Scénarios futurs pour des bâtiments basse consommation dans les Alpes suisses : consommation et production énergétiques

Ing. L. DACOS
Dr J. KAEMPF
GRAMME – Liège

L'objet de cet article est de simuler énergétiquement les bâtiments de l'éco-quartier REKA situé à Blatten Belalp, de calibrer le modèle créé avec les données réelles collectées et d'imaginer des scénarios de rénovation en vue de réduire les besoins de chauffage. Ces scénarios permettront de trouver des pistes d'amélioration énergétique et serviront au développement d'un outil d'optimisation des systèmes énergétiques.

Une vidéo explicative, montrant l'utilisation de CitySim ainsi que le site étudié est disponible au lien suivant : https://youtu.be/0Pp9XxuQHPg (consulté en mars 2018).

Mots-clefs : simulation énergétique bâtiments, simulation thermique dynamique, CitySim, modélisation thermique 3D, piste d'amélioration énergétique.

The purpose of this article is to simulate a building energy model of the REKA Blatten eco-district, to calibrate this model with real collected data and to create renovation scenarios in order to reduce the heating needs. These scenarios will help to identify ways of energy improvement and will be used to develop a tool optimizing energy systems.

An explanatory video, showing the use of CitySim and the studied site is available at the following link: https://youtu.be/0Pp9XxuQHPg (accessed March 2018).

Keywords: buildings energy simulation, thermal dynamical simulation, urban energy simulation software, CitySim, thermal 3D model, future energy scenarios.

1. Introduction

Le projet OSCARS (Optimized energy network based Solutions CompAred to Retrofitting Scenarios) est un projet de l'OFEN (Office fédéral de l'énergie suisse). Il regroupe trois entreprises : KAEMCO, le CREM (Centre de Recherches Energétiques et Municipales de Martigny) ainsi qu'ELIMES.

Les ingénieurs d'ELIMES, spécialisés dans les réseaux de chauffage à distance, sont à la base de ce projet puisqu'ils constataient qu'entre leurs simulations des besoins énergétiques et la réalité, il y avait une marge d'erreur trop importante. D'autre part, ELIMES se sert de son expérience pour déterminer une installation, cependant ses ingénieurs n'excluent pas qu'en fonctionnant de façon manuelle (sans outil d'optimisation), certaines solutions, plus performantes énergétiquement et économiquement aient été omises.

Le CREM développe un outil d'optimisation de systèmes énergétiques et est à la recherche d'un quartier réel pour le mettre en application. Cet outil permettra à ELIMES d'atteindre ses objectifs. Pour son fonctionnement, cet outil a besoin d'un grand nombre de scénarios de simulation énergétique, faisant varier l'isolation, le type de vitrage, etc.

L'entreprise KAEMCO développe le logiciel de simulation énergétique à l'échelle urbaine CitySim. CitySim est un logiciel de simulation énergétique dynamique qui a pour avantage de prendre en compte les interactions entre bâtiments (ombres, réflexions) et d'utiliser des données climatiques réelles. KAEMCO participe doublement à la dynamique du projet puisque d'une part, la simulation réalisée par CitySim sera plus proche de la réalité que celles utilisées par ELIMES. D'autre part, grâce à la simulation, des scénarios de rénovation énergétique vont être réalisés et fournis au CREM. Ceux-ci seront nécessaires pour le fonctionnement de son outil d'optimisation.

1.1. Site étudié

Il s'agit du village de vacances REKA situé à Blatten Belalp dans les Alpes suisses. C'est un village qui fonctionne avec 80% d'énergies renouvelables et pour lequel ELIMES a collecté des mesures.

Il est composé de 9 bâtiments (7 habitations, 1 piscine et 1 restaurant). L'entreprise REKA possède beaucoup de villages de vacances en Suisse, mais le village de Blatten est le premier à s'intéresser à l'écologie. Ce sera donc intéressant

pour eux d'avoir un feedback sur des pistes d'améliorations, en vue d'éventuellement construire d'autres villages.

