

Modèle probabiliste de la consommation énergétique d'un bâtiment pour l'étude de l'écart de performances.

Pierryves Padey¹, Blaise Périsset¹, Sébastien Lasvaux¹, Stéphane Genoud², Joëlle Mastelic²

¹ Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO), HEIG-VD, Institut de Génie Thermique (IGT), Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT)

² Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO), HE-VS, Institut Entrepreneuriat & Management

Résumé

Le projet UserGap propose une approche innovante pour analyser l'écart de performance entre le bilan réalisé en planification et les consommations mesurées lors de l'exploitation des bâtiments à faible consommation d'énergie. Les consommations énergétiques sont désormais de plus en plus sensibles aux hypothèses sur le comportement des usagers et sur le fonctionnement des installations techniques. Les objectifs de ce projet sont 1) de comparer le bilan énergétique planifié avec les valeurs mesurées en exploitation ; 2) de caractériser l'écart de performances et le rôle des utilisateurs sur celui-ci ; et 3) de tester des mesures de réduction de consommation au moyen de « *Living Lab* ».

Pour ce faire, un modèle stochastique de simulation énergétique a été utilisé. Il caractérise une distribution de probabilité pour la consommation énergétique considérant l'incertitude des paramètres de la norme SIA 380/1. En évaluation ex-post, il est calibré en remplaçant certains paramètres variables par les valeurs mesurées in-situ pour approximer la consommation réelle. Cette approche permet de hiérarchiser l'influence des paramètres (technique et utilisateur) sur le « *performance gap* », et, peut être utilisé:

- en conception: pour identifier l'influence de l'usage sur la demande en simulant mensuellement, selon des distributions de probabilité, les paramètres « utilisateurs » ;
- en exploitation: pour vérifier les consommations par ajustement du modèle de calcul et proposer des actions correctives sur la consommation via un *Living Lab*.

Abstract

The UserGap project aims at assessing the « Energy Performance Gap » (EPG) between simulated and real consumption for low energy buildings. Indeed, in these building, the energy consumption is more and more sensitive to the user behaviour and the technical installation performances. The project's objectives are 1) to compare the energy consumption between simulation and reality, 2) to characterize the performance gap and identify the users' influence and 3) to test the implementation of energy saving measures with a "Living lab".

Thereby, a stochastic simulation model the energy consumption has been developed based on the SIA 380/1 norm. It has for output a distribution of the energy consumption as a function of uncertainty of the model's input parameters (characterized with probability distribution function). In Ex-Post evaluation, the model is calibrated by replacing some uncertain parameters by in-situ measured values so as to approximate the real energy consumption. The parameters influencing the EPG (technics and users) can then be hierarchized/ranked using this simulation strategy. This approach can be used:

- In conception: to identify the users' influence on the energy demand by simulating monthly energy consumption with probability distribution for the "users' parameters"
- In use: to verify the observed energy consumption by adjusting the simulation and propose corrective actions via Living Lab.

1. Contexte

La consommation énergétique des bâtiments en Suisse pour le chauffage et la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) a été de 82 TWh en 2016 [1]. Une grande partie de cette consommation énergétique provient des bâtiments existants. La mise en place d'exigences légales de plus en plus contraignantes (normes SIA) et de labels énergétiques (p.ex Minergie) au cours des dernières décennies ont permis de limiter la consommation énergétique des nouvelles constructions [2].

Toutefois, ces exigences légales ou labels se basent sur des calculs théoriques de consommations d'énergie lors des phases de conception. Ces calculs se fondent sur des scénarios liés à la technique du bâtiment et à l'occupation, qui ne sont pas toujours en phase avec les comportements réels des bâtiments et des occupants. De nombreux retours d'expériences ont déjà mis en évidence un écart de performance (*performance gap*) entre la consommation énergétique simulée lors des phases de conception des bâtiments (évaluation énergétique Ex-Ante) et la consommation énergétique mesurée lorsque le bâtiment est occupé (évaluation énergétique Ex-Post) [2,3].

Une partie de cet écart peut être attribuée au comportement de l'utilisateur et une autre partie aux caractéristiques techniques du bâtiment et des systèmes techniques en fonctionnement [4]. Cet écart de performance est d'autant plus sensible dans le cas de constructions répondant à des exigences de hautes performances énergétiques (p.ex. Minergie, MinergieP). En outre, les nouveaux modèles d'affaires dans le bâtiment, par exemple les contrats de performances énergétiques, nécessitent de garantir que les consommations énergétiques simulées (servant comme base contractuelle) soient bien celles observées lors de l'exploitation [5].

Au niveau Suisse, les résultats d'un projet de comparaison des consommations énergétiques Ex-Ante / Ex-Post de bâtiments résidentiels collectifs neufs certifiés Minergie ou respectant le MoPEC ont été publiés par l'OFEN en 2016 [6]. Les auteurs de ce projet ont montré une grande variabilité des consommations d'énergie entre les valeurs planifiées et les valeurs mesurées. Quelques pistes expliquant les écarts liés au bâtiment (p.ex. fonctionnement des installations techniques) ou liés à l'occupant, ont été mises en avant, mais celles-ci ont permis d'expliquer seulement 25% des différences observées (les auteurs de ce projet n'avaient pas reçu pour mandat d'étudier les raisons des écarts observés).

Ces différents travaux ont donc ouvert la voie à une analyse plus détaillée des écarts de consommation énergétique entre planification et réalité, en étudiant le bâtiment et son usage dans le détail, par le biais d'analyses techniques et socio-économiques se basant sur des données mesurées à l'aide de compteurs intelligents, d'entretiens qualitatifs et de sondages des habitants. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet UserGap (« *Influence des utilisateurs sur l'écart de performance dans les bâtiments collectifs à haute performance énergétique* ») financé par l'OFEN.

Ce projet de recherche appliquée se propose d'étudier l'influence des utilisateurs sur la consommation d'énergie, dans le contexte de bâtiments modernes et à haute performance énergétique en Suisse afin de mieux comprendre les déterminants techniques et liés à l'usage qui régissent leur consommation énergétique. Le projet UserGap vise à mieux comprendre l'écart de performance qui existe entre la consommation planifiée lors de la conception d'un bâtiment et sa consommation réelle afin, par la suite, de proposer des solutions de réduction de l'écart de performance par le biais de *Living Lab*.

