

Pilotage du levier de flexibilité a l'échelle du quartier - analyse de sensibilité

Jérôme Le Dréau*¹, Marika Vellei¹, Simon Martinez¹

¹ LaSIE (UMR CNRS 7356) - La Rochelle Université
23 Avenue Albert Einstein, 17000 La Rochelle, France
[*jledreau@univ-lr.fr](mailto:jledreau@univ-lr.fr)

RESUME. La flexibilité énergétique des bâtiments résidentiels est une solution envisagée pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables non-pilotables dans les mix énergétiques. La flexibilité consiste à décaler ou réduire certains usages (e.g. chauffage, ECS, usages blancs) en fonction des besoins des réseaux. Afin d'assurer une acceptabilité de la part des occupants, les solutions proposées doivent intégrer l'occupant au sein de la boucle de pilotage (de façon active ou réactive). Un des défis de ce type de pilotage est de pouvoir prévoir le levier de flexibilité disponible, afin de pouvoir le valoriser sur les marchés de l'énergie. L'échelle quartier est alors intéressante pour bénéficier du foisonnement des usages et de la diversité des occupants. Les résultats de simulations énergétiques dynamiques ont permis d'étudier l'influence de l'occupant sur le levier de flexibilité, estimé en termes de puissance modulée. L'influence des préférences des occupants et l'effet positif de l'agrégation a pu être observé.

MOTS-CLÉS : flexibilité énergétique ; pilotage ; chauffage ; usages blancs ; occupants

ABSTRACT. Energy flexibility of buildings is a possible solution to facilitate the integration of non-controllable renewable energies sources into energy systems. Energy flexibility consists in shifting or reducing some usages (e.g. heating, DHW, wet appliances) according to the needs of the grid. In order to ensure acceptability of the occupants, the solutions proposed must integrate the user within the control loop (active or reactive). One of the challenges of this type of control system is to be able to forecast the flexibility potential available, in order to be able to trade it on the energy markets. The district scale is therefore interesting to benefit from the diversity of usages and occupants. Dynamic energy simulations were performed to evaluate the influence of indirect control strategies on the flexibility potential, estimated in terms of modulated power. The influence of occupant preferences and the positive effect of aggregation could be observed.

KEYWORDS: energy flexibility; control; heating; wet appliances; occupants.

1. INTRODUCTION

La flexibilité énergétique peut être définie comme « la capacité d'un bâtiment à gérer sa demande et sa production en fonction des conditions climatiques locales, des besoins des utilisateurs et des exigences du réseau » (Jensen, 2017). Les usages domestiques pouvant être décalés sont généralement le chauffage, la production d'ECS, les usages blancs (lave-vaisselle, lave-linge) et le véhicule électrique. Dans les études prospectives de RTE (2017) et de l'Ademe (2018), entre 25% et 100% de ces usages seront rendus flexibles à l'horizon 2050 pour mieux s'adapter aux besoins du réseau électrique. Un modèle économique a également été développé par Voltalis, qui propose un volume d'effacement de 1 MW en contrôlant près de 10 000 logements chauffés à l'électricité.

Une des difficultés majeures avec la flexibilité énergétique des bâtiments résidentiels réside dans les capacités mis en jeu (quelques centaines de watts) et leur pilotabilité. En effet, la disponibilité de

ces charges flexibles dépend fortement de l'occupant, de ses préférences et de ses activités. À l'échelle d'un bâtiment, il est donc difficile de prévoir le levier de flexibilité disponible. A l'échelle d'un quartier, le foisonnement des usages permet d'obtenir une réponse plus fiable. L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'influence de l'occupant sur le levier de flexibilité pour différentes échelles d'agrégation. Les paramètres évalués sont liés à la typologie d'occupants, aux types d'activités et à leurs tolérances vis-à-vis de la flexibilité. Les bâtiments et ses occupants sont modélisés suivant une approche « bottom-up », permettant de prendre en compte la diversité du quartier. Le quartier bas carbone Atlantech, composé de 337 logements, constitue notre cas d'étude.