Pour l'étude de ce site, nous avons en notre possession :

- les plans d'architecture,
- le justificatif thermique SIA [1], qui est un document obligatoire en Suisse avant toutes rénovations et nouvelles constructions, il renseigne de manière générale sur les performances énergétiques d'un bâtiment (l'équivalent du PEB en Belgique),
- des mesures réelles réalisées par l'entreprise ELIMES, telles que les besoins de chauffage de chaque bâtiment.

2. Modèle 3D

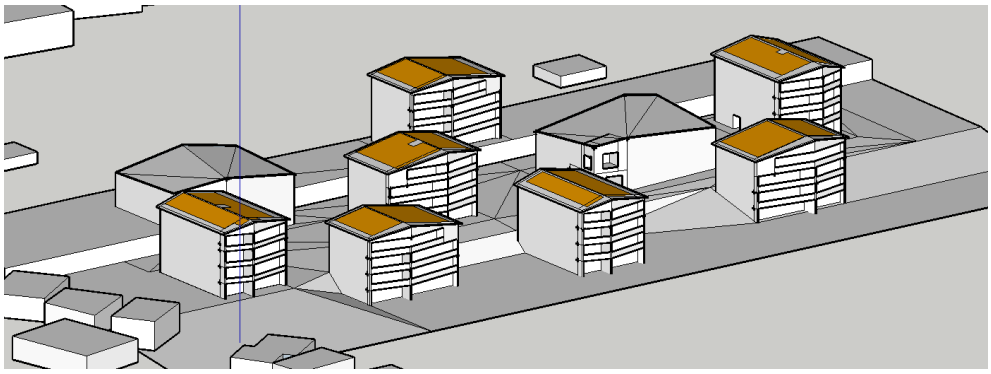

Figure 1: Modèle 3D SketchUp - "plan_final_orienté.skp"

Le modèle 3D est réalisé à l'aide du logiciel SketchUp [2]. Il s'agit d'un modèle simplifié, adapté à l'utilisation de CitySim. Sur la figure 1 sont représentés :

- uniquement l'enveloppe extérieure des bâtiments,
- les éléments extérieurs créant des ombrages tels que les balcons, les dépassants de toit, les autres habitations. La présence d'ombres sur le bâtiment a un impact thermique,
- les dénivelés du sol ainsi que la position spatiale de la scène (altitude, orientation). La représentation du sol permet par la suite de définir la nature du sol. Par exemple : un sol en herbe verte ou une dalle en béton n'ont pas la même réflexion. L'orientation et l'altitude ont un fort impact sur l'intensité des rayons du soleil.

3. Importation du modèle 3D dans CitySim

Il est possible, grâce à un script Ruby, de convertir le modèle SketchUp en un document « .dxf » qui est alors ouvrable avec CitySim. Après importation, nous pourrons affecter à chaque élément surfacique du modèle 3D des paramètres tels que :

- le type de matériaux et isolants,
- le pourcentage de vitrage par élément surfacique,
- la réflectance,
- le pourcentage de panneaux solaires par élément surfacique.

Nous entrons également des paramètres propres à chaque bâtiment :

- l'infiltration d'air au travers de l'enveloppe,
- les températures de consigne du chauffage,
- le volume chauffé,
- le profil d'occupation et le nombre d'occupants,
- les ponts thermiques,
- les données climatiques horaires d'une station météorologique proche du site (commune pour chaque bâtiment dans notre cas).

4. Calibration avec le justificatif thermique

Le but de cette calibration est de valider le comportement global du modèle créé. Ceci est réalisable puisque le justificatif thermique propose une valeur de demande en chaud mensuelle. Toutefois, afin de comparer des choses équivalentes, toutes les données utilisées dans la simulation CitySim du modèle proviennent du justificatif thermique. Nous allons par conséquent utiliser le/les même(s) :

- données météorologiques,
- taux d'infiltration,
- matériaux,
- ponts thermiques,
- températures de consignes du chauffage,
- données d'occupation,
- consommations électriques des appareils,
- surfaces de référence énergétique.

