins en chauffage de ce scénario sont comparés à plusieurs standards suisses tandis que l'impact des différents paramètres sur ce résultat est finalement donné.
- Le quatrième chapitre propose deux scénarios qui consistent à modifier certains paramètres du scénario de base. Le premier scénario consiste à améliorer en certains endroits l'isolation des bâtiments et le deuxième scénario propose de remplacer le système de chauffage du scénario de base.

Finalement, les résultats de ce travail seront mis en perspective et des pistes pour approfondir ce travail seront données dans le chapitre de conclusion.

Une annexe en fin de document rassemble encore les principaux chiffres utilisés tout au long de ce travail, par exemple les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la combustion de gaz.



# Objectifs

Ce projet qui s'inscrit dans le cadre du LESO et de son logiciel *CitySim*, poursuit un but d'ordre général qui se concrétise en plusieurs objectifs plus concrets.

## But général

*CitySim* est un logiciel encore en phase active de développement. Dans cette optique, l'application de *CitySim* par des profanes sur un cas concret s'avère précieuse et permet d'en dégager les principaux atouts et points faibles.

Les résultats obtenus à l'aide de *CitySim* ne se destinent pas à déboucher sur des mesures concrètes comme des rénovations, mais à mettre en évidence les capacités du logiciel et la cohérence des résultats obtenus.

Afin d'atteindre ce but, une démarche se décomposant en plusieurs objectifs concrets a été établie et est présentée ci-dessous.

## Objectifs concrets

La démarche établie afin d'évaluer *CitySim* dans un cadre concret se décompose en quatre étapes.

### *Modélisation*

La première étape consiste à choisir un quartier de la ville de Zürich afin de le modéliser géométriquement. Dans la mesure du temps à disposition et de la facilité de modélisation, celle-ci peut porter sur quelques bâtiments contigus ou, dans l'idéal, sur un quartier complet de Zürich.

### *Paramètres physiques*

Après avoir modélisé géométriquement les bâtiments, il s'agit de leur attribuer des caractéristiques physiques correspondant au mieux à la réalité. Ces propriétés sont attribuées soit aux surfaces (composition des murs, proportion de vitrages, etc.) soit au bâtiment lui-même (type de chauffage, taux d'infiltration d'air, etc.). Ce cas, correspondant au mieux à la réalité, sera dénommé scénario de base.

### *Scénarios*

Afin d'évaluer l'impact d'un changement des caractéristiques du modèle de base, différents scénarios sont établis. Ils consistent à modifier les paramètres physiques du scénario de base et d'en mesurer les conséquences sur les besoins en chauffage ou encore sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

### *Signatures énergétiques*

Dans la mesure du temps disponible, la signature énergétique des différents bâtiments modélisés doit être obtenue. Cependant, le calendrier ne l'aura pas permis et ces signatures ne sont pas présentées dans ce travail.



# Modélisation

La première étape consiste à modéliser géométriquement un ensemble de bâtiment de la ville de Zürich. Le quartier choisi et devant être modélisé est d'abord présenté. Ensuite, les données à disposition permettant d'atteindre cet objectif sont fournies. Finalement, les problèmes rencontrés et les outils utilisés sont donnés avant de présenter le résultat final de la modélisation.

## Choix du quartier

Le quartier choisi doit être dans la mesure du possible suffisamment hétérogène afin de constituer un échantillon représentatif des divers bâtiments constitutifs d'une ville. C'est pourquoi le quartier suivant a été sélectionné (figure 1).

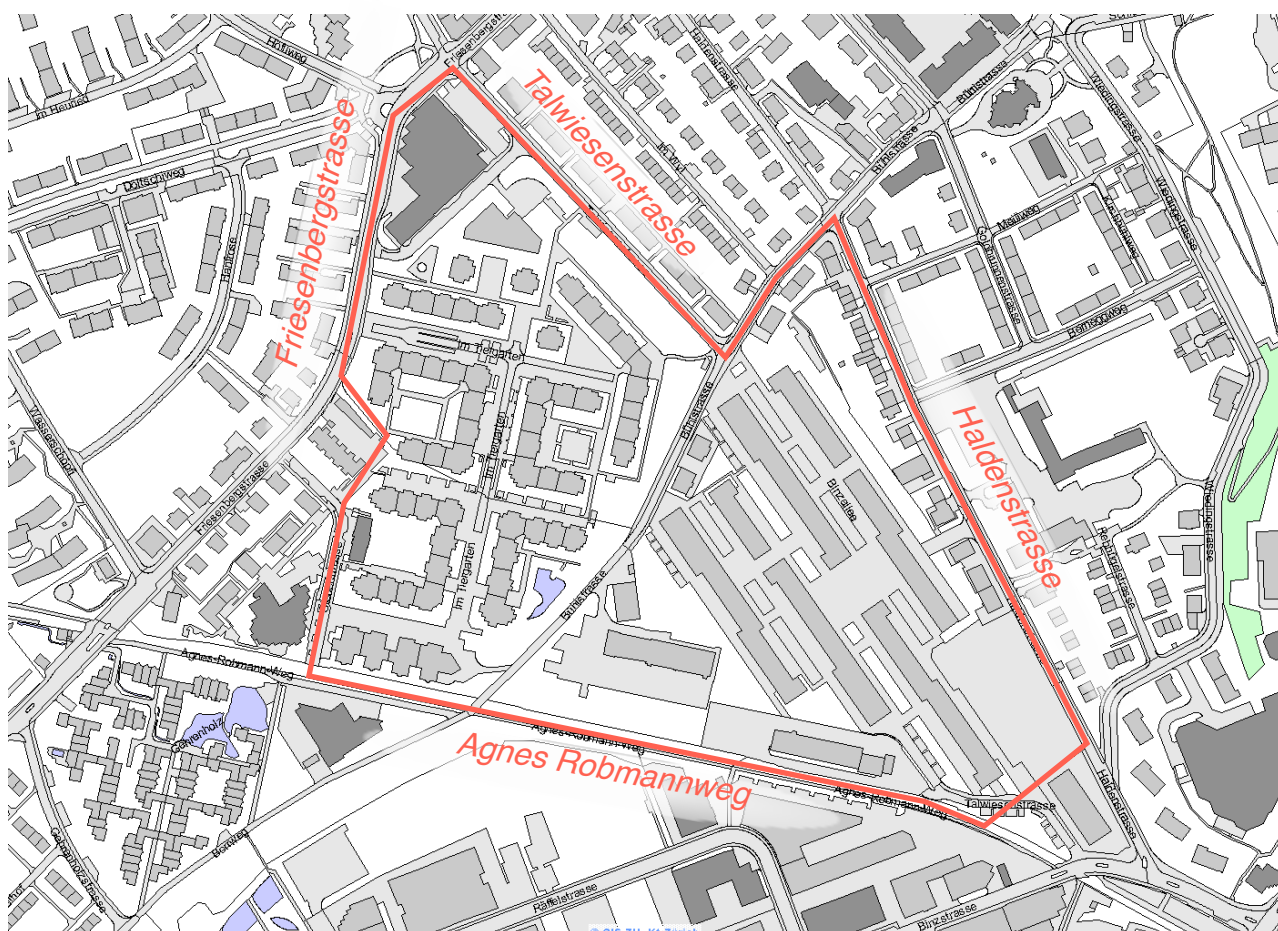


Figure 1: Périmètre du quartier choisi

En effet, cet ensemble de bâtiments présente des éléments aux caractéristiques suivantes: petit/grand; ancien/récent; résidentiel/industriel; simple/complexe. Il est délimité au sud par la rue *Agnes Robmannweg*, à l'ouest par la rue *Friesenbergstrasse*, au nord par la rue *Talwiesenstrasse* et à l'est par la rue *Haldenstrasse*.

