



Comparaison de profils de référence pour évaluer la flexibilité énergétique de bâtiments universitaires

Cyprien Beaudet, Jérôme Le Dréau, Pascale Brassier, Christian Inard

► To cite this version:

Cyprien Beaudet, Jérôme Le Dréau, Pascale Brassier, Christian Inard. Comparaison de profils de référence pour évaluer la flexibilité énergétique de bâtiments universitaires. IBPSA France, 2026, Lyon, France. <hal-05685457>

HAL Id: hal-05685457

<https://univ-rochelle.hal.science/hal-05685457v1>

Submitted on 8 Jul 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Comparaison de profils de référence pour évaluer la flexibilité énergétique de bâtiments universitaires

Cyprien Beaudet^{*1,2}, Jérôme Le Dréau², Pascale Brassier¹, Christian Inard²

¹ NOBATEK – 67 rue de Mirambeau, 64 600 Anglet, France

² LaSIE UMR CNRS 7356, La Rochelle Université, 17 000 La Rochelle, France

*cbeaudet@nobatek.com

RESUME. Avec l'essor des énergies renouvelables intermittentes et l'électrification des usages, le développement de la flexibilité de la demande d'énergie devient crucial pour maintenir l'équilibre des réseaux électriques. Dans ce contexte, les bâtiments tertiaires constituent des leviers d'action particulièrement pertinents, notamment grâce à l'agrégation de plusieurs bâtiments et au déploiement de stratégies à l'échelle d'un parc immobilier. Cet article analyse expérimentalement la flexibilité électrique de quatre bâtiments de La Rochelle Université via l'effacement ponctuel de leur consommation de chauffage. Plusieurs modèles de profils de consommation d'énergie de référence (baseline) ont été développés puis comparés afin d'évaluer leur justesse et leur précision. Les profils de référence produits permettent de caractériser le potentiel d'effacement des bâtiments via la définition de plusieurs indicateurs. Les résultats indiquent que le modèle « 10 days average » est le plus adapté au cas étudié. Les potentiels d'effacement quantifiés varient en moyenne de 27,2 à 82,8 kW selon les bâtiments.

MOTS-CLÉS : flexibilité électrique, expérimentations, baseline

ABSTRACT. With the rise of variable renewable energy and the widespread electrification of uses, developing demand flexibility is becoming crucial to maintaining the balance of electricity grids. In this context, commercial buildings are particularly relevant levers for action, notably through the aggregation of several buildings and the deployment of strategies at the building stock level. This article uses an experimental approach to analyze the electrical flexibility of four buildings from La Rochelle University through the temporary shaving of the heating consumption. Several baseline models were developed and then compared in order to evaluate their performance (accuracy and precision). The baselines produced enable us to characterize the load shaving potential of buildings using several indicators. The results show that, in general, the 10-day average model seems to be the most suitable for our case study. The quantified shaved load potential varies on average from 27.2 to 82.8 kW depending on the building.

KEYWORDS: electrical flexibility, experiments, baseline

1. INTRODUCTION

En 2024, la révision de la directive européenne sur les énergies renouvelables a fixé un objectif ambitieux : porter à 42,5 % la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique globale de l'Europe d'ici 2030 (Union Européenne 2024.). Cette évolution s'inscrit dans un contexte marqué par la montée en puissance des sources d'énergie intermittentes, telles que le photovoltaïque et l'éolien, ainsi que par une électrification massive des usages. Ces transformations fragilisent l'équilibre du réseau électrique, historiquement maintenu par une production s'adaptant en permanence à la demande. Aujourd'hui, il devient indispensable de développer la flexibilité de la demande afin que la consommation d'électricité puisse s'ajuster aux variations de production (RTE 2024). Les bâtiments, qui représentent 40 % de la consommation finale totale d'énergie en Europe, sont des leviers importants pour répondre à cette exigence grâce à leur capacité à pouvoir moduler leurs consommations. Cet article