2. MODELE ENERGETIQUE QUARTIER

2.1. CAS D'ETUDE

Le quartier Atlantech, situé à La Rochelle, a été sélectionné pour évaluer l'impact des occupants sur la flexibilité énergétique (Figure 1). Ce quartier résidentiel est constitué de 337 appartements répartis en 97 bâtiments. Afin d'étudier l'influence de la taille du quartier, un deuxième cas d'étude a été sélectionné représentant seulement 10 logements (représentés par le carré rouge de la Figure 1). La surface moyenne des logements est de 65 m² et l'hypothèse est faite qu'ils sont essentiellement occupés par des couples avec ou sans enfants (Figure 2). Afin de réaliser des simulations énergétiques, la géométrie du quartier a été simplifiée jusqu'à un niveau de détail de type LOD 1. Le climat considéré pour les simulations énergétiques correspond au climat observé à La Rochelle sur la période 1982-1999 (format IWEC).

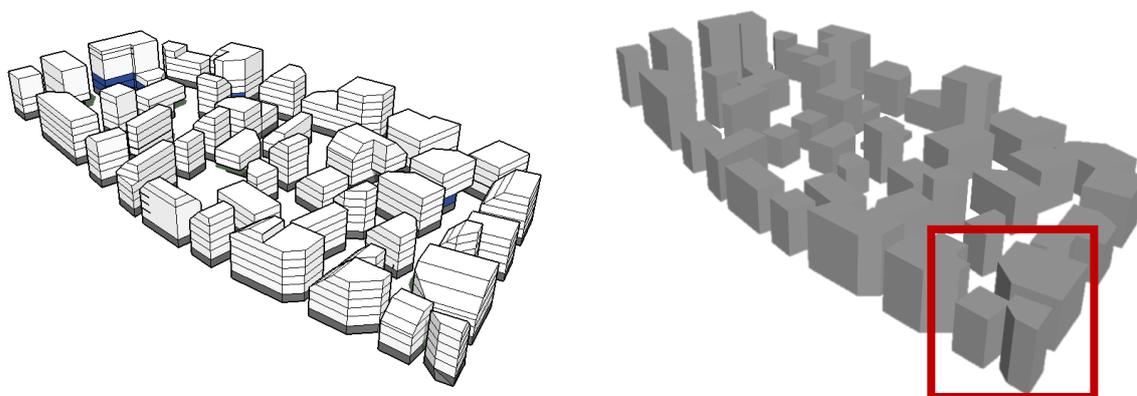


Figure 1 : Modèle du quartier (configuration originale à gauche, modèle LOD1 à droite).

Afin de répondre aux exigences énergétiques et environnementales du quartier, les bâtiments construits sur la parcelle ont été conçus suivant le label E+C-, niveau Energie 3/Carbone 2 (E3/C2). Cela signifie que les bâtiments ont une consommation énergétique réduite d'environ 20% par rapport à la RT 2012 et disposent d'une production locale d'énergie renouvelable. Il est important de noter que le contrôle des charges flexibles se fera sur les bases d'un système centralisé (pour réduire le pic en fin de journée) et non sur la production locale (pour autoconsommer). La résistance thermique des différents composants de l'enveloppe est donc renforcée, l'étanchéité à l'air est maximisée et le renouvellement de l'air est assuré par une ventilation hygroréglable de type B. La composition de chaque composant est générée sur les bases de distributions, conduisant à des caractéristiques différentes entre bâtiments (Figure 2).

La production de chaleur est assurée par une pompe à chaleur air-eau à vitesse variable (COP nominal de 3, variable selon les températures amont-aval) alimentant des radiateurs basse température. La régulation se fait sur l'ensemble du logement, avec un thermostat d'ambiance gérant les réduits et un contrôleur proportionnel régulant les émetteurs. La flexibilité sur la production d'eau chaude sanitaire n'est pas incluse dans cette étude car celle-ci est moins impactée par les activités des occupants (stockage journalier).