## Données à disposition

Afin de modéliser le quartier délimité ci-dessus dans l'interface graphique de *CitySim* (GUI), la ville de Zürich a fourni les fichiers géométriques 3D *dwg* de la ville. Ces fichiers

sont des standards de l'industrie en conception et dessin assisté par ordinateur. Ils permettent justement de définir la géométrie d'objets quelconques. La ville de Zürich les a obtenus par photogrammétrie stéréoscopique, méthode permettant de reconstituer la géométrie des bâtiments à partir de deux points de vue différents.

Ces fichiers fournis se présentaient en deux versions, selon que la géométrie des toits était modélisée ou non. Mais la lecture par la GUI des fichiers modélisant la géométrie des toits n'était pas possible, car ceux-là étaient définis d'une manière bien particulière, si bien que la simulation s'en trouvait faussée. Ce sont les fichiers ne modélisant pas la géométrie des toits qui ont donc été choisis.

Ces fichiers se divisaient également en deux groupes, selon que ce soit la hauteur maximale ou la hauteur minimale du toit qui ait été choisie comme référence pour modéliser le bâtiment avec un toit plat. Ce sont les fichiers se basant sur la hauteur minimale qui ont été choisis.

Une simulation a alors été tentée avec ces fichiers. Néanmoins, bien qu'ils soient lisibles par la GUI de *CitySim*, la simulation ne débouchait sur aucun résultat. Cet échec est aussi dû au fait que les fichiers fournis étaient définis d'une manière bien particulière et complexe, de telle sorte que la simulation ne pouvait aboutir à une solution. C'est pourquoi il a fallu faire appel à un logiciel tiers afin de corriger ces fichiers de sorte que *CitySim* puisse effectuer une simulation sans problèmes.

## Outils

De nombreux logiciels de conception et de dessin assisté par ordinateur existent sur le marché. Citons par exemple *AutoCAD* de *Autodesk*, *Catia* de *Dassault Systèmes* ou encore *Sketchup Pro* de *Google*. Ces trois logiciels ont été testés afin de déterminer lequel pouvait répondre au mieux aux besoins de la présente situation.

Le premier, *AutoCAD*, est un logiciel très répandu, mais sa lourdeur et sa complexité le désavantageait dans cette situation. *Catia* est également un très bon logiciel, mais s'applique davantage au dessin de volume plein que de surface fermée. Le dernier représente par contre une alternative idéale en étant d'une ergonomie simple, mais efficace. C'est donc *Google Sketchup Pro* qui a été utilisé afin de mener les corrections logicielles nécessaires à un bon fonctionnement du modèle avec la GUI de *CitySim*.

## Résultats

Le quartier à modéliser, compte tenu du temps restreint à disposition, a été divisé en trois secteurs selon, à priori, leur degré de difficulté de modélisation (figure 2). Le secteur A étant considéré comme le plus simple tandis que le secteur B le plus complexe. Le secteur C se situant à un degré intermédiaire.

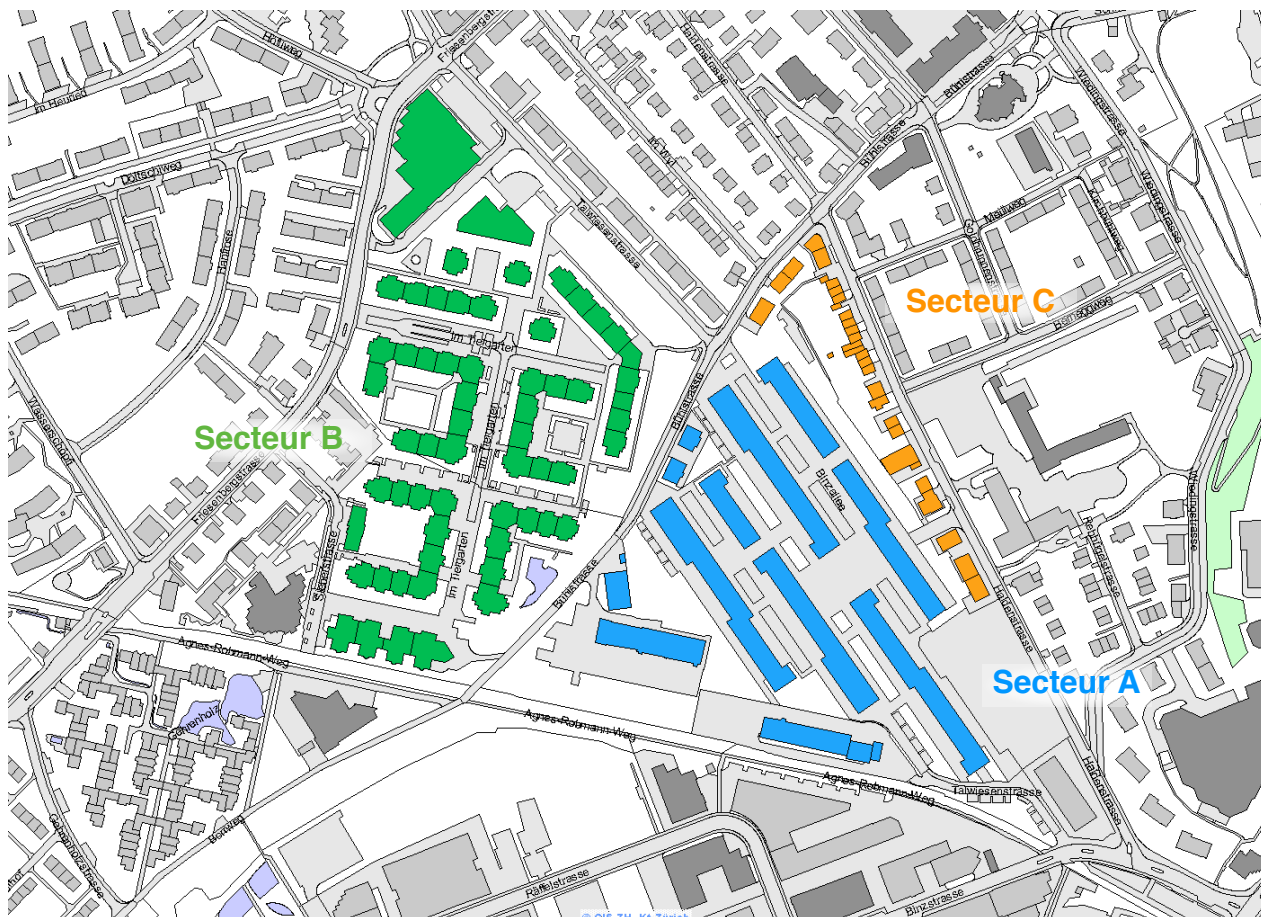


Figure 2: Secteurs du quartier choisi

L'exercice est rendu délicat du fait qu'il est difficile de déterminer quelles sont les caractéristiques géométriques qui rendent la simulation dans *CitySim* impossible. Certaines corrections à certains endroits bien précis peuvent se révéler bénéfiques alors qu'ailleurs elles sont problématiques. Les corrections se sont donc faites par tâtonnements, à partir de zéro. Un bâtiment est ajouté à chaque étape, en le modifiant de telle sorte que la simulation *CitySim* se déroule correctement. Si celle-ci se déroule mal, le bâtiment est modifié d'une autre manière, et l'expérience est à nouveau tentée.

Finalement, seul le secteur A a pu être modélisé, au prix de quelques modifications géométriques (figure 3). Les treize bâtiments constituant ce secteur sont ensuite numérotés afin de faciliter leur dénomination par la suite.