traite uniquement de la flexibilité énergétique de bâtiments tertiaires, caractérisée par des stratégies de décalage ou d'effacement de la consommation d'énergie. Toutefois, le déploiement de ces pratiques se heurte à de nombreux obstacles, d'ordre technique, organisationnel et social (Ahmed et al. 2025). Une manière d'appréhender ces verrous réside dans le déploiement d'une approche expérimentale car elle permet d'évaluer la faisabilité opérationnelle des actions de flexibilité dans des conditions réelles, mais aussi d'en quantifier le potentiel. Cette quantification est essentielle, tant pour les gestionnaires de réseau que pour les exploitants des bâtiments, notamment dans la perspective d'une participation à des mécanismes de flexibilité via des agrégateurs. Ces approches expérimentales sont encore peu traitées dans la littérature. L'un des principaux enjeux réside dans l'élaboration de profils de consommation de référence (*baseline*) fiable pour le contrôle du réalisé et l'évaluation des gains générés. Plus cette *baseline* est fiable plus l'estimation de la puissance effectivement délestée est juste, garantissant ainsi une rémunération équitable du consommateur. Différentes approches existent pour établir ce profil de référence. Les approches dite « boîte blanche », reposant sur des outils de simulation tels que EnergyPlus, Modelica ou TRNSYS ont largement été étudiés (Ahmed et al. 2025). Cependant, ces méthodes sont exigeantes en temps et en données d'entrée, ce qui limite leur adoption par les gestionnaires de réseau. A l'inverse, les approches basées sur les données mesurées sont plus couramment utilisées. Elles incluent les modèles moyennants (HighXofY, MidXofY, LowXofY, méthode du rectangle, ...), beaucoup utilisés par les gestionnaires de réseaux, les modèles régressifs (AR, ARX, ARIMA, ...), les modèles de machine learning (réseaux de neurones, SVM, ...), l'interpolation linéaire ou encore la comparaison avec un bâtiment témoin. Lei et al. (Lei et al. 2021) ont évalué et comparé la précision de différents modèles moyennant et de l'interpolation sur des données expérimentales afin de caractériser des événements de flexibilité. Leurs résultats montrent qu'avec un ajustement additif (Gabaldón et al. 2021) les méthodes moyennantes fonctionnent bien pour établir une baseline. Néanmoins, leurs performances ne sont pas constantes dans tous les cas et l'interpolation linéaire simple offre en moyenne les meilleures performances. Poulin et al. (Poulin et al. 2022), en prenant également en compte des modèles régressifs dans leur étude, tirent les mêmes conclusions quant aux performances des modèles moyennant avec ajustement. Néanmoins, un aspect reste souvent insuffisamment pris en compte. Il s'agit de l'effet rebond susceptible de survenir après un effacement de consommation, notamment pour les usages de chauffage et l'interpolation ne permet pas sa caractérisation. L'omission de cet effet peut conduire à une surestimation du gain réel lié à la flexibilité. Ainsi, cet article vise à comparer différentes méthodes de *baseline* afin de quantifier expérimentalement la flexibilité électrique de bâtiments tertiaires à travers des effacements de chauffage, en intégrant explicitement les effets rebond dans le processus de caractérisation.

2. CARACTERISATION DES EFFACEMENTS

2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Une campagne expérimentale a été menée durant l'hiver 2024/2025 sur 4 bâtiments de La Rochelle Université décrits dans le Tableau 1. L'expérimentation a consisté à arrêter le chauffage de ces bâtiments pour une durée allant de 30 minutes à 1 heures et 30 minutes lors des jours PP1/PP2, définis par RTE comme des journées de tension et de forte consommation pour le réseau. Au total, ce sont 16 coupures qui ont été réalisées sur l'ensemble de la saison de chauffe majoritairement à 10h afin de coïncider avec les heures de pointe du réseau. Le pilotage du chauffage a été effectué via la GTB de l'université et les expérimentations ont été menées conjointement avec le service exploitation et maintenance de la

Direction du patrimoine de l'université. Les données de consommation et d'ambiance collectées ont ensuite été exploitées afin de caractériser ces effacements.