Pour répondre à cet objectif, le projet UserGap a mis en place une approche stochastique de simulation énergétique, basée sur la méthode de calcul proposée par la norme SIA 380/1 [7]. Cette approche caractérise une distribution de probabilité pour la demande de chauffage, en considérant des intervalles de variations pour les paramètres de la norme, permettant le calcul des besoins de chaleur. Par ailleurs, dans le cas d'étude du projet UserGap, certaines données (température intérieure, consommation électrique, etc.) ont été disponibles et utilisées dans le cadre des bilans thermiques probabilistes. De cette manière, il est possible de positionner la demande réelle de chauffage des bâtiments par rapport au champ des possibles calculés par

les simulations, ceci afin d'identifier les plages de variations des paramètres du modèle qui expliquent la demande réelle et de quantifier leurs influences respectives sur la demande de chauffage.

2. Méthode

Le modèle normatif de calcul des performances énergétiques d'un bâtiment est basé sur un ensemble de paramètres d'usage (consommation électrique, température intérieure, etc.) et de climats spécifiques (selon SIA 2028). Ceux-ci sont fixés par la norme SIA 380/1 et, hormis les paramètres climatiques, définis selon des valeurs mensuelles, les valeurs des paramètres nécessaires à la simulation énergétique sont annuelles. De même, dans cette norme, les formules physiques permettant de calculer les déperditions et apports énergétiques sont fixées. Le principe du calcul est schématiquement représenté dans la Figure 1.

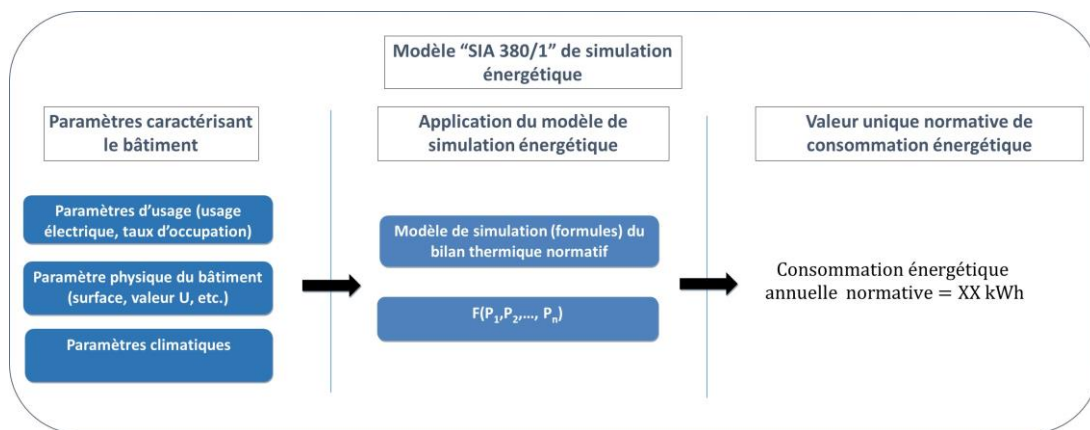


Figure 1 Modèle normatif de simulation énergétique

Ce principe de calcul a pour objectif de pouvoir comparer les bâtiments sur une base commune par rapport à une valeur de référence fixant la consommation énergétique admissible pour le bâtiment et ses caractéristiques. En pratique, le bâtiment aura des usages et des conditions d'utilisation qui peuvent différer fortement de la norme impliquant donc une consommation énergétique réelle différente de celle obtenue par le calcul normatif.

Idéalement, pour estimer au mieux la consommation énergétique réelle du bâtiment, il faut donc ajuster chaque paramètre de simulation aux conditions réelles du bâtiment. Les approches de simulation énergétique dynamique peuvent être employées, toutefois, elles requièrent de caractériser de nombreux paramètres incertains (heures de présence, gestion de l'occultation des stores, etc.) et reposent donc régulièrement sur des données normatives, issues par exemple du cahier technique SIA 2024 [8].

Il est donc, en pratique, extrêmement difficile d'identifier clairement l'ensemble de paramètres permettant d'obtenir, avec une précision acceptable, la consommation énergétique observée du bâtiment. En effet, ce travail nécessiterait de connaître exactement les habitudes d'usage des résidents (taux d'équipement électrique, taux de présence, d'utilisation, recourt aux stores, etc.). Par ailleurs, les simulations énergétiques dynamiques sont beaucoup plus chronophages et énergivores que les simulations énergétiques statiques proposées par le biais de la méthode de calcul de la norme SIA 380/1.

Dans le cadre de ce travail de recherche, un modèle de simulation énergétique probabiliste, basé sur les équations du modèle normatif de la norme SIA 380/1 a été développé. Ce modèle répond à plusieurs objectifs :

- *Dans le cadre d'une analyse Ex-Ante* : Etudier le champ des possibles de la consommation énergétique du bâtiment en fonction de l'incertitude des paramètres le

caractérisant. Ainsi, pour un bâtiment donné, la demande de chaleur ne sera plus une valeur unique déterministe, mais une distribution,

- Dans le cadre d'une analyse Ex-Post : Identifier les conditions d'utilisation du bâtiment qui permettent d'expliquer la demande de chauffage réel du bâtiment. Une fois identifié, il sera possible de proposer des mesures correctrices soit par adaptation des systèmes techniques, soit par des campagnes de sensibilisation auprès des utilisateurs.