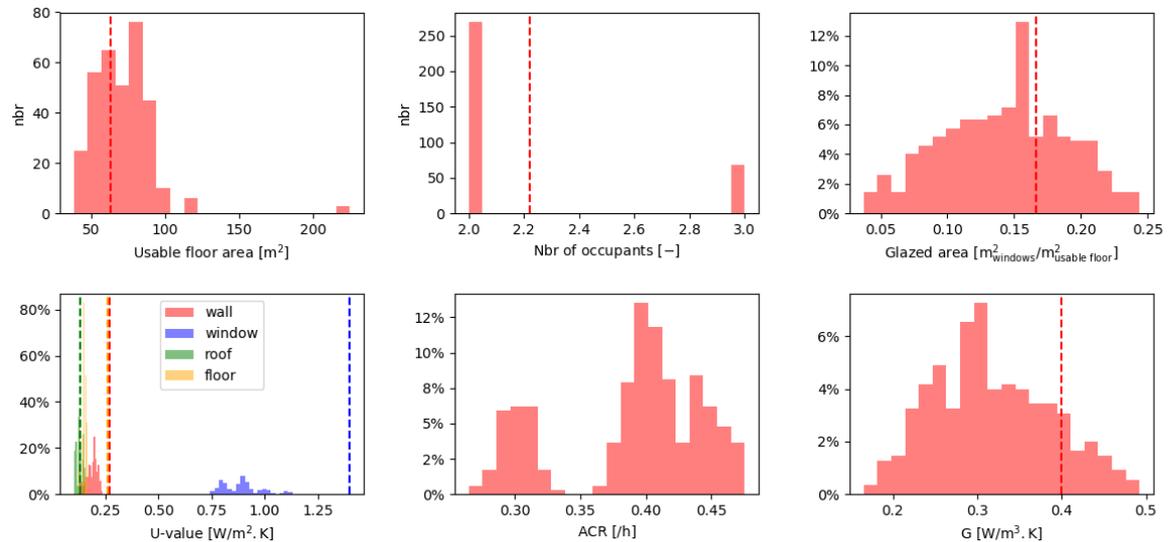


Figure 2 : Caractéristiques principales des 337 logements

(les barres verticales représentent les valeurs moyennes observées en RT 2012).

La plateforme de modélisation utilisée pour évaluer la flexibilité à l'échelle quartier est Dimosim (DIstrict MOdeller and SIMulator, Riederer et al., 2015). Afin d'optimiser le temps de calcul en affectant le moins possible la précision, les simplifications suivent les recommandations de Fraysinnet (2018) : composition détaillée de l'enveloppe, prise en compte de l'inertie interne, détail du rayonnement solaire externe et des masques. Chaque logement est modélisé par une zone thermique unique, conduisant à environ quatre zones thermiques par étage. Etant donné que les logements sont caractérisés par une surface habitable limitée, une unique consigne de chauffage et des débits interzonaux (ventilation par balayage), les gradients thermiques sont faibles ce qui affecte peu la précision des résultats avec un modèle monozone (Shin and Haberl, 2019). La composition des murs extérieurs et intérieurs, des cloisons, fenêtres, planchers est définie pour chaque logement. Les parois opaques sont discrétisées chacun en 4 couches distinctes (parement intérieur, masse thermique, isolation, parement extérieur) conduisant à plus d'une vingtaine de capacités thermique par logement. La conduction au travers des parois est ensuite résolue par la méthode des différences finies, au pas de temps de 10 minutes. Les masques entre bâtiments et pour les ouvertures sont évalués pour les différentes périodes de l'année en fonction de la géométrie du quartier.

Les activités des occupants sont simulées de façon explicite, sur les bases de l'enquête Emploi du Temps de l'INSEE (2010) et de la typologie d'occupants du logement (actif, non-actif, étudiant). Les 27900 journaux d'activités (reportées toutes les 10 minutes pendant 24 heures) permettent de créer des profils stochastiques et cohérents d'occupation. Ces profils sont tirés de façon aléatoires dans des clusters en utilisant un nombre aléatoire nommé *seed*. Le nombre d'occupants est défini suivant la surface habitable du logement (2010). En fonction de ces différents paramètres et en utilisant des

probabilités conditionnelles, les équipements électriques du logement sont définis (taux d'équipement, classe énergétique et taille). Chaque logement peut ainsi avoir jusqu'à 12 typologies d'appareils électriques, dont le fonctionnement et les apports internes sont liés au nombre et aux activités des occupants.