Nom du bâtiment	Année de construction	Surface utile [m ²]	Usage	Chauffage
LLASH	1996	7283	Enseignement et bureaux	Chaudière gaz
PST	1993	18 322	Recherche, enseignement et bureaux	Chaudière gaz
IUT	1970	17 938	Enseignement et bureaux	Chaudière gaz
Technoforum	1975-2002	2919	Bureaux	PAC + chaudière gaz

Tableau 1: Caractéristiques des bâtiments expérimentaux

Bien que le chauffage de l'université soit assuré majoritairement par des chaudières au gaz, les réponses thermiques des bâtiments restent pertinentes à étudier. Par ailleurs, les données de consommations de gaz ont été converties en consommations électriques à l'aide des rendements des chaudières et grâce à un modèle simplifié de COP basé sur la méthode pivot de la norme EN 15316-4-2. La PAC modélisée présente un COP nominal (7/35°C) de 4,25. À partir de cette valeur, des coefficients de pondération issus de la norme sont appliqués, en supposant une température de départ d'eau constante de 55°C, afin de déterminer cinq points de fonctionnement dépendant uniquement de la température extérieure. Une interpolation linéaire entre ces points complète le modèle. Le facteur de charge de la PAC n'est pas pris en compte.

2.2. MODELES DE *BASELINE*

Afin d'évaluer le potentiel de flexibilité des bâtiments et de caractériser leurs effacements de chauffage, il est indispensable de développer des modèles de profil de référence (i.e. sans flexibilité), également nommés *baseline*. La méthodologie adoptée se structure en deux étapes distinctes. La première correspond à une phase de validation, durant laquelle plusieurs modèles de *baseline* sont testés et comparés. Cette étape vise à évaluer leurs performances respectives et à sélectionner, pour chaque bâtiment, le modèle le plus pertinent au regard de critères de précision et de justesse. La seconde étape est une phase de prédiction : le modèle retenu pour chaque bâtiment est alors appliqué aux journées expérimentales afin d'estimer la consommation d'énergie de référence et de quantifier les effacements effectivement réalisés.

2.2.1. Description des modèles

L'ensemble des modèles développés et testés est présenté dans le Tableau 2. Un modèle de *baseline* peut être caractérisé selon plusieurs dimensions : sa typologie (modèle moyennant, régressif, apprentissage automatique, etc.), son horizon de prédiction, ainsi que sa *baseline window*, c'est-à-dire la période historique de consommation sur laquelle repose l'estimation de la consommation de référence. L'objectif de la *baseline window* est de sélectionner des journées dont le profil de consommation est le plus représentatif possible de la journée à modéliser. Mise à part pour le modèle du rectangle, les *baseline window* présentés dans le Tableau 2 sont choisis arbitrairement à partir des choix les plus récurrents présent dans la littérature. Afin de garantir la pertinence et la comparabilité des données utilisées, ont été exclues de l'analyse les jours de week-end, les jours fériés, les périodes des

vacances scolaires ainsi que les journées expérimentales. Ces règles visent à ne conserver que des journées de fonctionnement standard, évitant ainsi l'introduction de biais liés à des usages atypiques ou à des événements de flexibilité antérieurs dans la construction du profil de référence.