La méthode employée dans le projet UserGap est représentée dans la Figure 2 :

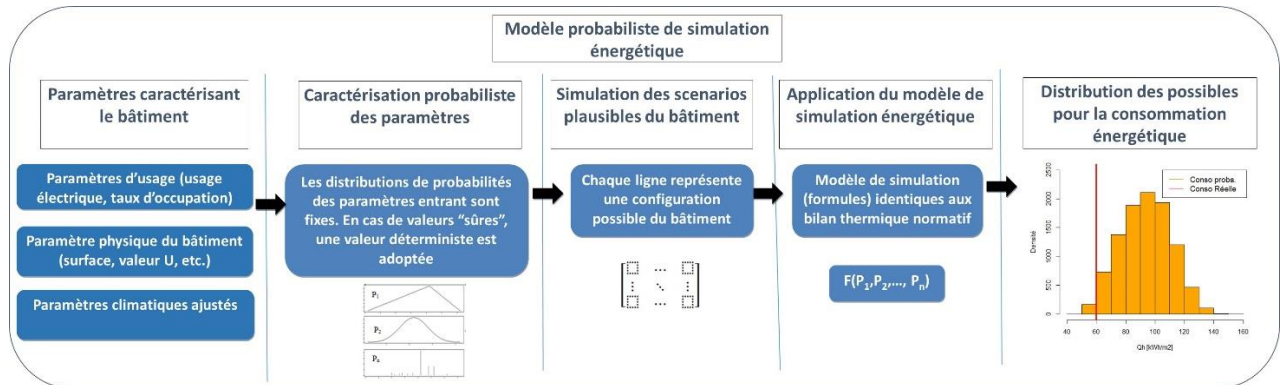


Figure 2 Définition d'un modèle probabiliste permettant de définir la distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment

Ainsi, par rapport au calcul normatif déterministe, dans le cas du modèle probabiliste présenté dans la Figure 2, chaque paramètre n'est plus seulement fixé selon une valeur unique déterministe mais soit :

- Selon une valeur ajustée à des mesures précises (dans le cas d'une évaluation Ex-Post par exemple)
 - o Ainsi, par exemple, dans le cas d'étude du projet UserGap, la température intérieure réelle mensuelle est connue, c'est cette information qui sera utilisée.
- Selon un intervalle de variation et une distribution de probabilité
 - o Ainsi par exemple, dans le cas d'étude du projet UserGap, le taux de voilage (c'est-à-dire l'occultation des fenêtres par l'usage des stores limitant ainsi les apports solaires) ne sont pas connus. De fait, un intervalle et une distribution de probabilité sera fixée pour ce paramètre.

La caractérisation ainsi réalisée permettra ensuite de définir, par simulation Monte Carlo, une matrice de configuration d'utilisation et de caractéristiques du bâtiment étudié. Chaque ligne (N lignes) de cette matrice comprendra l'ensemble des paramètres (M colonnes) permettant de calculer le besoin de chaleur spécifique (Qh) sous ces conditions. Le calcul de cette valeur est réalisé par les mêmes équations et selon le même principe que ceux du modèle normatif.

A l'issue du calcul des besoins de chaleur pour chaque ligne de la matrice de configuration des possibles du bâtiment, un intervalle et une distribution de probabilité de la consommation énergétique du bâtiment sont obtenus. De cette manière, il sera possible de quantifier dans quelle mesure la consommation énergétique du bâtiment pourra varier et de voir, *in fine*, si les consommations réelles du bâtiment sont plausibles ou, alternativement, aberrantes (défaut de mise en œuvre du bâtiment). Il sera également possible de proposer des mesures correctives pour réduire la consommation énergétique du bâtiment.

Ainsi, dans le cadre de ce modèle, il est possible de caractériser une plage de variation de la consommation énergétique d'un bâtiment. Plus les informations disponibles pour caractériser le bâtiment précisément (c'est-à-dire par des valeurs déterministes plutôt que probabilistes) sont nombreuses, plus l'intervalle sera réduit et le calcul sera précis. Alternativement, en phase

de conception d'un bâtiment, le recours à cette approche stochastique permettra de quantifier dans quelle mesure la consommation énergétique de l'objet en cours de conception peut varier, et identifier, par exemple, des configurations de bâtiment dont la consommation d'énergie est moins sensible aux comportements des utilisateurs. Cette information pourra également être utilisée dans le cadre de nouveaux modèles d'affaires, par exemple les contrats de performance énergétique notamment en permettant de quantifier la probabilité pour un bâtiment consommer plus que la valeur contractuellement fixée (probabilité de risque de défaut pour le contracteur).

Dans le cadre du projet UserGap, c'est donc cette approche stochastique qui a été adoptée. Lorsque des données d'évaluations ex-Post étaient disponibles, celles-ci ont été utilisées dans la simulation (par exemple la température intérieure). Lorsque les données n'étaient pas connues, des distributions de probabilité réalistes ont été fixées.

La méthode de simulation probabiliste employée dans le cadre du projet UserGap se positionne donc comme une solution intermédiaire entre l'analyse énergétique déterministe basée sur la norme SIA 380/1 et l'analyse dynamique détaillée. Elle permet de considérer l'incertitude des paramètres d'usage du bâtiment simplement et donc de définir une distribution de la demande de chaleur du bâtiment. Dans le cadre du projet UserGap, les simulations se basent à la fois sur des données connues (mesurées) et des données inconnues et incertaines (distributions de probabilité).

3. Résultats

Le cas d'étude de ce travail est un bâtiment résidentiel collectif de 20 logements, labellisé Minergie se situant sur la commune de Gland construit en 2013 et d'une surface de référence énergétique de 2663 m². Il est alimenté par un réseau de chaleur fonctionnant avec du bois et un appoint gaz. Le bâtiment dispose également d'une ventilation avec récupération de chaleur. Dans le cadre du projet, il a été possible d'accéder au comptage spécifique de la chaleur utile pour le chauffage des locaux par appartement (énergie utile pour le chauffage, i.e après l'échangeur de chaleur principale, l'ECS étant compté séparément). Les données de consommation utilisées dans le cadre du projet Usergap sont la somme des compteurs d'énergie utile de chaque appartement (Qh réel).