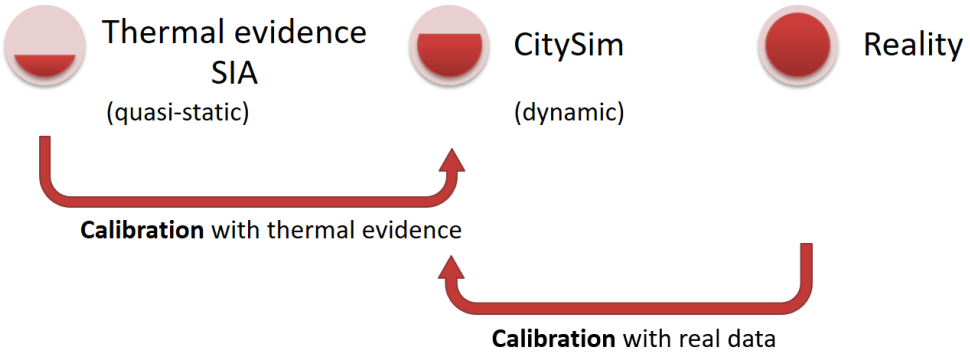

Figure 2: Calibration du modèle CitySim

5. Calibration avec les données réelles

Une fois les éventuelles erreurs de modélisation détectées et donc le comportement global du modèle validé, la seconde calibration se fait par rapport aux données réelles collectées sur site.

Pour ce faire, en repartant du même modèle (utilisant les hypothèses du justificatif thermique), nous allons raffiner ce modèle en utilisant cette fois des données réelles explicitées ci-après. Cette calibration a pour but de se rapprocher le plus possible de la réalité.

5.1. Raffinement à partir des plans

En partant des plans d'architecte, il est possible de déterminer le volume chauffé réel des bâtiments. Jusqu'à présent, le volume chauffé était égal au volume total de l'enveloppe. Ce choix entraîne une nette augmentation des besoins. Pour calculer le volume réel, on soustrait au volume total les volumes non-chauffés tels que les volumes de mur et de cage d'escalier.

Grâce aux plans d'architecte ainsi qu'aux fiches techniques, on peut également calculer la fraction des vitres et portes qui sont ouvrables. Celle-ci a un impact sur le renouvellement de l'air à l'intérieur des bâtiments. En effet, dans CitySim, il est défini qu'une fois la température de consigne dépassée, les éléments ouvrables (fenêtres, oscillo-battants, etc.) sont en position ouverte.

5.2. Données de réservation

Pour rappel, le quartier étudié est un village de vacances en activité. Nous allons donc nous servir des données de réservation pour connaître le nombre de personnes présentes en moyenne. Cela permet d'estimer les gains internes liés à la présence de ces personnes.

Dans CitySim, le seul moyen d'introduire des gains internes - qu'ils soient liés aux occupants ou aux appareils électriques - est de fonctionner avec des profils d'occupation et un nombre maximum de personnes.

Pour les occupants : nous prenons les profils d'occupation définis par la norme SIA [1]. Dans le cas de la figure 3, il s'agit d'un profil de type habitation. Nous multiplions ce profil (en pourcents) par le nombre moyen d'habitants présents par mois. Le profil obtenu est, par conséquent, différent chaque mois de l'année.

En ce qui concerne les appareils électriques, leur consommation électrique est convertie en équivalents-occupant. Dans ce cas-ci, selon le document SIA, l'apport de chaleur interne dus aux appareils électriques est de 70 [MJ/m²/an], ce qui nous donne :

$$70\left[\frac{\frac{MJ}{m^2}}{an}\right] * A_E * \left(\frac{1000}{3{,}6}\right) * \frac{1}{24*365} = 1769\ [Wh] \cong 20\ pers.emettant\ 90\ [Wh]$$

A_E étant la surface de référence énergétique.

Afin d'obtenir le profil d'occupation final, nous allons additionner ces deux courbes.