Modèle	Description	Horizon de prédiction	Baseline window
Interpolation linéaire	Interpolation linéaire entre le début et la fin de l'effacement	Durée de l'effacement	-
High5of10	La <i>baseline</i> est définie comme la moyenne des consommations des cinq jours les plus consommateurs/médiane parmi les dix jours précédant la journée modélisée	1 jour	10 jours
Mid5of10		1 jour	10 jours
5 days average	Moyenne des 5/10 jours précédant la journée modélisée	1 jour	5 jours
10 days average		1 jour	10 jours
Modèle du rectangle	La <i>baseline</i> est égale à la moyenne des 2 valeurs précédant le début de l'effacement	Durée de l'effacement	20 min
AR	Modèle auto-régressif	1 jour	1 semaine
ARX	Modèle auto-régressif avec l'ajout de variables exogènes	1 jour	1 semaine

Tableau 2: Description des modèles développés

2.2.2. Validation

L'objectif de cette phase est d'analyser et de comparer la précision ainsi que la justesse des différents modèles de *baseline* afin de sélectionner, pour chaque bâtiment, l'approche la plus adaptée. Pour ce faire, plusieurs modèles sont testés et confrontés sur une période de six semaines correspondant au début de la saison de chauffe. Cette période ne comporte aucune journée expérimentale. Ainsi, les consommations d'énergie observées ne présentent pas de dynamique d'effacement, ce qui permet d'évaluer les performances intrinsèques des modèles dans des conditions de fonctionnement normal. Les modèles sont comparés à l'aide de plusieurs indicateurs statistiques classiques : le CVRMSE (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error*) et le NMBE (*Normalized Mean Bias Error*). Par ailleurs, l'analyse se concentre spécifiquement sur la période de pointe. Les performances des modèles sont donc évaluées pour chaque jour ouvrable sur une plage horaire de 5 heures, comprise entre 10h et 15h. Il est supposé, qu'à la suite d'un effacement, un bâtiment peut retrouver un profil de consommation nominal après 3 heures au maximum. Cette hypothèse permet d'intégrer les effets dits de rebond dans l'évaluation des modèles, en tenant compte du retour progressif au fonctionnement habituel après un effacement.

2.2.3. Prédiction

À la suite de la phase de validation, un modèle par bâtiment a pu être sélectionné. Ce modèle a ensuite été appliqué à chacune des journées expérimentales afin de pouvoir caractériser les effacements de consommation de chauffage. Pour cela, des indicateurs ont été définis et sont illustrés par la Figure 1.