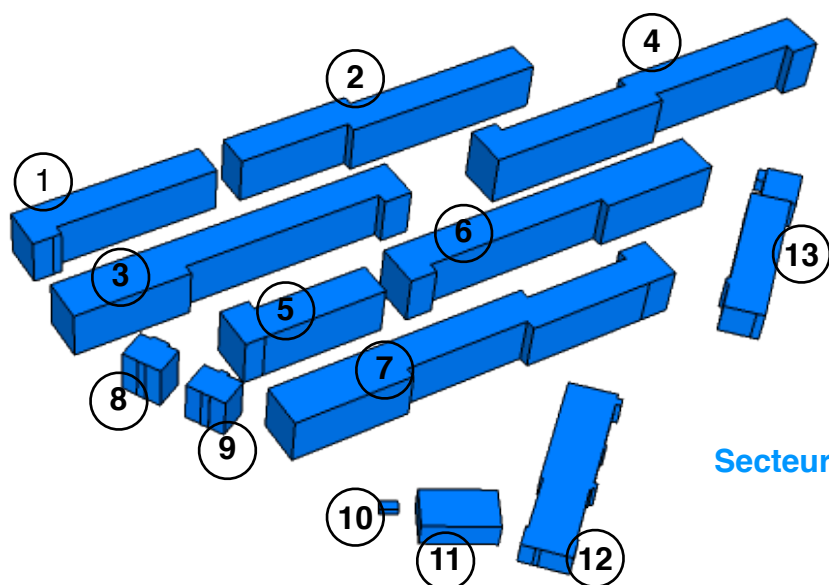


Figure 3: Secteur A modélisé

La modification la plus remarquable du point de vue de la géométrie extérieure concerne le bâtiment 13. C'est une partie entière du bâtiment qui a dû être retirée (figure 4).

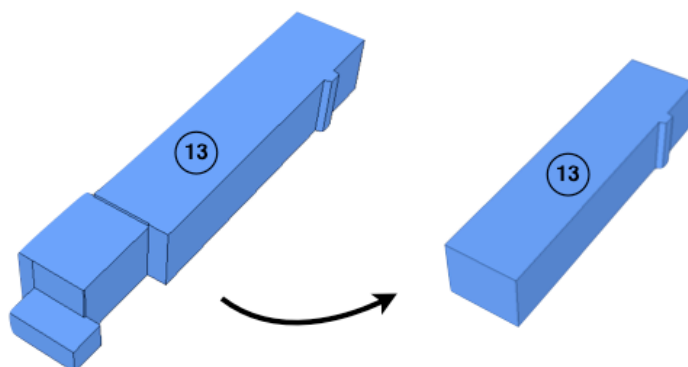


Figure 4: Correction du bâtiment 13

Cette modification rend bien entendu la modélisation du cas réel moins fidèle, mais l'échelle relative à l'ensemble du quartier de la retouche permet de relativiser les conséquences. De plus, dans la mesure où cette géométrie sera utilisée pour tous les scénarios, la comparaison entre ces derniers demeurera correcte.

Le secteur A ne représente certes que treize bâtiments. Néanmoins, une certaine mixité est observable comme: petit/grand; récent/ancien; industriel/résidentiel. Ce secteur A demeure donc suffisamment mixte pour ne pas déboucher sur des résultats trop communs.

Le tableau de la page suivante (tableau 1) liste les caractéristiques géométriques pour chacun des bâtiments. Les cases vertes représentent les données récupérées des fichiers *dwg* fournis par la ville de Zürich. Les cases bleues proviennent d'observations faites à l'aide de *Google Street View* et les cases blanches sont le résultat d'hypothèses.

Tableau 1 - Propriétés géométriques

Numéro du bâtiment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Volume [m³]	20606	34167	40867	44599	15715	38966	44365	3222	2915	64	3744	10982	10931
Aire murs [m²]	328	341	416	530	339	417	474	217	200	10	143	647	729
	1422	2423	2624	3032	1093	2490	2850	265	246	17	234	191	189
	329	341	416	614	339	417	476	217	200	10	143	646	976
	1443	2423	2624	3032	1069	2491	2849	265	246	17	234	194	190
Toit	1046	1798	2042	3076	1147	1948	3226	229	234	24	418	1725	1177
Sol	1046	1798	2042	3076	1147	1948	3226	229.2	233.6	23.87	418.2	1725	1177
Nombre niveau (sans sous-sol)	5	6	5	5	6	6	5	4	4	1	1	2	2
Surface habitable [m²]	5231	10790	10212	15379	6882	11690	16128	916.7	934.4	23.87	418.2	3450	2353
Ratio Volume/ surface habitable [m]	3.94	3.17	4.00	2.90	2.28	3.33	2.75	3.52	3.12	2.69	8.95	3.18	4.65
Ratio Aire totale/ Surface habitable	1.07	0.846	1.00	0.869	0.75	0.831	0.812	1.55	1.45	4.29	3.81	1.49	1.89
Ville de Zürich													
Google StreetView													



## Paramètres physiques

L'étape suivant la modélisation consiste à implémenter des paramètres physiques aux bâtiments modélisés. Ces paramètres sont utilisés par *CitySim* pour la simulation et devront correspondre au mieux au cas réel, afin de définir le scénario de base. Ils sont distingués selon leur type: propriétés de surfaces ou propriétés de bâtiment.

Les données à disposition permettant de déterminer ces paramètres sont présentées avant d'énumérer pour les treize bâtiments modélisés chacun des paramètres choisis. Finalement, l'impact sur les besoins en chauffage de ces paramètres est mesuré dans la dernière section.

### Données à disposition

Différentes sources ont ou auraient permis de récolter les données concernant les paramètres physiques des bâtiments.

#### *Office fédéral de la statistique*

L'office fédéral de la statistique dispose d'un registre fédéral des bâtiments et des logements. Il s'agit d'un document où sont listés une grande partie des bâtiments de Suisse. Pour chacun d'entre eux, différentes caractéristiques sont données comme l'année de construction, de rénovation, le système de chauffage ou encore le nombre de niveaux.

À noter cependant que rénovation est ici entendu comme toute action permettant d'augmenter la valeur d'un bien immobilier. Il pourrait par exemple s'agir d'une nouvelle peinture extérieure, donnant un meilleur aspect à un bâtiment. L'interprétation de cette donnée est donc délicate.

De plus, ce registre ne donne que peu d'informations concernant les bâtiments modélisés. En outre, certaines informations semblent erronées ou pas encore mises à jour. À titre d'exemple, le bâtiment 10 qui se trouve être un garage pour un véhicule est, d'après le registre, une maison à un logement chauffé par un poêle à mazout!

#### *Ville de Zürich*

La ville de Zürich devait fournir différentes données pertinentes concernant le quartier modélisé, comme les données de consommation énergétique. Ces données auraient permis de calibrer le modèle de base afin de s'approcher au mieux de la réalité. Malheureusement, pour différentes raisons, ces données n'auront jamais pu être obtenues.

#### *Google Street View*

Cet outil web permet de visualiser l'aspect extérieur des bâtiments depuis, virtuellement, la rue. Il permet ainsi, par exemple, de mesurer la proportion de vitrages des différentes façades ou encore de confirmer les informations fournies du registre de l'OFS.

Cependant, tous les bâtiments n'étant pas visibles de cette manière, seules certaines informations pour certains bâtiments peuvent être ainsi obtenues.

### Résultats

Les données de l'OFS ont servi de base pour la paramétrisation du modèle. Dans la mesure du possible, ces données ont été confortées par les observations faites à l'aide de

*Google Street View.* Pour les informations manquantes, des hypothèses ou extrapolations ont alors dû être faites.

#### *Propriétés de surface*

La proportion de vitrages des différentes façades a été mesurée sur celles qui étaient visibles par *Google Street View*. Les valeurs mesurées de cette manière sont colorées en bleu. Une corrélation a été faite pour les façades de même orientation pour les bâtiments similaires 1 à 7, et 8 à 9. Les bâtiments 10 et 11 ne présentent pas de fenêtres.

Les taux de réflexion des ondes courtes des murs et des toits ont été estimés dans un premier temps sur la base du matériau ou de la couleur des façades, puis selon des bases de données attribuant aux matériaux des taux de réflexion. Ces bases de données - *Construction Technology Lab.*<sup>1</sup> et *Florida solar energy center*<sup>2</sup> - sont partiellement restituées en annexe. Les données obtenues de cette façon sont colorées respectivement en rouge et orange.