Le bilan thermique réalisé selon la norme SIA380/1, le justificatif Minergie ainsi que les données énergétiques des compteurs de chaleurs (température zones jour/nuit, consommation électrique, demande de chaleur, ECS, etc.) sont mis à disposition. Pour le bilan thermique initial du bâtiment, les données générales de modélisation sont les suivantes, Tableau 1 :

	Paramètres généraux du bilan thermique du bâtiment
Station météorologique de référence	Payerne
Température ambiante [°C]	20
Majoration de la température ambiante [°C]	0
Surface par personne [m ² _{SRE} /P]	40
Chaleur dégagée par personne [W/p]	70
Durée de présence journalière des personnes [h]	12
Besoins d'électricité (hors ECS) [MJ/m ² _{SRE}]	100
Facteur de réduction des besoins d'électricité [-]	0.7
Débit d'air thermiquement actif [m ³ /h.m ² _{SRE}]	0.33
Facteur de voilage des vitrages [-]	0

Tableau 1 Données générales de modélisation du bâtiment dans la simulation énergétique initiale

La consommation réelle d'énergie pour le chauffage (Qh réel) pour les années 2015 et 2016 ainsi que les résultats de la simulation énergétique (S0) selon la norme SIA 380/1 (à partir des hypothèses ci-dessus) sont représentés mensuellement dans la Figure 3 :

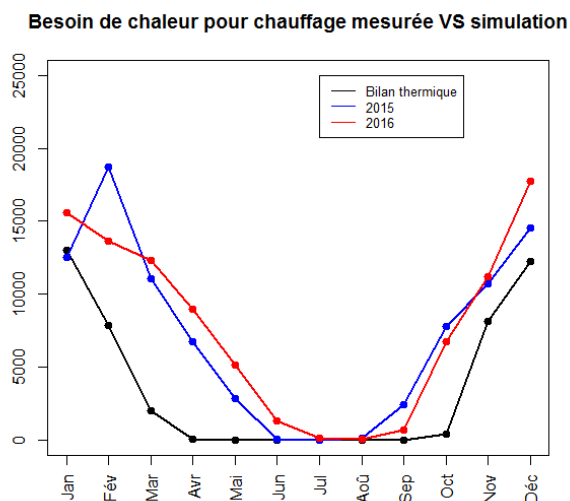


Figure 3 Besoin de chaleur pour le chauffage, données mesurées (2015, 2016) VS simulation initiale normative (Bilan thermique)

Sur une base annuelle, les différences observées sont présentées dans le Tableau 2 :

	Qh réel [kWh]	Qh Lesosai, S0 [kWh]	Ecart Réalité/bilan thermique
2015	87752	43'873	100%
2016	93632		113%

Tableau 2 Ecart (bilan annuel) entre la consommation énergétique réelle de chauffage et le besoin de chaleur standard SIA 380/1 pour le chauffage (S0)

Il apparaît donc clairement que le bilan thermique SIA 380/1 sous-estime le besoin de chaleur pour le chauffage. Toutefois il est nécessaire de préciser que le bilan thermique normatif est employé par définition afin de contrôler le respect d'une norme en fixant le plus possible les paramètres externes au bâtiment. Cette démarche permet ainsi de comparer les bâtiments entre eux et par rapport à une base commune selon des hypothèses équivalentes de modélisation.

Les conditions climatiques peuvent différer de manière importante et il est donc nécessaire, dans un 1^{er} temps, d'affiner ces paramètres. Les conditions climatiques utilisées dans le bilan thermique initial (Qh, Lesosai) se basent sur la station météorologie réglementaire du canton de Vaud pour un bâtiment situé à une altitude inférieure à 800 mètres. La station météorologique de Payerne se situe à 70 km du bâtiment et se situe dans un lieu géographique présentant des caractéristiques d'ensoleillement et de températures bien différentes du bord du lac Léman. Dans le cadre d'une comparaison avec des valeurs mesurées, la norme SIA 380/1 préconise l'emploi de données météorologiques correspondant à la période de mesures et des valeurs locales les mieux connues. La station météorologique de Nyon/Changins, située à 5km du bâtiment met à disposition les données de température extérieure pour les années 2015 et 2016. Pour l'irradiation, les données issues de la base de données SoDa (Solar radiation Data [9]) ont été mises à disposition sur la même période. Ces données climatiques sont représentées dans la Figure 4 en comparaison avec les données de la station climatique de référence :

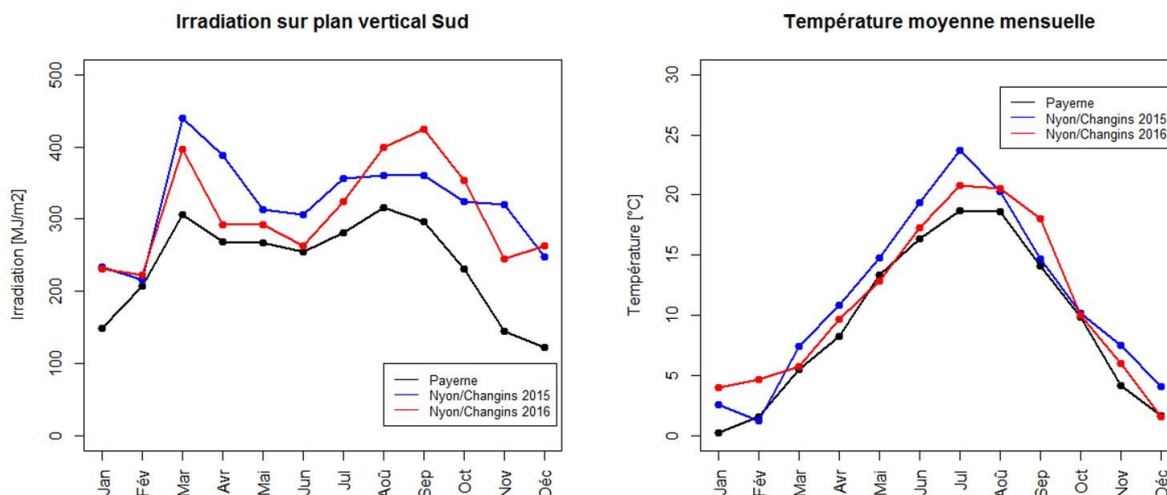


Figure 4 Ecart entre les données climatiques de la station de référence et les données sur site

Les données climatiques varient donc fortement. En ajustant les données climatiques de la simulation initiale par celles de la station de Nyon/Changins et de la base de données SoDa, une simulation énergétique (S1) permet de recalculer le besoin de chaleur pour 2015 et 2016 (Qh, S1), Tableau 3 :

	Qh réel [kWh]	Qh Lesosai, S0 [kWh]	Qh modification climat, S1 (moyenne) [kWh]	Ecart Réalité/S1
2015	87'752	43'873	32'910	167%
2016	93'632		35'754	162%

Tableau 3 Ecart (bilan annuel) entre la demande de chauffage réelle (Qh réel) et le besoin de chaleur pour le chauffage avec les données climatiques modifiées (S1)

L'écart de performance entre la simulation initiale ajustée des données climatiques et la demande de chauffage réelle augmente significativement par rapport à la simulation initiale avec la station de Payerne. En effet, l'irradiation et la température employée dans la version ajustée sont plus élevées, induisant donc une baisse de la demande de chauffage.