2.2. VERIFICATIONS DU MODELE

Le modèle thermique de la plateforme Dimosim a été comparé aux résultats du benchmark BESTEST sur des cas en évolution libre (600ff, 900ff, 650ff, 950ff, 960ff) et en conditions contrôlées (600-650, 900-950). Les résultats sont cohérents avec les résultats d'autres outils de simulation thermique dynamique.

Etant donné le nombre important de données d'entrées nécessaires pour modéliser un quartier, il est primordial de vérifier la cohérence de celle-ci vis-à-vis de données typiques (Figure 2). Les différents résultats de simulation ont également été vérifiés. La Figure 3 (gauche) représente le profil moyen journalier et annuel de demande électrique du quartier. Les périodes de vacances peuvent être observées sur la demande annuelle. La demande journalière a été comparée aux résultats de Vorger (2015) représentant la moyenne nationale. Les dynamiques présentent de fortes similarités, mais le niveau moyen est plus faible dans le cas d'Atlantech du fait de l'absence de maisons individuelles (surface plus faible). La consommation moyenne annuelle correspond bien à la valeur moyenne observée en France pour les bâtiments collectifs (Ademe, 2019). De plus, le facteur de coïncidence a été calculé pour le quartier simulé, afin de vérifier que la diversité des usages était bien représentée (Figure 3, droite). Ces valeurs ont été comparées à la relation développée par Velander (1947) pour les usages domestiques avec chauffage électrique; cette relation est valable pour un nombre important de points de consommations (> 30). Le foisonnement au sein du quartier paraît cohérent, et inférieur à la valeur de dimensionnement proposée par Velander.

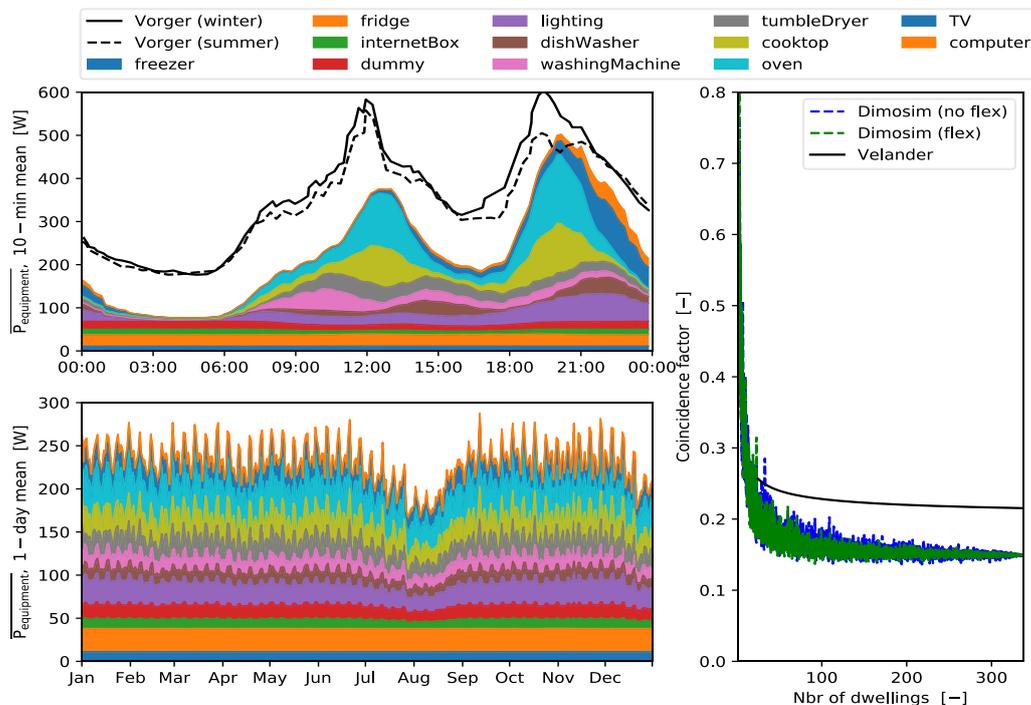


Figure 3 : Demande électrique moyenne par foyer hors chauffage (gauche) et facteur de coïncidence, chauffage inclus (droite).