La valeur G des vitrages représente la proportion de lumière qui traverse les fenêtres. Elle est facilement modifiée en obstruant les fenêtres, par exemple en baissant les stores. Cette valeur a été fixée à 0.75 pour l'ensemble des bâtiments.

Le matériau des murs ou encore la valeur U du toit ont été estimés selon l'âge, à priori, des bâtiments.

La valeur U des vitrages a été supposée identique pour tous les bâtiments, dans la mesure où des rénovations auraient été entreprises pour les bâtiments les plus vieux. Il s'agit d'une valeur U correspondant à une fenêtre à double vitrage standard.

La valeur K du sol a été fixée à 0.05 W/m<sup>2</sup>K pour tous les bâtiments.

#### *Propriétés de bâtiment*

Le registre de l'OFS a permis de dégager l'année de construction pour trois bâtiments. Il s'agit pour le bâtiment 5, 9 et 10, de respectivement l'année 1998, 1945 et 1975. Des extrapolations ont été effectuées pour les bâtiments similaires 1 à 7, 8 et 9, et 10 à 13. À

une exception près cependant; le bâtiment 11 (figure 5) semble de facture assez récente et son année de construction est supposée à l'an 2000.

Les taux d'infiltration ont été fixés à 0.5 Vol/h pour les bâtiments récents 1 à 7 et à 0.7 Vol/h pour les bâtiments plus anciens 8 à 13. À noter encore que le bâtiment 11, un entrepôt, s'est aussi vu attribuer un taux de 0.7.



Figure 5: Vue sur le bâtiment 11

<sup>1</sup> [www.ctlgroupp.com/](http://www.ctlgroupp.com/)

<sup>2</sup> [www.fsec.ucf.edu](http://www.fsec.ucf.edu)

Comme le registre de l'OFS indique que des bâtiments proches du secteur modélisé sont chauffés au gaz, il est supposé qu'une conduite de gaz passe à proximité et que les bâtiments modélisés soient chauffés de la même manière. La puissance de ces chaudières à gaz est fixée à 10 MW. Cela évite les problèmes de sous-dimensionnement. Elles présentent toutes un rendement standard de 96%<sup>3</sup>.

La température à atteindre avant que le système de chauffage ne s'arrête est de 22°C. La température avant que le système de climatisation ne s'active a été fixée à 50°C afin de ne pas prendre en compte cet aspect.

Ces différents paramètres sont résumés dans les deux tableaux suivants (tableau 2 et 3).

---

<sup>3</sup> [www.hoval.fr](http://www.hoval.fr)

Tableau 2 - Propriété de bâtiment

Numéro de bâtiment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Année de construction	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998
Taux d'infiltration [Vol/h]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Tmin [K]	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Tmax [K]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Système de chauffage	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler	Boiler
	Puissance maximale [kW]	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000	10'000
	Efficacité de conversion	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Office fédéral de la statistique													

Tableau 3 - Propriété de surface

Numéro de bâtiment		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Réflexion des ondes courtes	Mur	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.661	0.45	0.45
	Toit	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.082	0.082	0.661	0.661	0.243	0.176
Proportion de vitrages	Mur N	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.13	0.13	0	0	0.05	0.44
	Mur E	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.13	0.13	0	0	0.4	0
	Mur S	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.13	0.13	0	0	0.05	0.44
	Mur W	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.13	0.13	0	0	0.4	0
	Toit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valeur G vitrages	Mur	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	-	-	0.75	0.75
	Toit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Valeur U vitrages [W/m²K]	Mur	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	-	2	2
	Toit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Matériaux [id]	Mur	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3
Valeur U [W/m²K]	Toit	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
Valeur K [W/m²K]	Sol	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Google StreetView	Construction Technology Lab.													
Florida solar energy center														

Une fois ces différents paramètres implantés avec *CitySim* sur le modèle géométrique, une simulation est menée afin d'évaluer les besoins en chauffage des différents bâtiments. Il s'agira du cas de base auquel seront comparés les résultats des scénarios du chapitre suivant.

Les résultats sont présentés dans le graphe suivant (figure 6). À noter que les besoins en chauffage sont rapportés à la surface habitable du bâtiment en question. À noter aussi que les résultats des bâtiments 10 et 11 ne sont pas à l'échelle.

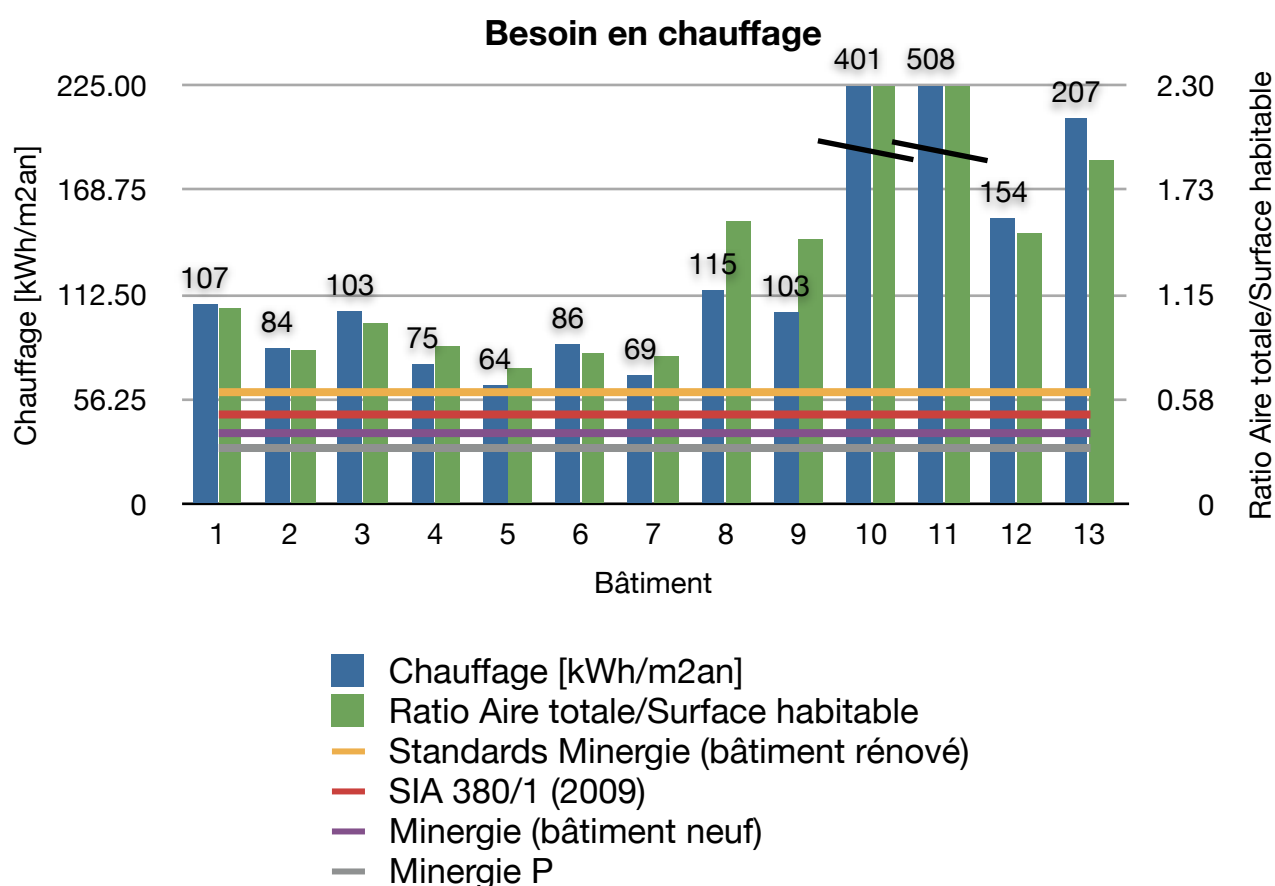


Figure 6: Besoins en chauffage du scénario de base

Ces résultats sont comparés à différents standards de la construction suisse. Ils sont également comparés au ratio de l'aire totale de l'enveloppe thermique du bâtiment sur sa surface habitable. Cet élément explique, entre autres, les variations qui sont observables entre des bâtiments aux propriétés similaires.