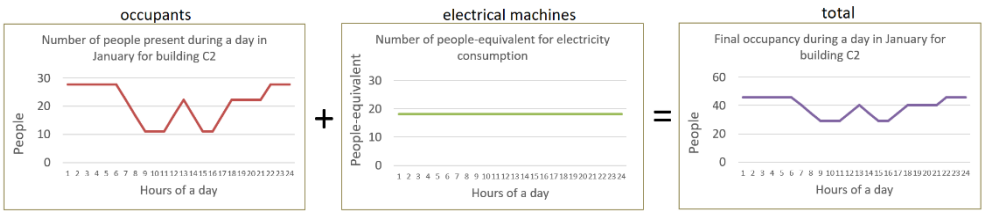

Figure 3: Profil d'occupation final

Limitation 1 :

Ces données de réservations ont également permis de mettre en évidence deux périodes de temps durant lesquelles il n'y a pas de réservation :

- du 08/04 au 30/04,

- du 22/10 au 24/12.

Selon ELIMES, il s'agit de périodes durant lesquelles le village et le système de chauffage sont au repos ou en maintenance. Ceci constitue la première limitation de ce projet, puisqu'il est impossible par la suite de calibrer le modèle durant ces périodes.

5.3. Réalisation du document horizon

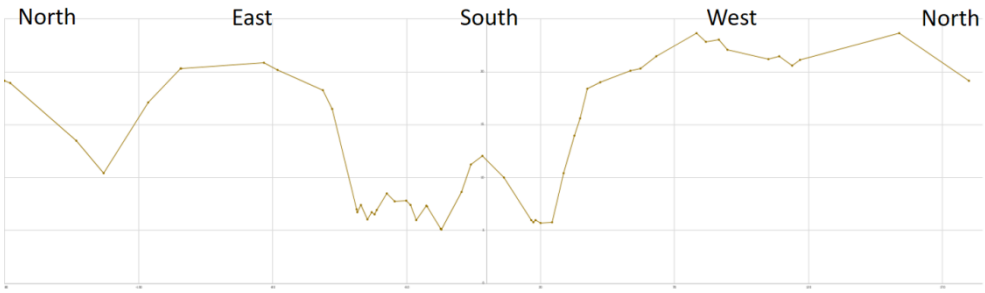

Figure 4 : Ligne d'horizon autour du Blatten Belalp

Ce document a pour but de tenir compte de la position des montagnes tout autour du village de Blatten, car ces dernières sont susceptibles de créer de l'ombre sur le site étudié. Pour réaliser cette ligne d'horizon (voir fig. 4), nous utilisons le site SwissTopo [3] et son outil 3D, ce qui permet d'avoir des informations sur l'altitude et la position géographique de chaque point.

5.4. Informations à propos des mesures des besoins de chauffage

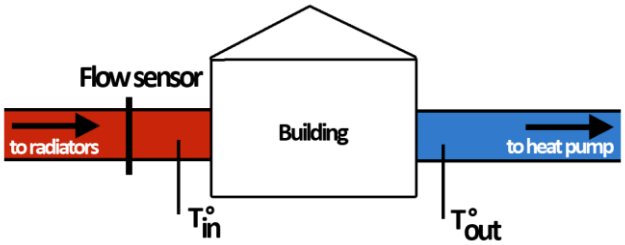

Figure 5 : Mesures des besoins de chauffage

Les données collectées sont des mesures de besoins de chauffage, puisqu'on mesure, à la sortie du système de chauffage, le débit d'eau chaude qui est envoyée aux radiateurs. Comme les températures d'entrée et de sortie sont connues, cela permet de déterminer la quantité de chaleur fournie aux bâtiments. Dans ce calcul, les pertes de charge de l'installation sont négligées.

Pour obtenir une mesure de la consommation de chauffage, nous aurions dû connaître le rendement de l'installation afin de pouvoir le comparer avec les besoins estimés par CitySim.