Les apports internes dus aux occupants et aux équipements électriques sont cohérents vis-à-vis des valeurs moyennes utilisées en France (Figure 4). Les résultats de simulation montrent que 85% de l'électricité utilisée dans les logements se transforme en charge interne, similaire aux 87% de l'étude Ademe (2019). Les besoins de chauffage sont quant à eux en moyenne de 30 kWh/m²_{SHAB.an}, ce qui paraît cohérent pour des bâtiments de niveau E3C2 situé en zone climatique H2b.

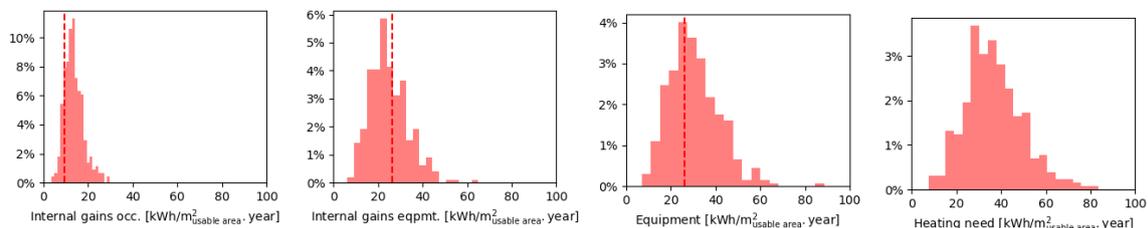


Figure 4 : Charges internes des occupants et équipements et demande de chauffage (337 lgmts).

2.3. FLEXIBILITE : MODELISATION ET INDICATEURS

L'objectif de flexibilité pour le quartier considéré est de diminuer la consommation électrique de 18:00 à 21:00. Ce créneau correspond généralement à un moment de tension sur le réseau électrique en période hivernale, du fait de la concomitance des usages domestiques et professionnels. Dans le cadre de cette étude, nous ferons l'hypothèse que la flexibilité est activée tous les jours sur le même créneau horaire, avec une incitation financière (par exemple tarification de type « heures creuses »). Les deux usages flexibilisés sont le chauffage et les usages blancs (machine à laver et sèche-linge).

Concernant la **flexibilité sur le chauffage** (noté « heating »), elle est activée de façon semi-automatique par le thermostat du logement, selon les préférences des occupants (*tolérance de flexibilité*) et l'occupation du logement (*présent/absent*). En cas d'inutilisation du réduit, la température de consigne reste constante au cours de la journée. En cas d'utilisation du réduit, la température du logement diminue à 15°C en période d'inoccupation et à 18°C la nuit (ces créneaux sont calibrés sur un calendrier moyen au cours de l'année). Lors de l'activation de la flexibilité, la consigne de température est diminuée automatiquement pendant la période 18:00 – 21:00 en cas d'occupation du logement (Figure 5). En cas d'inoccupation et d'utilisation du réduit, la consigne de température n'est alors pas modifiée.

La capacité du modèle thermique monozone à reproduire les dynamiques induites par des changements de consigne a été testé vis-à-vis d'un modèle plus détaillé (STD multizones). Des résultats comparables ont été obtenus, avec des erreurs inférieures à 0.5°C ou 10% lors des évènements de flexibilité.

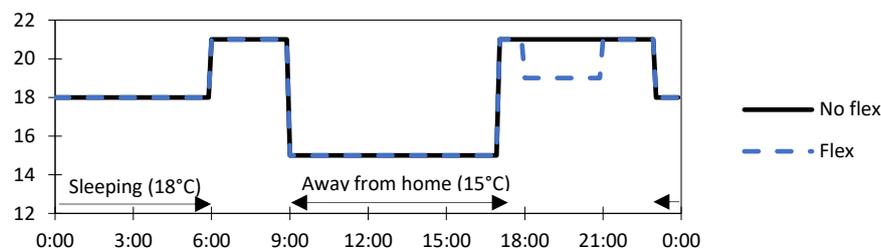


Figure 5 : Exemple de consigne de température d'un logement (température de confort de 21°C et tolérance de flexibilité de -2°C).