Le 2^{ème} niveau d'ajustement réalisé consiste en l'utilisation des températures intérieures mesurées. La Figure 5 présente la comparaison graphique des valeurs utilisées dans le bilan thermique initial avec une température intérieure de confort constante définie selon la norme SIA 380/1 à 20 °C pour la catégorie d'ouvrage habitat collectif, et les températures mesurées dans le bâtiment (zone jour et nuit):

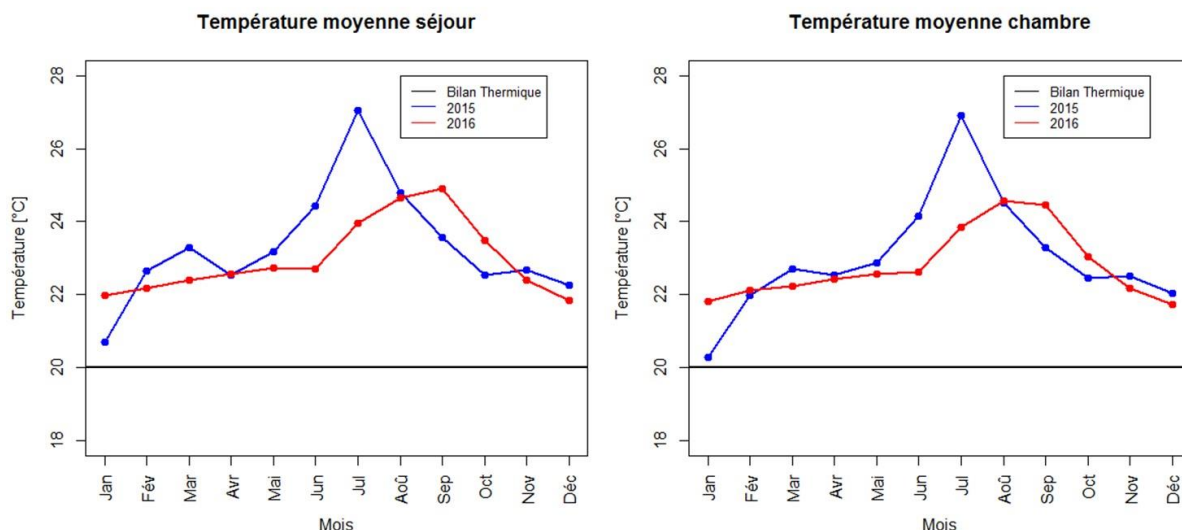


Figure 5 Température intérieure moyenne mesurée dans les chambres et séjour (jaune, bleu rouge) par rapport à la température utilisée pour dans le bilan thermique initial/normatif (noir)

La température intérieure mesurée est supérieure à la température de 20°C employée pour le calcul des besoins de chaleur normatif selon la norme SIA 380/1. Par ailleurs, il est à noter que la température intérieure dans le bâtiment varie mensuellement et qu'il semble donc nécessaire de considérer ces fluctuations temporelles mensuelles dans les bilans thermiques.

Une nouvelle simulation énergétique ajustée (S2) des données climatiques et des données de températures intérieures du bâtiment (considérant les fluctuations mensuelles mesurées) a été réalisée. Les résultats ainsi que l'écart de performance sont présentés dans le Tableau 4 :

	Qh réel [kWh]	Qh Lesosai, S0 [kWh]	Qh modification climat et T° intérieure (moyenne), S2 [kWh]	Ecart Réalité/S2
2015	87'752	43'873	45'235	94%
2016	93'632		50'194	86%

Tableau 4 Ecart (bilan annuel) du besoin de chaleur pour le chauffage entre la réalité et le bilan thermique avec les données climatiques modifiées et la température intérieure ajusté (S2)

L'écart de performance de la simulation ajustée par le climat et la température intérieure, permet de réduire l'écart de performance, toutefois, celui-ci apparaît encore comme élevé.

La comparaison des données mesurées dans le bâtiment avec les données employées dans le bilan thermique normatif a permis de montrer d'une part un écart significatif entre ces deux jeux de données et d'autres part, qu'il existait des variations saisonnières des paramètres employés dans la simulation thermique devant être également prises en compte.

Les paramètres, permettant la simulation énergétique probabiliste, ont été caractérisés à partir de l'analyse préliminaire de l'écart de performance énergétique. La liste des paramètres, valeurs et distribution, est présentée dans le Tableau 5 :

	Paramètre	Description	Intervalle	Remarque
Valeurs incertaines	Facteur de voilage	Facteur d'occultation des vitrages limitant les apports solaires	[0;100] %	Pour chaque fenêtre de l'immeuble (43 au total), un tirage aléatoire uniforme est effectué
	Surface par habitant	Surface utilisée par habitant, fixant donc le nombre d'habitants donc la puissance totale des habitants	[30;50] m ² /hab	Uniforme
	Puissance dégagée par les habitants	La puissance dégagée par les habitants pour calculer les apports internes	[50;90] W/hab	Uniforme
	Présence habitant	Le nombre d'heures de présence des habitants dans le bâtiment	[8;16] h/j	Uniforme
	Facteur de réduction électricité	La part de la consommation électrique qui peut être valorisée en apport thermique interne	[70;100] %	Uniforme
	Débit d'air thermiquement actif	La quantité d'air entrante dans le bâtiment pour calculer les déperditions de ventilation	[0.3;0.6] m ³ /m ² SRE.h	Uniforme
	Capacité thermique du bâtiment	Capacité effective de stockage de chaleur de l'espace chauffé par Kelvin	[0.45;0.555] MJ/m ² .K	Uniforme
	Valeur U des éléments d'enveloppe	Prise en compte de l'incertitude de la valeur U de chaque élément d'enveloppe	± 5% de la valeur du BT normatif	Une valeur U tirée pour chaque élément d'enveloppe (68 au total par configuration)
	Valeur Psi des ponts thermiques	Prise en compte de l'incertitude de la valeur Psi de chaque pont thermique linéique	± 5% de la valeur du BT normatif	Une valeur Psi tirée pour chaque pont thermique (7 au total par configuration)
Valeurs issues de mesures Ex-Post pour les années 2015 à 2016	Consommation électrique	La consommation électrique du bâtiment	-	Issue des mesures transmises par les partenaires pour les années d'études (en fonction de l'année tirée aléatoirement, les valeurs afférentes sont sélectionnées)
	Conditions climatiques externes (température)	La température extérieure sur site	-	
	Conditions climatiques externes (ensoleillement)	Les données d'irradiation sur les plans verticaux	-	
	Température intérieure	La température moyenne mensuelle dans le bâtiment	-	