On remarque, évidemment, que les bâtiments dont l'enveloppe thermique est de mauvaise qualité ont un besoin accru en énergie de chauffage.

### Analyse de sensibilité

L'impact des différents paramètres physiques sur les besoins en chauffage est ensuite analysé. Bien entendu, les différents paramètres ne peuvent être comparés entre eux puisqu'ils ne font pas référence aux mêmes unités.

Ainsi pour chaque paramètre, une simulation *CitySim* est effectuée pour quelques valeurs comprises dans une certaine fourchette. Les besoins de chauffage sont alors relevés et

présentés dans les graphes en annexe. Ainsi, pour chaque paramètre, sa sensibilité a pu être mesurée, du moins pour les cas linéaires, et rassemblée dans le tableau suivant (tableau 4).

Tableau 4 - Sensibilité

Numéro de bâtiment	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Sensibilité	Valeur U toit [(kWh/m2an)/(W/m2K)]	20.87	16.08	20.64	13.72	11.85	17.14	14.63	19.72	20.04	98.50	105.83	39.34	39.59
	Taux d'infiltration [(kWh/m2an)/(Vol/h)]	128.80	103.28	131.97	94.53	75.44	109.73	90.00	115.70	102.56	88.83	316.23	111.38	154.48
	Valeur U mur [(kWh/m2an)/(W/m2K)]	35.99	27.68	31.14	25.13	21.11	26.03	22.22	64.79	57.11	72.35	58.18	15.07	21.55
	Valeur U vitrages [(kWh/m2an)/(W/m2K)]	22.17	17.12	20.1	15.15	13.5	16.72	13.57	13.26	12.02	0.0174	0.0190	5.55	27.65

## Scénarios

Différents scénarios sont établis afin d'en évaluer les impacts par rapport au scénario de base. Deux scénarios ont ainsi été posés: le premier consiste à améliorer l'isolation de certains bâtiments et le deuxième consiste à remplacer les chaudières à gaz par des pompes à chaleur sol.

Il est important de noter ici que ces scénarios ne constituent en rien une optimisation. Il s'agit de mesures arbitraires posées afin d'évaluer les effets sur le modèle pour mieux le comprendre.

Les deux scénarios seront analysés sous l'angle de l'énergie utile, l'énergie primaire ou encore les émissions de CO<sub>2</sub>. Quelques aspects financiers seront aussi donnés, mais à titre indicatif. En effet, les hypothèses à poser dans ce cas sont toujours discutables et peuvent donc mener à des résultats moins robustes.

### Amélioration de l'isolation

#### *Paramètres*

Ce scénario suppose l'ajout d'une couche d'isolation supplémentaire à l'extérieur des murs de l'ensemble des bâtiments, à l'exception des bâtiments 8 et 9. Ces deux bâtiments sont exclus puisqu'il est supposé que, étant relativement anciens, une rénovation a permis d'améliorer considérablement l'isolation des murs, grâce notamment à leur épaisseur supérieure à la moyenne. L'isolation se fait à l'aide de panneaux de liège expansé d'une épaisseur de 14 cm, dont les caractéristiques sont données en annexe.

De plus, l'isolation du toit des bâtiments 10 à 13 est renforcée à l'aide de laine de verre pour atteindre une valeur U de 0.15 W/m<sup>2</sup>K pour les bâtiments 10 et 11 et 0.25 W/m<sup>2</sup>K pour les bâtiments 12 et 13. Ceci correspond respectivement à une couche d'isolation de 18 cm et 8 cm. Les caractéristiques de ce matériau sont également données en annexe.

Les bâtiments 8 et 9 ne subissent donc aucun changement dans ce scénario par rapport au cas de base.

#### *Résultats*

Comme l'isolation est meilleure, les pertes énergétiques sont moindres et les besoins en chauffage sont donc réduits. Le graphe suivant illustre l'économie réalisée en besoin de chauffage, soit en énergie utile (figure 7). Le chiffre indiqué représente l'économie réalisée en kWh/m<sup>2</sup>an par rapport au scénario de base.

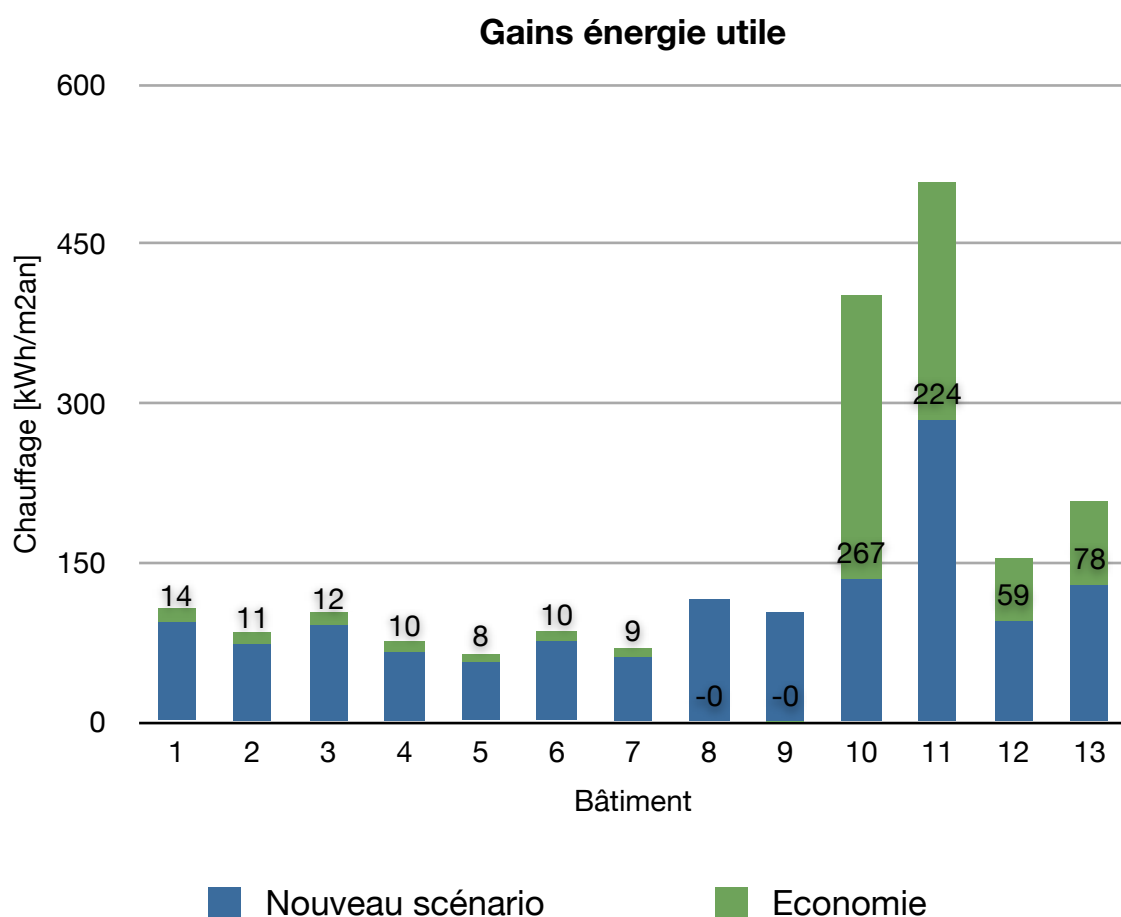


Figure 7: Gain d'énergie utile du scénario d'amélioration de l'isolation

Il est utile de distinguer ici énergie finale et énergie utile. L'énergie utile correspond à l'énergie finale diminuée du fait du rendement des installations. Dans ce cas, les besoins en chauffage tiennent compte du rendement des chaudières (0.96) et représentent donc l'énergie utile.