5.5. Comparaison des résultats

L'analyse des résultats se fait de trois manières différentes :

– Yearly heating needs :

Il est souhaité que les besoins de chauffage annuel entre CitySim et la réalité soient compris dans une marge de ± 10%. La valeur de 10% est une valeur moyenne constatée par les utilisateurs de CitySim.

$$\frac{Qh_{CitySim} - Qh_{Real}}{Qh_{Real}} < \pm 10\ \%$$

– Plot (x-y) (voir fig. 6):

Il faut qu'au niveau du plot (x-y) entre les besoins réels journaliers en abscisse et les besoins CitySim en ordonnée, la pente de la droite soit comprise entre 0,9 et 1,1 (±10%) et que le coefficient de détermination R^2, indicatif de la variabilité des mesures, soit supérieur à 0,8 (valeur constatée).

$$y = a * x + b \quad ; \quad a \in [0{,}9\,;1{,}1] \quad ; \quad R^2 > 0{,}8$$

Dans l'exemple (fig. 6), le bâtiment A1 respecte les limites fixées.

– Statistical graph :

Au niveau de la comparaison des besoins hebdomadaires, il faut qu'entre bâtiments de même type les graphiques aient une allure similaire. On voit que durant l'été, les besoins mesurés sont supérieurs aux besoins simulés par CitySim. Les deux trous de données correspondent aux périodes pour lesquelles le système de chauffage est en maintenance.

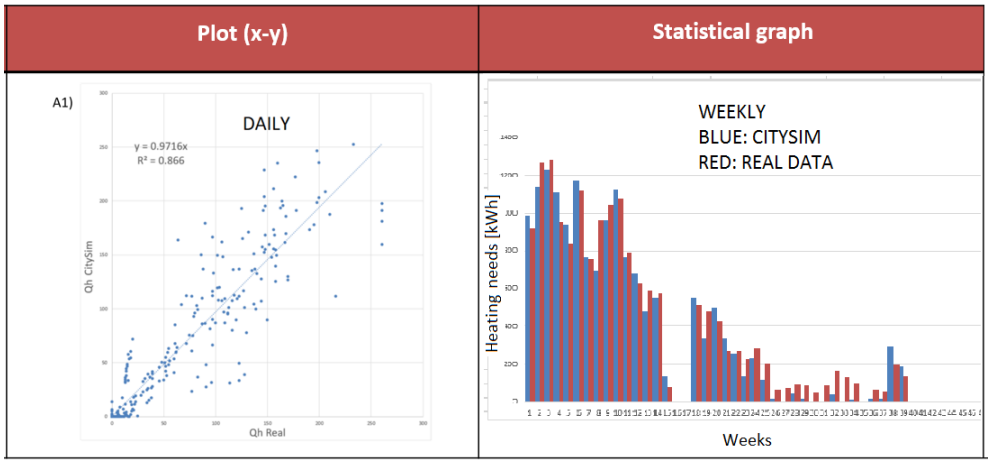

Figure 6 : Comparaison des résultats

Limitation 2 :

Dans le cas du village de Blatten, tous les bâtiments sont dans les tolérances à l'exception de 2 bâtiments : il s'agit de la piscine et du bâtiment A3.

- la piscine a un système de chauffage plus complexe du fait qu'il faut prendre en compte les échanges entre le bassin d'eau chaude et l'air, la récupération de chaleur au niveau de la ventilation et ces données ne sont pas disponibles,
- les résultats du bâtiment A3 sont surprenants car il est de géométrie semblable aux bâtiments A1 et A2 et sa situation est identique. Par conséquent, au niveau de la simulation CitySim les besoins sont approximativement identiques. Cependant, au niveau des mesures, on constate de fortes différences entre les bâtiments A3 et A2,
  Ceci signifie qu'il y aurait au niveau du bâtiment A3 un problème de type :

  - problème au niveau des mesures,
  - problème au niveau du système de chauffage,
  - problème au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Ces 2 bâtiments constituent la deuxième limite de ce projet. Les résultats pour ces bâtiments ne sont donc pas fiables.

Les 7 autres bâtiments sont calibrés en faisant varier le paramètre infiltration. Il s'agit d'un paramètre important et particulièrement difficile à déterminer puisqu'il n'y a pas eu de test d'infiltrométrie au niveau du quartier étudié.