Tableau 5 Caractérisation des paramètres du modèles stochastique de calcul

A partir de la caractérisation des paramètres présentée dans le Tableau 5, le modèle probabiliste a été appliqué pour effectuer 10'000 simulations (Qh S3) par années considérées. Les résultats des simulations sont présentés pour les années 2015 et 2016. Chaque mois, une valeur de chaque paramètre est tirée selon la caractérisation présentée dans le Tableau 5 0, dans la Figure 6 :

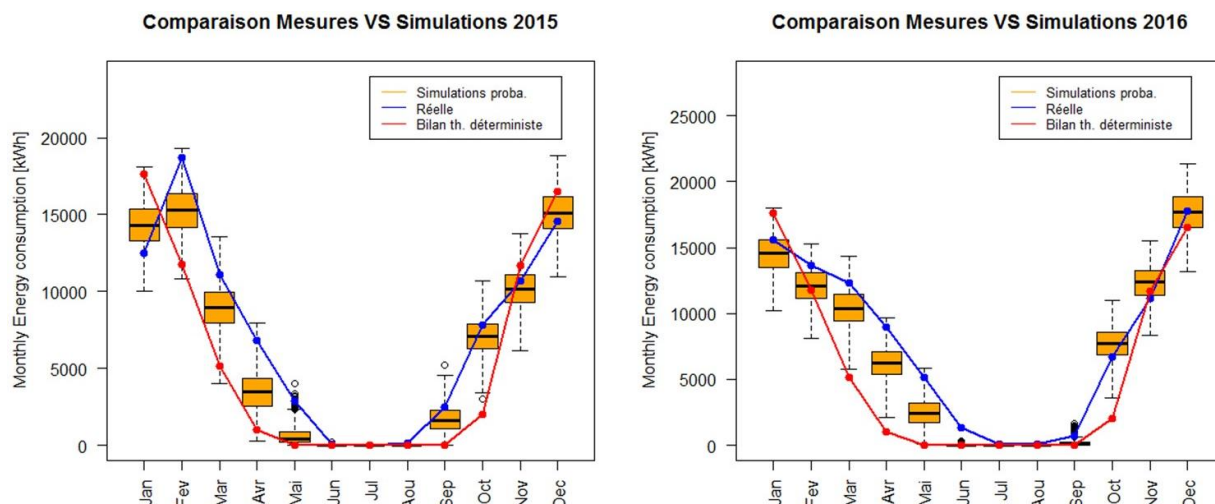


Figure 6 Résultats de la simulation probabiliste (boxplot orange) en comparaison avec la demande réelle (bleu) et les résultats du bilan thermique déterministe (rouge) pour les années 2015 et 2016

Les résultats de la simulation probabiliste encadrent la demande de chauffage réelle des bâtiments pour les deux années considérées. Pour ces deux années, il apparaît que les distributions mensuelles de la demande de chaleur issues des simulations probabilistes sont en bonnes adéquation avec les demandes réelles observées, en particulier pour les secondes parties d'années (septembre à décembre). Pour la période de janvier à mai, la demande réelle de chauffage se situe dans la partie supérieure des résultats des simulations probabilistes, il semble donc qu'il y ait une influence saisonnière partiellement prise en charge par le modèle stochastique développé. Le projet UserGap étant en cours de réalisation, cet aspect devra être investigué ultérieurement. Néanmoins, les résultats du modèle probabiliste permettent une estimation des besoins de chaleur plus représentative de la demande réelle observée, Tableau 6 :

	Qh réel [kWh]	Qh Lesosai, S0 [kWh]	Qh probabiliste (moyenne), S3 [kWh]	Ecart Réalité/S3
2015	87'752	43'873	71'595	22.5%
2016	93'632		78'610	19.1%

Tableau 6 Ecart (bilan annuel) du besoin de chaleur pour le chauffage entre la réalité et le bilan thermique probabiliste (valeur moyenne sur 10'000 simulations par année, S3)

L'évolution de l'écart de performance entre la consommation réelle, le bilan thermique normatif (S0) et les différentes simulations réalisées (S1 à S3) est présentée dans la Figure 7 :

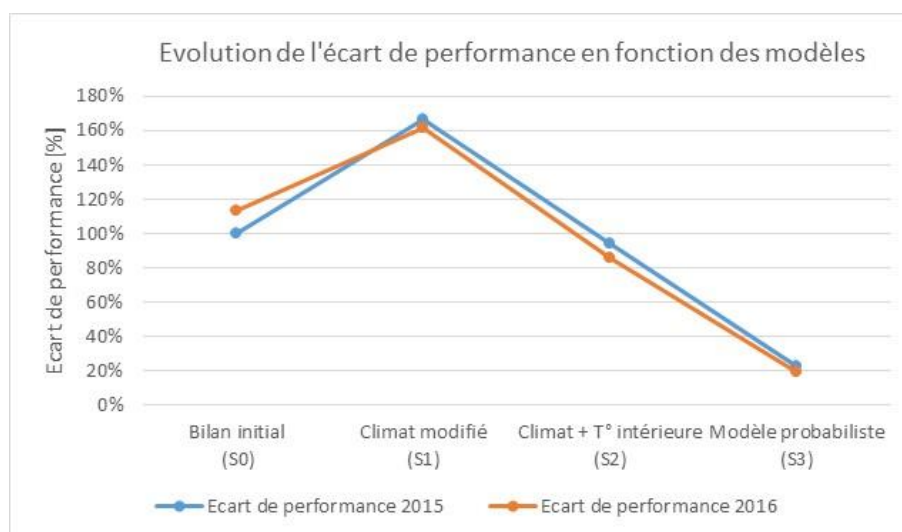


Figure 7 Evolution de l'écart de performance en fonction des ajustements effectués pour les simulations énergétiques

Sur une base annuelle, l'écart de performance moyen observé est de 13%. Il apparaît donc que le modèle probabiliste améliore la représentativité des simulations énergétiques du bâtiment par rapport à son usage réel.