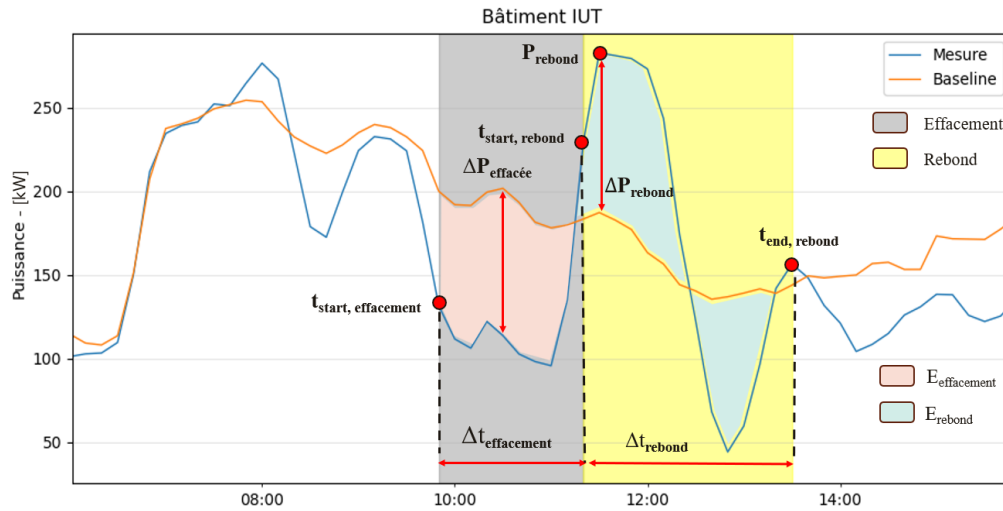


Figure 1: Caractérisation d'un effacement

Pour caractériser correctement une coupure de chauffage, il est nécessaire d'analyser à la fois la période d'effacement et, le cas échéant, la période de rebond qui peut s'ensuivre. Concernant la période d'effacement, la puissance effacée ($\Delta P_{\text{effacée}}$) est définie comme étant la valeur maximale de l'écart entre la *baseline* et la donnée mesurée sur la période d'effacement. L'énergie économisée pendant l'effacement ($E_{\text{effacement}}$) est quant à elle obtenue en intégrant sur l'ensemble de la période d'effacement l'écart entre la *baseline* et la consommation réelle. Concernant la période de rebond, sa fin est déterminée comme étant l'instant à partir duquel la somme cumulée de l'intégrale de l'écart entre la *baseline* et la consommation mesurée tend vers une valeur constante, c'est-à-dire lorsque sa dérivée est proche de zéro et devient inférieure à un seuil, défini empiriquement à 2,5 kWh/pas de temps. Afin de garantir la robustesse du calcul, cette valeur doit rester stable dans un intervalle prédéfini pendant au moins deux pas de temps consécutifs. Cette méthode nous permet de déterminer la durée du rebond (Δt_{rebond}) dont la puissance maximale atteinte durant cette période correspond à la puissance de rebond (P_{rebond}). La puissance additionnelle induite par le rebond (ΔP_{rebond}) est alors calculée comme étant la différence entre P_{rebond} et la *baseline* au même instant. Enfin, de manière analogue à la période d'effacement, l'énergie supplémentaire consommée durant le rebond (E_{rebond}) est obtenue par l'intégration de l'écart entre la consommation mesurée et la *baseline* sur l'ensemble de la période de rebond et le ratio entre $E_{\text{effacement}}$ et E_{rebond} peut être déterminé. L'ensemble de ces indicateurs permettent de caractériser les expérimentations en quantifiant l'impact de la prise en compte des effets rebonds.

3. RESULTATS

3.1. VALIDATION DES MODELES

Chaque modèle de *baseline* a été évalué pour l'ensemble des journées de la période de validation et pour chacun des bâtiments étudiés. La sélection du modèle optimal a été réalisée bâtiment par bâtiment, en retenant celui présentant les plus faibles valeurs moyennes de CVRMSE et de NMBE sur les 30 jours

de la période de validation. Seuls les résultats relatifs au CVRMSE sont présentés en Figure 2 toutefois, les conclusions tirées à partir du NMBE sont similaires.

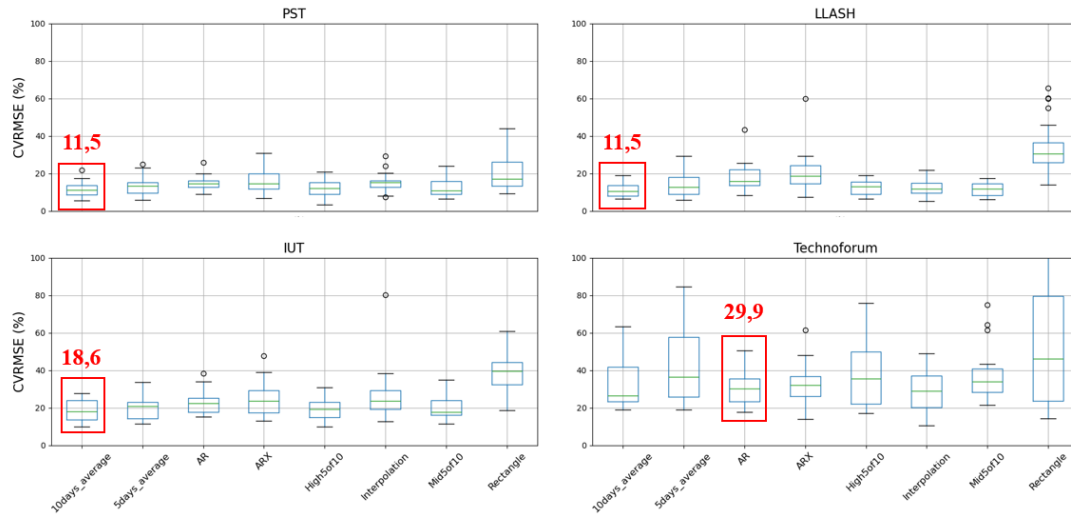


Figure 2: Résultats de la validation des modèles de baseline (valeur moyenne indiquée)