Il est clair, à la lumière de ces résultats, que les mesures prises pour les quatre derniers bâtiments conduisent à une économie en chauffage supérieure aux autres bâtiments. En effet, sans compter que les quatre derniers bâtiments voient l'isolation de leurs toits aussi améliorée, il est plus facile de faire des économies sur des bâtiments mal isolés que des bâtiments qui le sont bien.

Ces économies d'énergie conduisent bien évidemment à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Comme dans les deux scénarios les bâtiments sont chauffés par des chaudières à gaz au rendement identiques, les réductions d'émissions CO<sub>2</sub> sont simplement proportionnelles aux gains d'énergie utile (figure 8).

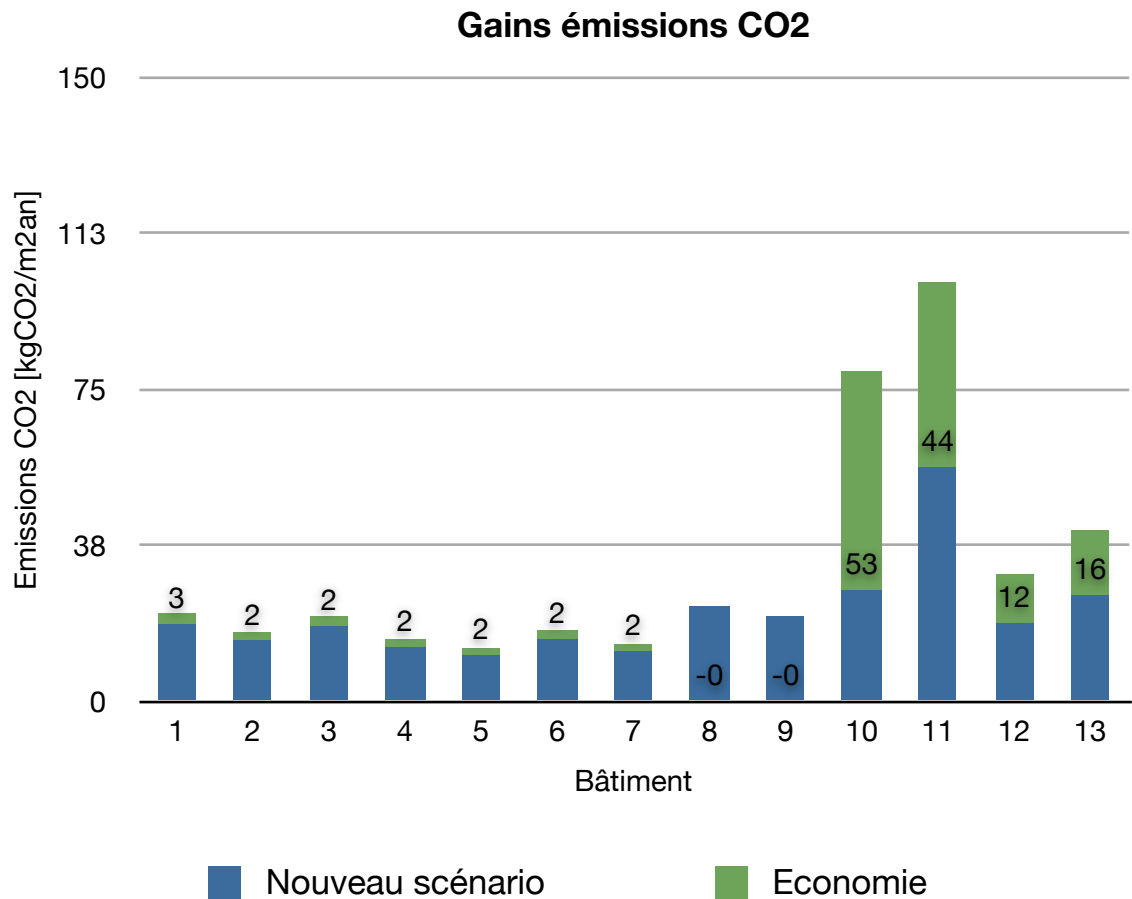


Figure 8: Gain d'émission de CO<sub>2</sub> du scénario d'amélioration de l'isolation

Le principe est le même pour l'énergie primaire (figure 9). Celle-ci est supérieure et proportionnelle à l'énergie finale. Le graphe suivant l'illustre tandis que les facteurs utilisés afin de déterminer l'énergie primaire sont donnés en annexe.

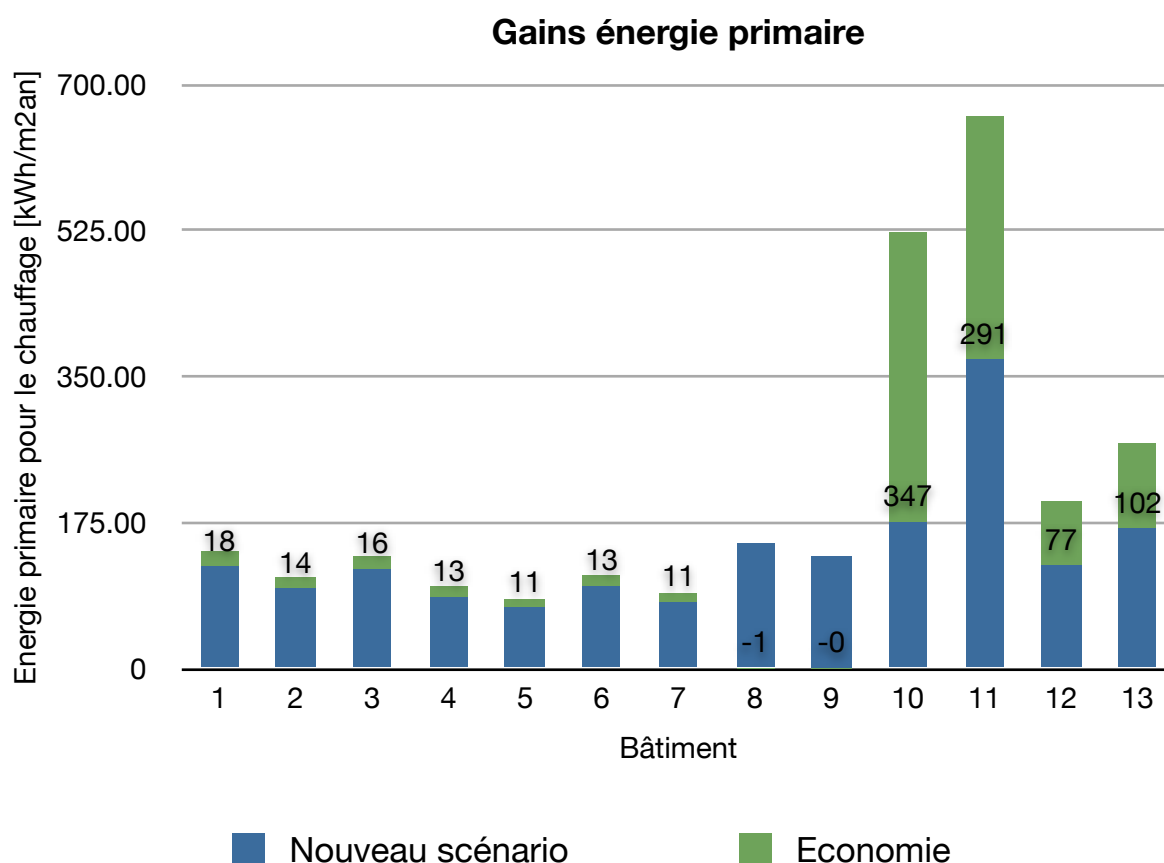


Figure 9: Gain d'énergie primaire du scénario d'amélioration de l'isolation

Il peut être utile de rappeler ici que l'énergie grise qu'implique ce scénario d'amélioration de l'isolation n'a pas été prise en compte. Elle est difficile à mesurer du fait que, outre l'énergie grise du matériau lui-même, l'infrastructure pour la mise en place de l'isolation implique aussi de l'énergie grise. Et ce deuxième point est très difficile à quantifier. Il est donc mis de côté ici afin de rendre les résultats plus robustes.