Concernant la **flexibilité sur les usages blancs** (noté « *dw-wm* »), elle est activée de façon manuelle par l'utilisateur (via l'option de démarrage différé) selon ses contraintes d'usages. La modélisation du potentiel de flexibilité est basée sur une modélisation de type agents avec décisions probabilistes dépendant de l'heure de la journée. L'acceptabilité des occupants à différer certains usages a été évaluée dans le cadre du démonstrateur Belges Linear (acceptabilité moyenne de 40 et 30% pour le lave-vaisselle et le lave-linge respectivement). Le modèle a été validé avec des mesures réalisées en France, sur des foyers disposant de la tarification simple et de la tarification HP/HC (Vellei et al, 2020). Il est important de noter que ce levier de flexibilité est basé sur l'instauration d'une routine par les occupants et une connaissance de la tarification.

A l'échelle d'un bâtiment, ces leviers de flexibilité sont inexploitable car trop dépendants de l'activité des occupants. Agrégés à l'échelle quartier, les tendances commencent à être plus claires grâce au foisonnement des usages comme exposé en Figure 6. Ces résultats ont été obtenus avec les valeurs par défaut du Tableau 1 et sont exprimés en relatif ($\Delta P(t) = P_{flex}(t) - P_{no\ flex}(t)$). On observe une diminution de la consommation électrique de chauffage et des usages blancs lors de l'activation de la flexibilité. Dans la suite de l'étude, l'**indicateur de flexibilité** (eq. 1) utilisé pour évaluer la sensibilité des différents paramètres est la diminution moyenne de puissance par foyer (évaluée dans les n_{HH} logements) entre 18:00 et 21:00 (avec un pas de temps de calcul Δt de 10 minutes) le 26 Janvier :

$$\overline{\Delta P_{flex}} = \frac{1}{n_{HH}} \sum_{n_{HH}} \left(\frac{\Delta t}{60 \times 3} \sum_{t=26/01\ 18:00}^{t=26/01\ 21:00} \Delta P(t) \right) \quad [W/hh] \quad (1)$$

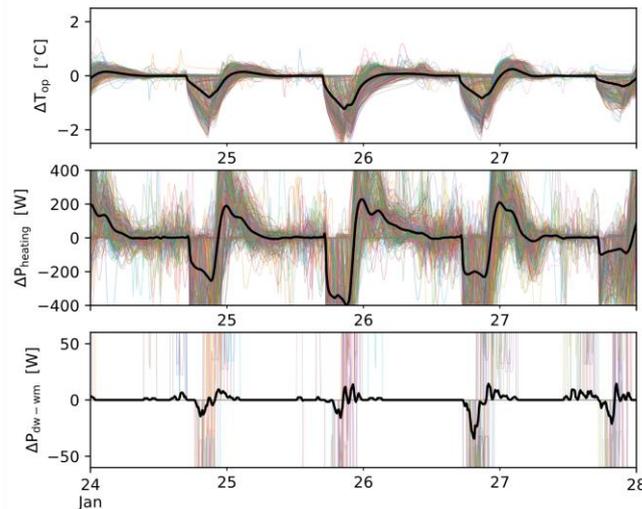


Figure 6 : Evolution de température et de la puissance électrique dans les 337 logements pendant la semaine du 26 Janvier (puissance et température moyenne en noir).

3. METHODOLOGIE DE L'ETUDE DE SENSIBILITE

L'objectif de l'étude de sensibilité est d'évaluer l'influence de l'occupant sur la flexibilité d'un quartier, afin d'identifier les paramètres devant être connus/caractérisés pour mieux maîtriser ce levier de flexibilité. On ne s'intéresse donc pas aux paramètres liés aux caractéristiques physiques d'un quartier (surfaces, orientations, niveaux d'isolation, systèmes), bien qu'on sache qu'ils influent sur le levier de flexibilité (Le Dréau et al., 2019). La météo influe également sur ce levier de flexibilité (Figure 6), nous étudierons ici seulement le 26 Janvier qui est considéré comme une journée représentative des conditions hivernales (moyenne saison de chauffe). La liste et la distribution des paramètres étudiés est donnée au Tableau 1. Ces paramètres sont liés à la typologie d'occupant, à la nature de leurs activités, ou à leurs préférences vis-à-vis de la flexibilité.