A partir des simulations probabilistes, il est ensuite possible d'identifier l'intervalle de variation des paramètres du modèle qui permettent d'estimer au mieux la demande de chauffage réelle du bâtiment. Ainsi, en fixant une tolérance de $\pm 5\%$ (i.e seules les simulations permettant d'obtenir des demandes de chauffage mensuelles comprises dans $\pm 5\%$ du besoin réel sont considérées), les valeurs des paramètres de ces simulations sont extraites. Les exemples du facteur de voilage et du débit d'air thermiquement actif sont représentés dans la Figure 8 :

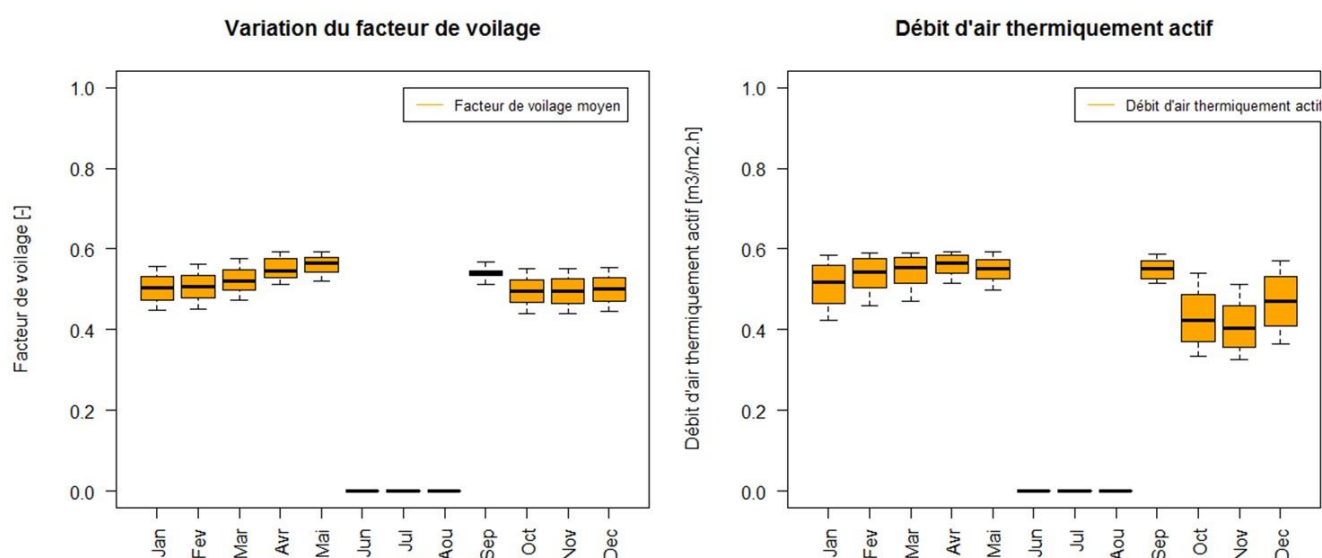


Figure 8 Plage de variation du facteur de voilage (moyenne sur l'ensemble des fenêtres) et du débit d'air thermiquement actif pour 2015

Il apparaît donc que le facteur de voilage, permettant d'approximer à $\pm 5\%$ la demande de chauffage réelle, oscille entre 45 et 60%. Bien que l'intervalle de variation initiale de ce paramètre fût entre 0 et 100%, aucune simulation avec un facteur de voilage de 0% (c'est-à-dire la valeur du bilan thermique initial S0) ne permettent d'expliquer la demande de chauffage réelle du bâtiment.

Les valeurs de débit d'air thermiquement actif qui permettent d'approximer à $\pm 5\%$ la demande de chauffage réelle, oscille entre 0.4 et 0.6 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Ces valeurs sont significativement plus importantes que le débit d'air thermiquement actif employé dans le bilan thermique initial, S0s. A partir du modèle

probabiliste, il apparaît qu'aucunes simulations avec la valeur du bilan initial ne permettent d'estimer de manière représentative la demande réelle du bâtiment.

4. Discussion

La méthodologie développée dans le cadre du projet UserGap, basée sur une approche probabiliste permet de mieux comprendre les écarts de performances des bâtiments. Cette approche permet aussi de distinguer la part des écarts de performances liés aux utilisateurs du bâtiment de la part liée aux installations techniques et à l'enveloppe du bâtiment.

Dans le cas d'étude du projet UserGap, certaines données nécessaires aux simulations énergétiques étaient mesurées et ont donc été employées. C'est le cas en particulier de la température intérieure et de la consommation électrique du bâtiment. Ces deux paramètres influencent grandement la demande de chaleur du bâtiment.

→ *L'analyse des données mesurées dans le cas d'étude du projet a montré que les données réelles (température et consommation électrique) différaient fortement des données de la norme SIA 380/1. Bien que cette norme n'ait pas vocation à estimer fidèlement la demande de chauffage des bâtiments, il serait peut-être nécessaire de réévaluer les valeurs des paramètres de calcul. La prise en compte d'une approche probabiliste en phase de conception permettrait également de mieux anticiper le comportement futur du couple {bâti + occupants}.*

Par ailleurs, le 1^{er} ajustement réalisé consistait à utiliser les données climatiques d'une station météorologique plus proche du bâtiment étudié. Il apparaît que ce facteur est également clef.