Bien que le modèle *10 days average* ait été retenu pour trois bâtiments, il est difficile d'affirmer qu'il soit universellement le plus performant. Pour un même bâtiment, les écarts moyens de CVRMSE entre modèles restent faibles, tandis que les différences entre bâtiments traduisent la variabilité intrinsèque des profils de consommation. L'exemple du Technoforum, dont la plus forte variabilité liée aux cycles ON/OFF de la PAC dégrade la performance des modèles, illustre que la fiabilité d'une baseline dépend fortement des caractéristiques propres à chaque site (usage, régulation, inertie thermique, comportement des occupants, surface, etc.). Cette hétérogénéité souligne la nécessité d'une sélection spécifique des modèles de *baseline*.

3.2. CARACTERISATIONS DES EFFACEMENTS

Maintenant qu'un modèle de *baseline* a été attribué à chaque bâtiment, nous sommes en capacité de caractériser les effacements de chauffage. La Figure 3 présente l'ensemble des effacements ainsi que leurs durées pour chaque bâtiment. Afin de faciliter la comparaison des effacements au sein d'un même bâtiment, les profils de consommation journaliers sont représentés en fonction du temps relatif au début de l'effacement ($t = 0$) et de manière normalisés (Min-Max scaler).

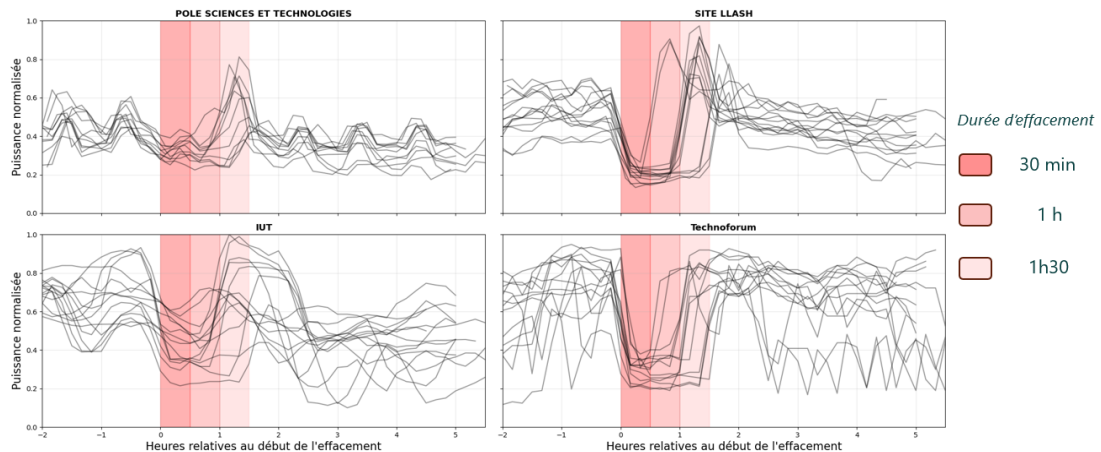


Figure 3: Profils de puissance normalisée pour les 4 sites et l'ensemble des effacements réalisés.