L'analyse de sensibilité est réalisée par la méthode de Morris pour 10 trajectoires différentes. Cette méthode a été sélectionnée pour sa robustesse et sa rapidité de convergence (Goffart et Woloszyn, 2018). Un total de 80×2 simulations, répétées pour 5 scénarios de nombres aléatoires (*seed*), a donc été effectué sur le quartier Atlantech.

	Paramètres	Distribution	Valeur par défaut
Typologie occupants	Nombre moyen d'occupants par logement (<i>occNbr</i>)	Uniforme [1 ; 4]	2.22
	Pourcentage d'actifs avec emploi (<i>occPctEmployed</i>)	Uniforme [26% ; 66%]	46%
	Activités des occupants (<i>seed</i>)	Random [1 ; 9998]*	17
Chauffage	Température de confort (<i>heatingSP</i>)	Uniforme [18°C ; 22°C]	21°C
	Usage du réduct d'absence (15°C) & nuit (18°C) (<i>heatingEco</i>)	Binaire [Oui / Non]	Non
	Tolérance diminution de température (<i>flexdT</i>)	Uniforme [-2°C ; -0.5°C]	-2°C
Lave-vaisselle	Probabilité moyenne de déplacer le cycle (<i>flexWmCycles</i>)	Uniforme [20% ; 70%]	40%
Lave-linge	Probabilité moyenne de déplacer le cycle (<i>flexDwCycles</i>)	Uniforme [10% ; 60%]	30%

Tableau 1 : Variation de paramètres considérée (* influence évaluée par technique de type Monte Carlo).

4. RESULTATS

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés en Figure 7 pour le chauffage et en Figure 8 pour les usages blancs (machine à laver et sèche-linge). Les barres d'incertitudes représentent l'influence des activités des occupants, représentés dans le modèle par le scénario de nombres aléatoires (*seed*). Afin d'observer l'influence de l'agrégation, les résultats sont présentés pour 10 logements participants à la flexibilité et pour l'ensemble du quartier (337 logements). A partir de ces figures, on peut observer l'effet positif de l'agrégation. Les sensibilités globales diminuent et certains paramètres deviennent très peu sensibles (e.g. le pourcentage d'actifs en emploi). Le nombre d'occupants restent un paramètre important pour le levier de flexibilité (charges internes supplémentaires et utilisation de l'électroménager blanc). Les habitudes de chauffage des occupants ainsi que leur tolérance à la flexibilité restent également des paramètres influents. Il est donc primordial de caractériser correctement l'usage du chauffage et le confort thermique des occupants pour évaluer et piloter le levier de flexibilité.

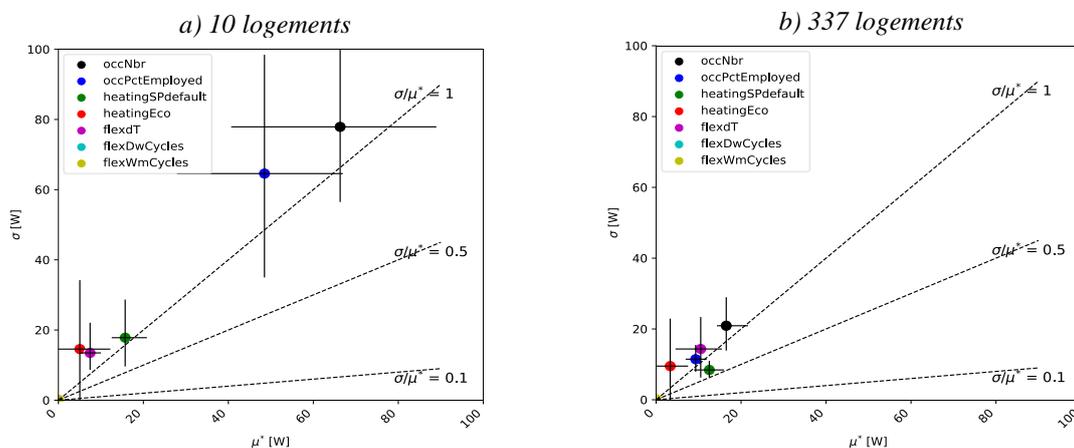


Figure 7 : Résultats pour le criblage des paramètres par la méthode de Morris, chauffage seul.