Avant cette calibration, la valeur utilisée était la valeur estimée par le justificatif thermique qui est la même pour chaque bâtiment de même type. Cependant, étant donné que l'infiltration dépend des défauts de l'enveloppe, il est possible que l'infiltration soit légèrement différente d'un bâtiment à un autre. Nous ajustons alors la valeur de ce paramètre pour que les bâtiments collent encore plus à la réalité. Attention, afin de ne pas arriver à des résultats improbables, nous nous sommes fixé une limite de maximum $0.02\ h^{-1}$ de différence entre bâtiments de même type.

6. Scénarios énergétiques

Une fois la calibration réalisée, le premier objectif est atteint. On obtient un modèle calibré qui représente au mieux la réalité. Cela signifie qu'à partir de ce modèle, on peut créer d'autres modèles en y faisant varier des paramètres physiques et ainsi analyser au niveau des résultats l'impact énergétique de chaque variante.

Les paramètres physiques qui intéressent le CREM sont : le type de vitrage et, pour un type d'isolant fixé, l'épaisseur d'isolant. Nous allons faire varier ces deux paramètres selon 4 packs chacun (voir fig. 7).

Ensuite ces 16 scénarios (4*4) sont simulés selon trois années de données météorologiques différentes (2016 - 2030 - 2050). Le logiciel Meteonorm [4] fournit les prévisions météorologiques pour 2030 et 2050.

Glazing types (4)			
Pack0	Pack1	Pack2 - Current	Pack3 - Minergie P
simple glazing (Ug = 1.6; g=0.65)	double glazing (Ug = 1.1; g=0.63) ?	Selective triple (Ug=0.7 ; g=0.5)	Reinforced triple (Ug=0.4 ; g=0.37)

Insulation thickness (4)			
Pack0	Pack1 - Current	Pack2 - Minergie	Pack3 - Minergie P
insulation wall = 9cm	insulation wall = 18cm	= 25cm	= 35cm
insulation floor = 15cm	insulation floor = 30cm	= 30cm	= 35 cm
insulation roof = 6cm	insulation roof = 16cm	= 25cm	= 35 cm

Climate changes (3)		
2016	2030	2050

Figure 7 : Scénarios énergétiques

6.1. Différences entre 2016 et 2050 – degré-jour (20/12)

En 2050 selon la figure 8 ci-dessous :

- les hivers seront plus froids : + 20,4 [DJ] entre novembre et avril,
- les étés seront plus chauds : - 277,84 [DJ] entre mai et octobre.

Cela conduit à un réchauffement climatique total de 257,42 [DJ/an], soit une moyenne de 0,76°C en plus par jour.

DJ	2016	2050	(2050 - 2016)	(2050/2016)
January	632.45	640.55	8.1	1.01
February	516.08	556.9	40.81	1.08
March	608.51	568.19	-40.33	0.93
April	437.8	445.41	7.6	1.02
May	325.92	286.96	-38.96	0.88
June	172	119.83	-52.17	0.7
July	44.66	29.02	-15.64	0.65
August	46.84	28.44	-18.4	0.61
September	121.15	103.1	-18.05	0.85
October	435.18	300.55	-134.62	0.69
November	539.67	499.62	-40.05	0.93
December	554.73	599	44.27	1.08
Yearly	4434.98	4177.56	-257.42	0.94

Figure 8 : Analyse des degrés-jours (20/12)

6.2. Résultats des besoins de chauffages des différents scénarios

On retrouve 4 tableaux à la figure 9 ; chaque tableau représente un pack d'isolation.

- sur la colonne de gauche figurent les années étudiées (2016 - 2050) ;
- sur la ligne supérieure figurent les 4 types de vitrage (simple - double - triple sélectif - triple renforcé) ;
- pour chaque case, la valeur en [kWh] représente la somme des consommations annuelles des bâtiments étudiés $\sum Qs_i$; le pourcentage est calculé comme suit :

$$1 - \frac{\sum Qs_i}{\sum Qs_{configuration\ actuelle}}$$

La configuration actuelle est le pack d'isolation numéro 1 ainsi que des triples vitrages sélectifs.