On observe une hétérogénéité marquée des dynamiques d'effacement selon les bâtiments. Elles sont clairement identifiables pour le Technoforum et la LLASH, beaucoup plus atténuées pour le PST, tandis que l'IUT présente des intensités d'effacement variables selon les événements. Ces différences s'expliquent en grande partie par les modalités d'activation. Au Technoforum et à la LLASH, l'ensemble du chauffage a été interrompu directement au niveau de la production, via l'arrêt des systèmes de production. À l'inverse, au PST et à l'IUT, seuls certains départs ont été coupés (arrêt de pompes de circulation), en raison de contraintes techniques et opérationnelles. Ces résultats mettent en évidence la variabilité du potentiel de flexibilité non seulement entre bâtiments, mais aussi entre zones thermiques d'un même site. L'élaboration des *baseline* permet également d'identifier les effets rebond. Ceux-ci sont très marqués pour la LLASH et plus modérés pour le PST et l'IUT et leur durée dépendent fortement de la puissance maximum du générateur. En revanche, aucun rebond n'apparaît pour le Technoforum. Cela s'explique par le fonctionnement du système : lors de la relance, la PAC atteint rapidement sa puissance maximale et le déficit est compensé par la chaudière gaz. Faute de données gaz à pas de temps fin remontant sur la GTB du bâtiment, ces rebonds, bien que réels, ne sont pas observables. Les indicateurs précédemment présentés ont été calculés pour chaque expérimentation et bâtiment et sont illustrés par la Figure 4.

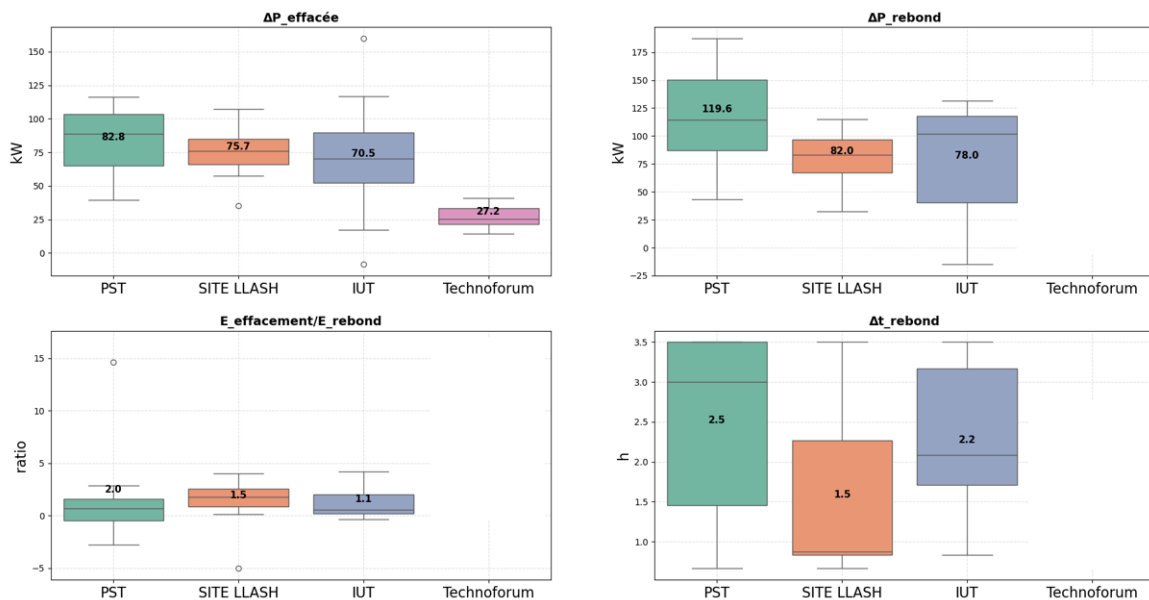


Figure 4: Caractéristiques expérimentales des effacements (valeurs moyennes indiquées)