Économiquement, ce type d'investissement ne serait pas rentable, même en posant des hypothèses très favorables. À titre d'exemple, le bâtiment 11 est choisi, où les économies annuelles de chauffage sont conséquentes. 224 kWh sont ainsi épargnés chaque année. Même à un prix de l'énergie prohibitif de 1CHF/kWh (!) augmentant d'1% chaque année, et à un taux d'actualisation bas de 3%, les coûts de rénovation ne devraient pas dépasser les 8500 CHF<sup>4</sup> pour que l'investissement soit rentable! Ce raisonnement est illustré par la relation suivante:

<sup>4</sup> pour une durée de vie des investissements de 70 ans

condition de rentabilité:

$$coûts_{investissements} < \sum_{an=1}^{horizon} gains_{énergie} \cdot coûts_{énergie} \cdot (1 + taux_{renchérissement})^{an} \cdot (1 + taux_{actualisation})^{-an}$$

$coûts_{investissements}$  = coûts de la rénovation [CHF]

$gains_{énergie}$  = économie d'énergie [kWh/an]

$coûts_{énergie}$  = coût de l'énergie [CHF/kWh]

$taux_{renchérissement}$  = taux de renchérissement annuel de l'énergie [-]

$taux_{actualisation}$  = taux d'actualisation [-]

horizon = durée de vie des investissements [#années]

## Changement du système de chauffage

### Paramètres

Ce scénario propose de remplacer les chaudières à gaz des treize bâtiments par treize pompes à chaleur sol. La puissance de cette pompe a été fixée à 10 MW, pour éviter les problèmes de sous-dimensionnement, et présente un rendement technique de 0.35. Ce système de chauffage puise la chaleur à une profondeur de 5 à 10 m dans le sol ayant une diffusivité de 0.07 m<sup>2</sup>/jour. La température cible est posée à 35°C. Le tableau suivant résume ces données (tableau 5).

**Tableau 5 - Données système de chauffage**

Système de chauffage	Nom	Pompe à chaleur
	<b>Puissance maximale [kW]</b>	10'000
	<b>Rendement technique</b>	0.35
	<b>Température cible [°C]</b>	35
	<b>Diffusivité du sol [m<sup>2</sup>/jour]</b>	0.07
	<b>Profondeur 1 [m]</b>	5
	<b>Profondeur 2 [m]</b>	10

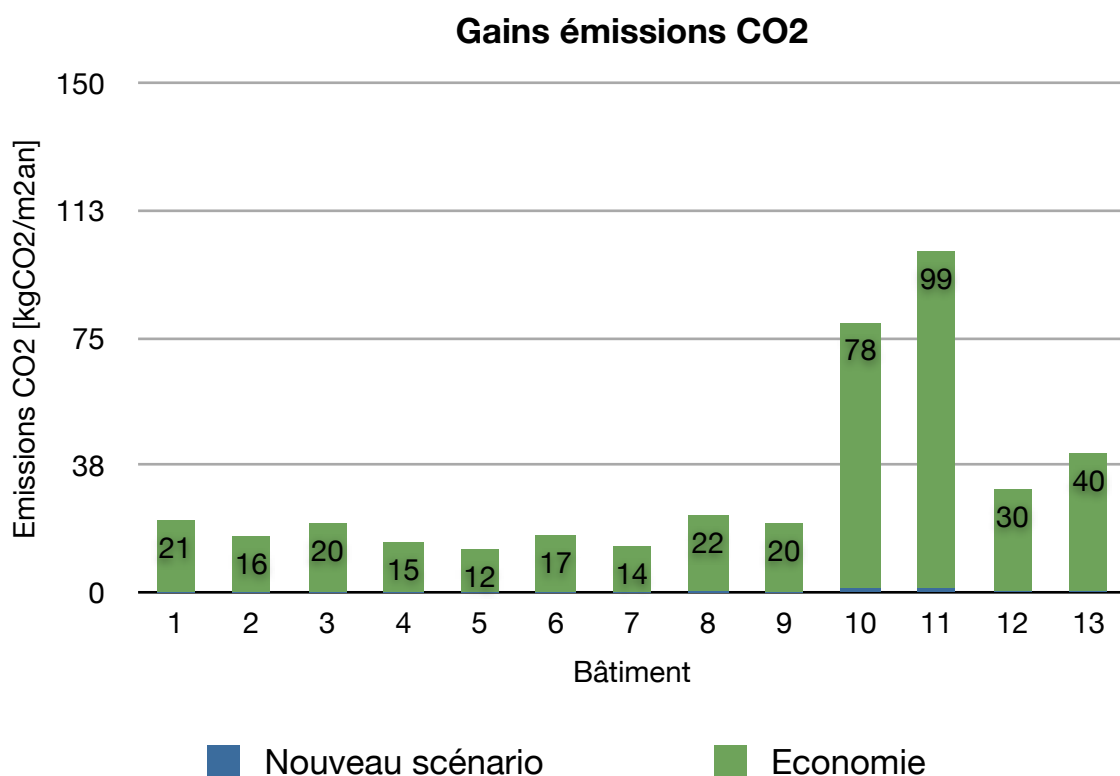
Le fluide calorifique utilisé est de l'eau, avec les caractéristiques du tableau suivant (tableau 6).

Tableau 6 - Données source de chaleur

Source de chaleur	Volume [m <sup>3</sup> ]	0.01
	Conductance totale [W/K]	20
	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	1000
	Cp [J/kgK]	4180
	T min [°C]	22
	T max [°C]	35

### Résultats

Le changement de système de chauffage n'engendre pas de diminution des besoins en chauffage. Par contre, les gains se situent au niveau de la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> et d'énergie primaire. Les deux graphes suivants l'illustrent (figure 10 et 11).

Figure 10: Gain d'émission de CO<sub>2</sub> du scénario système de chauffage

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont presque intégralement supprimées. Ce résultat est dû à deux facteurs. Le premier est dû au fait que la pompe à chaleur nécessite moins d'énergie que la chaudière pour fournir la même quantité d'énergie calorifique. La pompe à chaleur nécessite uniquement de l'électricité afin de faire fonctionner ses pompes. On ne parle donc pas ici de qualité d'énergie, ou d'exergie. Deuxièmement, les émissions de CO<sub>2</sub> relative à l'énergie électrique suisse sont considérablement moindres que celles de l'énergie gaz. Cela explique les gains observés dans le graphe ci-dessus.

Mais il est important de remarquer ici que le réseau électrique suisse n'est pas fermé aux réseaux des pays voisins. La Suisse exporte et importe de l'électricité avec ses voisins, de telle sorte que le courant consommé en Suisse n'est pas exclusivement produit à l'intérieur des frontières. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes sont alors fonction de la quote-part de l'électricité étrangère par rapport à l'électricité suisse, qui elle, d'origine essentiellement hydraulique et nucléaire, demeure comparativement très propre.