			(Ug = 1.6; g = 0.65)		(Ug = 1.1; g = 0.63)		(Ug = 0.7; g = 0.5)		(Ug = 0.4; g = 0.37)	
		PACK0 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
%	DJ	units	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
0.00	4435	2016	400950	67.13	357940	49.20	335188	39.72	323190	34.72
-5.80	4178	2050	377457	57.34	336403	40.22	315604	31.55	304977	27.12

insulation: wall = 9cm; floor = 15cm; roof = 8cm

DJ	PACK1 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	304657	26.99	262634	9.47	239904	0.00	227459	-5.19
4178	2050	286229	19.31	246335	2.68	225293	-6.09	214055	-10.77

insulation: wall = 18cm; floor = 30cm; roof = 16cm

DJ	PACK2 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	286333	19.35	244477	1.91	221286	-7.76	208152	-13.24
4178	2050	268235	11.81	228598	-4.71	207037	-13.70	195097	-18.68

insulation: wall = 25cm; floor = 30cm; roof = 25cm

DJ	PACK3 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	269638	12.39	228006	-4.96	204413	-14.79	190569	-20.56
4178	2050	252222	5.13	212909	-11.25	190846	-20.45	178179	-25.73

insulation: wall = 35cm; floor = 35cm; roof = 35cm

Figure 9 : Tableaux des besoins en chauffage des différents scénarios

6.3. Analyse des résultats

Tout d'abord, on peut constater que chaque investissement engendre des retombées économiques. Cela peut paraître évident mais ce n'est pas toujours le cas. Par exemple, en passant de doubles à de triples vitrages : les triples vitrages ont un meilleur coefficient de transmission thermique, mais la valeur-g des vitrages est diminuée, ce qui signifie que ceux-ci laissent moins pénétrer les rayons du soleil. Cet investissement peut conduire à un impact énergétique nul ou très faible pour certaines positions géographiques.

Cas numéro 1 : Le passage du pack d'isolation actuel (pack 1) au pack d'isolation supérieur (pack 2) réduit de 7,76 % les besoins en chauffage. Comme un résultat en pourcents n'est pas toujours explicite voici un rapide calcul de retour sur investissement explicitant cette valeur :

Investment:

Zone	Insulator	Thickness	Price/m^2	Area	Investment
Wall	Swisspor Lambda	18 → 25 cm	+20 CHF/m^2	3782 m^2	⇒ 75640 CHF
Roof	Swisspor Premium	16 → 25 cm	+32.8 CHF/m^2	1768 m^2	⇒ 57990 CHF
Total				5550 m^2	⇒ 133630 CHF

Saving:

	Pack1 → Pack2	Heat Pump COP	Price / kWh
	(= 239904 - 221286) kWh	3	0.15 CHF/kWh
Results	18 618 kWh Heat	6206 kWh Electric	⇒ 930.9 CHF

Return on investment:

⇒ 143 years

Figure 10 : Calcul de ROI - Passage Pack 1 au Pack 2 Isolation

Nous investissons 133630 [CHF] et chaque année nous récupérerions 930 [CHF], ceci signifie qu'il faudrait plus de 140 années pour rentabiliser l'investissement, ce qui est bien plus long que la durée de vie prévue du bâtiment. Le calcul ne prend pas en compte les coûts liés au transport des matériaux et la pose.

Investment:

	Price/m^2	Area
Reinforcement of the chassis	+28.2 CHF/m^2	1370 m^2
Glazing	+27.6 CHF/m^2	
Installation	+15 CHF/m^2	
VAT (8%)	+5.6 CHF/m^2	
Total	+76.46 CHF/m^2	⇒ 104750 CHF

Saving:

	double → triple glazing	Heat pump COP	Price / kWh
	(=262634 - 239904) kWh	3	0.15 CHF / kWh
Results	22 730 kWh Heat	7 577 kWh Electric	⇒ 1136 CHF

Return on investment: ⇒ 92 years

Figure 11 : Calcul de ROI - Passage Pack 1 au Pack 2 Vitrage

Cas numéro 2 (fig. 11) : un calcul similaire est réalisé pour évaluer l'investissement d'opter pour des triples vitrages sélectifs plutôt que des doubles vitrages. Le passage de double à triple permet de réduire de 9.47 % les besoins en chauffage, cependant l'investissement se rentabilise en 92 ans.