Les données illustrant les effets rebonds pour le Technoforum étant indisponibles, les indicateurs relatifs à leur caractérisation ne sont pas calculés pour ce bâtiment. Concernant la puissance effaçable, on observe un potentiel d'effacement plus faible pour le Technoforum en raison de sa plus petite surface. Concernant les rebonds, ils sont en moyenne plus courts pour le LLASH mais les intervalles sont équivalents entre bâtiments pour une durée maximale de 3,5 heures. La pointe de consommation induite par le rebond est en revanche plus élevée pour le PST. Au total, dans une logique d'agrégation et d'activation simultanée de la flexibilité de ces bâtiments, une pointe de puissance globale moyenne de 280 kW lié aux rebonds apparaît. Cette information est cruciale pour une bonne gestion de la flexibilité d'un parc afin notamment d'éviter des dépassements de puissance d'abonnement et/ou des pénalités financières induites. Cette information permet de mieux distribuer la flexibilité au sein du parc en relançant progressivement le chauffage après une coupure. Enfin, le dernier indicateur montrant le ratio

entre l'énergie économisée pendant l'effacement et celle induite par le rebond montre qu'en moyenne, l'énergie effacée est toujours supérieure à l'énergie surconsommée pendant le rebond indiquant que la flexibilité peut être un levier d'économie d'énergie pour les gestionnaires de ces bâtiments. Aucune différence significative n'est observable entre les bâtiments. Des valeurs négatives de ce ratio soulignent l'importance de la fiabilité de la baseline : une surestimation des consommations peut conduire à un rebond très faible, voire négatif, indiquant non pas une surconsommation mais une économie d'énergie supplémentaire, ce qui est contre-intuitif.

4. CONCLUSIONS

Cette étude a permis de caractériser expérimentalement le potentiel de flexibilité de plusieurs bâtiments universitaires, en quantifiant la puissance effaçable via la coupure ponctuelle du chauffage et en validant la faisabilité opérationnelle de tels événements à La Rochelle Université. Les résultats soulignent l'importance de prendre en compte les effets rebond pour optimiser la gestion de la flexibilité énergétique d'un parc immobilier, ainsi que la variabilité de leur durée et de leur intensité. L'analyse future devra relier ces indicateurs à des variables explicatives (durée d'effacement, température extérieure, occupation). Enfin, la préservation du confort des usagers reste essentielle : l'étude des températures intérieures permettra de mieux évaluer la réponse thermique des bâtiments et l'impact des expérimentations sur les usagers.

5. REMERCIEMENTS

Ces recherches sont financées par l'ANRT et la Région Nouvelle-Aquitaine, dans le cadre du projet SMARTEES-U. Nous tenons particulièrement à remercier La Rochelle Université et plus particulièrement le service exploitation et maintenance de la direction du patrimoine pour leur collaboration et leur soutien.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, Bilal, Ateeque Ahmed, Hong-Na Zhang, Xiao-Bin Li, Kai-Yang Qu, et Feng-Chen Li. 2025. « Characterization, Quantification and Application of Energy Flexibility in Office Building: A Comprehensive Review ». *Energy and Buildings* 347 (novembre): 116306. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116306>.
- European Union. s. d. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast). Consulté le 17 octobre 2025. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>.
- Gabaldón, A., A. García-Garre, M. C. Ruiz-Abellón, A. Guillamón, C. Álvarez-Bel, et L. A. Fernandez-Jimenez. 2021. « Improvement of Customer Baselines for the Evaluation of Demand Response through the Use of Physically-Based Load Models ». *Utilities Policy* 70 (juin): 101213. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101213>.
- Lei, Shunbo, Johanna L. Mathieu, et Rishree K. Jain. 2021. « Performance of Existing Methods in Baseline Demand Response From Commercial Building HVAC Fans ». *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities* 2 (2): 021002. <https://doi.org/10.1115/1.4050999>.
- Poulin, Alain, Marie-Andrée Leduc, et Michaël Fournier. 2022. « Statistical Analysis of Baseline Load Models for Residential Buildings in the Context of Winter Demand Response ». *Energies* 15 (12): 4441. <https://doi.org/10.3390/en15124441>.
- RTE. 2024. Bilan Électrique 2024. <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2024/synthese>.