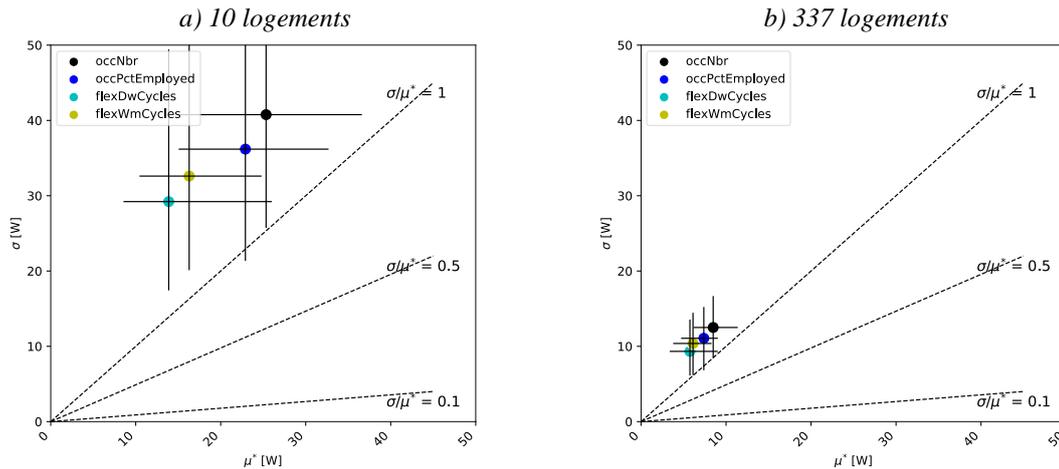


Figure 8 : Résultats pour le criblage des paramètres par la méthode de Morris, usages blancs.

5. CONCLUSION

Les bâtiments disposent de flexibilités importantes en modulant, par exemple, les usages thermiques. Les interactions entre les occupants et ces charges flexibles peuvent influencer le potentiel de flexibilité. L'influence du comportement humain sur ce potentiel a donc été étudié en simulant le comportement thermique et énergétique d'un quartier en cours de construction à La Rochelle. L'analyse de sensibilité réalisée a montré que le comportement des occupants reste un paramètre important sur ce levier de flexibilité, bien que l'effet d'agrégation atténue l'influence de certains paramètres. Il convient donc de le caractériser correctement, notamment sur la tolérance aux changements de température et à l'usage du réduit. Une analyse d'incertitude sera conduite par la suite, pour évaluer la pilotabilité de ces charges flexibles.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Ademe. 2018. Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060.
- Ademe. 2019. Projet PECOIC : prise en compte du comportement des occupants et incertitudes.
- INSEE. 2010. Enquête Emploi du temps. 2009-2010 / Enquête Couples - Familles – Ménages. 2010.
- Frayssinet. 2018. Adapting buildings heating and cooling power need models at the district scale. PhD Thesis.
- Goffart J., Woloszyn M. 2018. RBD-FAST : une méthode d'analyse de sensibilité rapide et rigoureuse pour la garantie de performance énergétique, Conférence IBPSA, France.
- Le Dréau J, Mellas I, Vellei M, Meulemans J. 2019. Upscaling the flexibility potential of space heating in single-family houses. Conference CISBAT, Switzerland.
- Jensen SØ, Marszal-Pomianowska A, Lollini R, Pasut W, Knotzer A, Engelmann P. 2017. IEA EBC annex 67 energy flexible buildings. Energy and Building 155, pp.25-34.
- Riederer P, Partenay V, Perez, N, Nocito C, Trigance R, Guiot T. 2015. Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances. Conférence IBPSA, India.
- RTE. 2017. Réseaux électriques intelligents - valeur économique, environnementale et déploiement.
- Shin, M. and Haberl, J.S. 2019. Thermal zoning for building HVAC design and energy simulation: A literature review. Energy and Buildings, 203, p.109429.
- Vellei M. Le Dréau J, Abdelouadoud Y. 2020. Predicting the demand flexibility of wet appliances at national level: The case of France. Energy and Buildings, vol 214.
- Vorger E. 2015. Etude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment. Thèse de doctorat, Mines ParisTech.