7. Conclusion

Nous pouvons constater que sans aide de l'État, ce genre d'investissement n'est financièrement pas intéressant. Avec l'aide de l'État suisse (selon le Programme Bâtiment 2015), le retour sur investissement pout le cas 1 (isolant) est de 14,3 ans puisque l'on recevrait une prime plafonnée à 30 % de l'investissement total (soit 120279 [CHF]). Pour le cas 2, nous obtenons un ROI de 21,9 ans au lieu de 92 ans grâce à une prime de 35 [CHF/m² SRE] (soit 79841 [CHF] de prime), SRE étant la surface de référence énergétique.

Toutefois, malgré le manque de données nécessaires à la réalisation d'une analyse financière complète, nous pouvons percevoir l'importance d'un logiciel de simulation énergétique dans un projet tel que le projet OSCARS. Une fois le modèle calibré, il est possible de déterminer tous les flux énergétiques entre le bâtiment et l'extérieur. Il est également possible d'obtenir des informations à propos de chacune des surfaces du village de Blatten, ceci nous permet par la suite d'estimer tous les scénarios de rénovation souhaités. De plus, le tableau des résultats (fig. 9) peut être un tableau décisionnel intéressant pour l'entreprise REKA, dans l'optique d'envisager la réalisation de nouveaux villages.

Pour conclure, tous les objectifs ont été atteints. Les seules limitations proviennent d'absence de données.

A1	CitySim	Reality	SIA
$\sum Qs/year$	21544.7	25434.7	37011.8
	-15%	0	+45%

Figure 12 : Besoins satisfaits entre CitySim avant calibration et la réalité

Le premier objectif était de réduire la marge d'erreur entre les simulations utilisées par ELIMES et la réalité. Ceci a été accompli puisque même avant calibration avec les données réelles, le modèle CitySim était 30 % plus proche de la réalité que le justificatif thermique SIA (voir fig. 12). Le second objectif, qui était de fournir au CREM tous les scénarios énergétiques nécessaires au bon fonctionnement de leur outil d'optimisation des systèmes de chauffage, est également atteint

D'autres études sont présentes dans le rapport complet [6], notamment des études concernant la production des panneaux photovoltaïques ainsi que les systèmes de refroidissement.

Avis critique au niveau des données utilisées :

- il y a trop peu de données réelles du système de chauffage concernant la seconde partie de l'année,

- les apports d'énergies internes calculés utilisent des hypothèses théoriques du justificatif thermique,
- les données météorologiques ne proviennent pas exactement du site étudié, des différences d'ensoleillement, vent, température peuvent survenir,
- en raison de l'importance du paramètre infiltration, un test d'infiltrométrie serait préférable.

Avis critique au niveau du logiciel utilisé ; CitySim utilise un modèle 3D simplifié et adapté à son utilisation. Le temps consacré à la réalisation du modèle 3D est une partie importante de cette simulation, de ce fait l'utilisation de ce logiciel n'est pas justifiée en vue de simuler un bâtiment unique.

8. Sources

[1] *L'énergie thermique dans le bâtiment,* SIA 380/1, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2009.

[2] SketchUp, (consulté en septembre 2017).
Adresse URL : https://www.sketchup.com/

[3] Swisstopo, (consulté en septembre 2017), *Swiss Federal Office of Topography.*
Adresse URL : https://map.geo.admin.ch.

[4] Meteonorm, (consulté en septembre 2017).
Adresse URL : http://www.meteonorm.com/.

[5] KÄMPF, Jérome, *On the Modelling and Optimisation of Urban Energy Fluxes*, Thèse, Lausanne, Suisse : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.

[6] DACOS, Lary, *Future scenarios for low energy buildings in the Swiss Alps: energy consumption and production,* Travail de fin d'études, Liège, Belgique : HELMo - Institut Gramme, 2017.