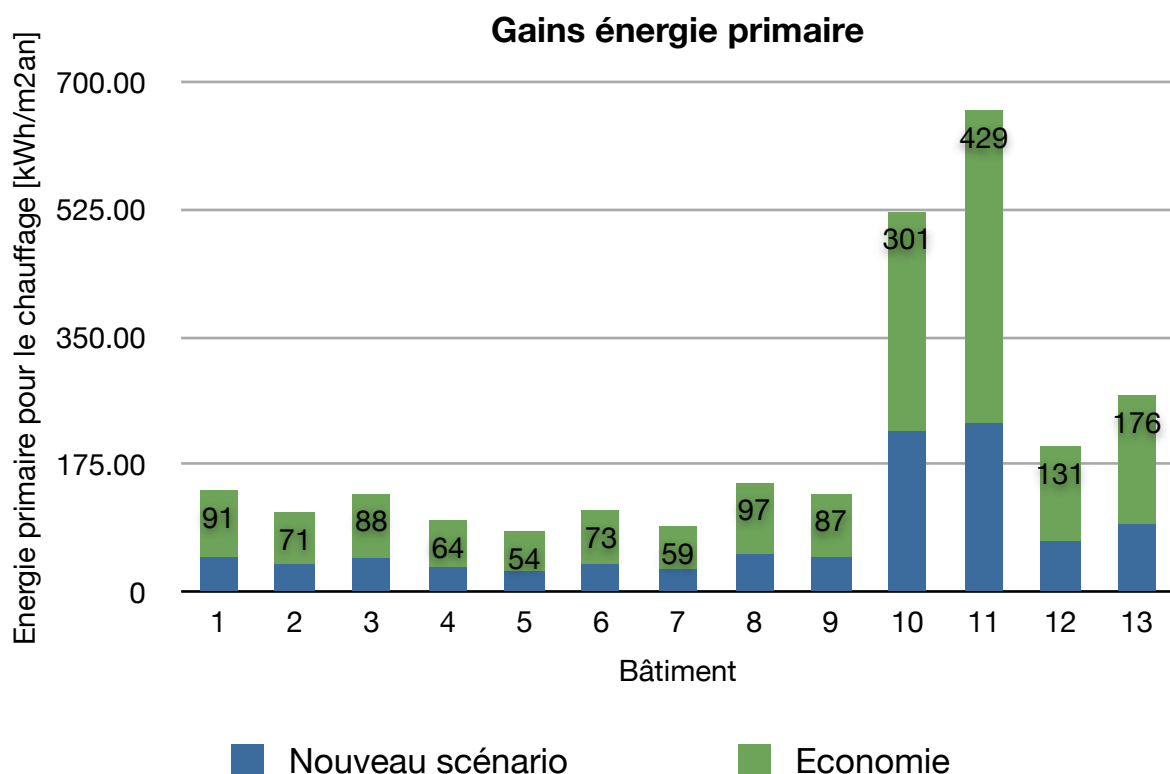


Figure 11: Gain d'énergie primaire du scénario système de chauffage

L'idée est semblable pour les gains en énergie primaire. L'énergie électrique nécessaire aux pompes à chaleur pour couvrir les besoins en chauffage est inférieure à l'énergie finale du combustible gaz pour couvrir les mêmes besoins. Néanmoins, le rapport énergie primaire est favorable au gaz et désavantage l'énergie électrique<sup>5</sup>. Mais globalement le premier facteur l'emporte et le gain en énergie primaire pour ce scénario demeure considérable.

Ce changement de système de chauffage pourrait se révéler rentable si les coûts de l'énergie électrique de la pompe à chaleur sont inférieurs à ceux du combustible gaz brûlés dans la chaudière. Mais l'évolution des coûts de ces énergies est très difficile à évaluer sur le long comme le court terme. Les scénarios d'investissement sont dès lors très discutables.

<sup>5</sup> Voir annexe, propriétés générales



## Conclusion

Ce projet aura permis de mieux cerner les aspects énergétiques d'un quartier de Zürich. Des résultats précis concernant les besoins en chauffage ou encore les économies possibles à l'aide de certaines mesures sont clairement mis en évidence, malgré l'incertitude liée aux différentes hypothèses posées.

Le scénario de base est le fruit de la récolte d'un maximum d'informations provenant de différentes sources. Le registre fédéral des bâtiments et des logements aura servi de base solide sur laquelle étayer différentes hypothèses permettant d'attribuer l'ensemble des paramètres physiques nécessaires à la simulation *CitySim*.

Les différents scénarios proposés par la suite permettent d'appréhender les effets qu'auront un ensemble de mesures sur les besoins énergétiques du quartier. Les gains obtenus tant d'un point de vue «énergie primaire» ou «émissions de CO<sub>2</sub>» sont facilement mesurés. Bien sûr, ces différents scénarios ne représentent pas des solutions rentables économiquement. Et cela même en posant des hypothèses extrêmement favorables comme vues plus haut. Ils pourraient par contre être le fruit de mesures d'assainissement soutenues par l'État, en vue de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par exemple. *CitySim* se révèle alors être un outil très utile.

À noter encore, comme déjà dit plus haut, que ces scénarios ne représentent pas une optimisation de paramètres pour atteindre le minimum des besoins énergétiques, sous certaines contraintes. Des algorithmes le permettent déjà, mais représentent un travail relativement lourd. *CitySim* permet par contre d'évaluer et cibler plus facilement les mesures ayant l'impact recherché.



# Annexes

## Propriétés générales

Les facteurs utilisés afin de déterminer les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation d'énergie primaire sont donnés dans le tableau suivant.

Émission CO <sub>2</sub> gaz [gCO <sub>2</sub> /kWh] <sup>1)</sup>	198
Émission CO <sub>2</sub> électricité suisse [gCO <sub>2</sub> /kWh] <sup>2)</sup>	12
Énergie primaire électricité suisse [kWhprim/kWhfinal] <sup>3)</sup>	2
Énergie primaire gaz [kWhprim/kWhfinal] <sup>3)</sup>	1.25
1) OFEN	
2) Eurelectric	
3) Cours Analyse cycle de vie, Jérôme Payet, EPFL 2009-2010	

## Réflexion des ondes courtes

Les deux bases de données utilisées pour estimer le taux de réflexion des ondes courtes sont données ci-dessous. Pour chaque bâtiment, les matériaux choisis pour les toits et les murs sont également donnés.

*Florida solar energy center*

Matériaux	Taux de réflexion
Asphalt shingle	0.082
Metal - Bone White	0.661
Metal - Patina Green	0.243
Red concrete tile	0.176

*Construction Technology Lab.*

Matériaux	Taux de réflexion
New concrete	0.4 à 0.5
Aged concrete	0.1

*Matériaux choisis*

Bâtiment	Toit	Mur
1 à 7	Age concrete	New concrete
8 et 9	Asphalt shingle	New concrete
10	Metal - Bone White	New concrete
11	Metal - Bone White	Metal - Bone White
12	Metal - Patina Green	New concrete
13	Red concrete tile	New concrete

## Propriétés matériaux

Le tableau suivant liste les propriétés concernant les matériaux d'isolation utilisés dans le scénario d'amélioration de l'isolation. Les valeurs colorées en vert proviennent de l'entreprise *eco-logis*, qui revend des matériaux d'isolation. Les données concernant la laine de verre sont des valeurs standards.

Type	Liège	Laine de verre
Conductivité [W/mK]	0.037 <sup>1)</sup>	0.035 <sup>3)</sup>
Cp [J/kgK]	1'670 <sup>1)</sup>	
Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	120 <sup>2)</sup>	60 <sup>3)</sup>
<sup>1)</sup> www.eco-logis.com		
<sup>2)</sup> www.domus-materiaux.fr		
<sup>3)</sup> Cours énergétique du bâtiment, Morel & Gnansounou, EPFL 2009		

## Composition des murs

La composition des trois types de murs du scénario de base est décrite dans le tableau suivant.

ID 1 - Couche	Épaisseur [m]	Conductivité [W/m <sup>2</sup> K]
1 (extérieur)	0.02	0.99
2	0.22	1
3	0.06	0.042
4	0.06	0.8
5 (intérieur)	0.01	0.43
Valeur U = 0.57		

ID 2 - Couche	Épaisseur [m]	Conductivité [W/m <sup>2</sup> K]
1 (extérieur)	0.01	0.43
2	0.1	0.042
3	0.4	1
4 (intérieur)	0.02	0.99
Valeur U = 0.35		

ID 3 - Couche	Épaisseur [m]	Conductivité [W/m <sup>2</sup> K]
1	0.4	1.3
Valeur U = 3.25		

# Graphes de sensibilité