→ *Les données climatiques sont un élément essentiel dans le bilan thermique d'un bâtiment. Il semble également nécessaire, idéalement, de pouvoir tenir compte d'un plus large échantillon de sous-station et, probablement, de réévaluer les données des années de références.*

Une fois ajusté avec un climat représentatif et avec les valeurs mesurées au sein du bâtiment, l'écart de performance énergétique résiduel a été étudié par le biais du modèle probabiliste. Il est apparu que ce modèle probabiliste permettait une meilleure compréhension de l'écart de performance. Par ailleurs, les résultats de ce modèle permettent de représenter le champ des possibles plausibles de la demande de chaleur du bâtiment. C'est une approche qui semble donc à privilégier par rapport au résultat des bilans normatifs déterministes lorsque le maître d'ouvrage souhaite, en phase de pré-projet, obtenir une estimation plus représentative de la demande de chauffage de son bâtiment.

→ *L'approche de simulation probabiliste semble donc complémentaire avec le bilan thermique normatif. Elle permet de tenir compte de l'incertitude d'usage, qui, dans les bâtiments à haute performance énergétique est un élément clef de la demande de chaleur.*

L'analyse des plages de variation des paramètres permettant d'expliquer la demande de chaleur réelle du bâtiment apporte différents enseignements :

- D'une part, elle montre que certaines valeurs normatives, par exemple le facteur de voilage, semblent non représentatives de la réalité du terrain. Encore une fois, les bilans normatifs n'ont actuellement pas vocation à être représentatifs de la réalité. Cependant, il serait peut-être envisageable de les réévaluer pour une meilleure cohérence des résultats (en particulier le facteur de voilage des fenêtres),
- D'autre part, cette analyse a permis d'identifier, dans le cas d'étude du projet UserGAP des potentiels écarts de régulation des installations techniques (en particulier la ventilation). En effet, il apparaît que le débit d'air thermiquement actif en phase d'opération est probablement plus important que celui employé dans la simulation thermique initiale.

→ *L'analyse des plages de variation ne doit pas être interprétée comme une estimation précise de la valeur des paramètres. Elle fournit une indication semi-quantitative des valeurs plausibles des paramètres, permettant ensuite de cibler et d'investiguer par de la mesure in-situ les paramètres qui semblent le plus différer des valeurs initiales de simulation énergétique.*

5. Conclusions

Le projet UserGap vise à mieux comprendre l'écart de performance qui existe entre la consommation planifiée lors de la conception d'un bâtiment et sa consommation réelle afin, par la suite, de proposer des solutions de réduction de l'écart de performance par le biais de *Living Lab*.

Pour répondre à cet objectif, le projet UserGap a mis en place une approche stochastique de simulation énergétique, basée sur la méthode de calcul proposée par la norme SIA 380/1. Cette approche caractérise une distribution de probabilité pour la demande de chauffage en considérant des intervalles de variations pour les paramètres permettant le calcul des besoins de chaleur. Par ailleurs, certaines données (température intérieure, consommation électrique, etc.) ont été disponibles et utilisées dans le cadre des bilans thermiques probabilistes. De cette manière, il est possible de positionner la demande réelle de chauffage des bâtiments par rapport au champ des possibles calculés par les simulations. Il est également possible d'identifier les plages de variations des paramètres du modèle qui expliquent la demande réelle et de quantifier leurs influences respectives sur la demande de chauffage.

L'application de cette méthodologie au cas d'étude du projet a montré qu'il était possible de réduire significativement l'écart de performance entre simulation et réalité avec une approche simple d'implémentation. Le cas d'étude a également permis d'identifier des paramètres (débit d'air thermiquement actif) à étudier plus en détails, pour vérifier le bon fonctionnement des installations techniques.

6. Perspectives

Les résultats du modèle probabiliste ont permis une meilleure compréhension de l'écart de performance énergétique du bâtiment étudié. Il a également permis d'identifier certaines sources d'incertitudes (facteur de voilage et débit d'air thermiquement actif) qu'il est nécessaire d'étudier plus en détail. Des 1^{ères} analyses sont en cours quant aux facteurs de voilages. Quelques données de terrain ont d'ores et déjà été collectées sur des fenêtres, et tendent à montrer que ce facteur est plus important que la valeur de la norme SIA 380/1 (valeur de 0%). Concernant la ventilation et le débit d'air thermiquement actif, une campagne de mesure sur site doit être mise en place afin de confirmer ou d'infirmer les résultats de l'analyse probabiliste.

Finalement, le projet UserGap, qui vise également à sensibiliser les utilisateurs à leur consommation énergétique, se servira des résultats de l'analyse énergétique probabiliste afin de proposer des solutions co-crées d'efficacité énergétique via un Living-Lab. La sensibilisation pourra porter notamment sur la gestion des stores des fenêtres.

Remerciements

Cet article est basé sur la méthodologie développée dans le cadre du projet UserGap « *Influence des utilisateurs sur l'écart de performance dans les bâtiments collectifs à haute performance énergétiques* », réalisée grâce au soutien de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) et de la Conférence Romande des Délégués à l'Energie (CRDE). Les auteurs remercient la CRDE, l'OFEN ainsi que les autres partenaires du projet, l'entreprise Losinger Marazzi SA, le bureau EHE SA et TEP Energy GmbH.

Références

- [1] « Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2016 nach Verwendungszwecken », 2017, Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH
- [2] « Rénovation énergétique des bâtiments résidentiel collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiel du parc genevois » J. Khoury, 2014
- [3] “Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap”, Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., & Buswell, R., 2012, Applied Energy, 97, 355-364
- [4] « Protocole IPMVPIEA Annex 58. Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurement”, EVO Efficiency Valuation Organization, 2010, Site internet : <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex58/index.htm>, accessed : 2016/04/21
- [5] “The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation”, De Wilde, P., 2014, Automation in Construction, 41, 40-49
- [6] “Erfolgkontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015”, 2016, Demo SCOPE AG, econcept AG, Lemon Consult AG.
- [7] « Norme SIA 380/1: Besoins de chaleur pour le chauffage », 2016, Société Suisse des ingénieurs et des architectes (SIA)
- [8] « Cahier technique SIA 2024: Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment», 2015, Société Suisse des ingénieurs et des architectes (SIA)
- [9] « Solar radiation DATA service », Transvalor / O.i.E Mines ParisTech, 2018, accessed via : <http://www.soda-pro.com/home>