

Annexes – Analyser la pertinence énergétique des technologies connectées

Note de bas de page dans le rapport principal	Annexe(s) correspondante(s)
3	3, 4, 5
5	1
6	2
9	1
11	3
13	3
16	4
17	2
24	1
25	2
28	8
29	8
30	8
31	8
33	8
34	8
36	8
37	1, 3, 4, 5
40	9
46	10
54	11

Annexe 1 • Hypothèses de construction du modèle STERM.....	2
Annexe 2 • Détails de la campagne de mesure	4
Annexe 3 • Formalisation mathématique de la pertinence énergétique (détails de calcul)	7
Annexe 4 • Formalisation mathématique de la variabilité des comportements.....	8
Annexe 5 • Description et implémentation du modèle.....	9
Annexe 6 • Guide pour lecture des figures.....	10
Annexe 7 • Cas d'étude : le local résidentiel.....	13
Annexe 8 • Cas d'étude : les locaux professionnels tertiaires	17
Annexe 9 • Cas d'étude : Rénovation d'un local tertiaire.....	22
Annexe 10 • L'éclairage public	25
Annexe 11 • L'exemple du compteur communicant	27

Annexe 1 • Hypothèses de construction du modèle STERM

Données de mapping utilisées pour l'évaluation de l'énergie grise disponibles dans le tableau « [STERM] Embodied energy », sur le site de The Shift Project.

- La phase de fin de vie n'est pas prise en compte : en cohérence avec les méthodologies adoptées dans nos précédents travaux (The Shift Project, 2018) et au vu des données disponibles, ne sont considérées que les phases de production et d'utilisation des équipements.
- Les impacts de la phase d'installation du système (chez un particulier, par exemple) n'ont pas été pris en compte.
- **La quantification de l'énergie grise** pour l'électronique présente dans le système est établie sur la base d'une cartographie au meilleur candidat dans la base de données « GaBi Electronics XI » de la société SPHERA-THINKSTEP¹, avec comparaison des ordres de grandeurs obtenus à la littérature disponible. La quantification est réalisée pour les composants structurants :

Seuls les ICs, le PCB et les inductances volumineuses ont été considérées dans la quantification de l'énergie grise. Le casing ainsi que les autres composants n'ont pas été considérés. L'impact de la production des piles pour le capteur de présence n'a pas été intégré.

- La quantification des gains énergétiques potentiels est exprimée en énergie primaire. Un facteur de conversion moyen (i.e. $C = 3$) a été considéré entre kWh_{elec} et kWh_{primaire} (Taylor, 2015).
- Le profil de puissance à l'utilisation a été défini par une limite basse, confirmée par les mesures électriques réalisées².
- L'échange dynamique de données dans le système local n'est pas considéré et les communications vers un éventuel cloud ou réseau externe (par exemple, internet) ne sont pas considérées.
- Quelle que soit la configuration choisie, un *gateway*³ doit systématiquement être présent puisqu'il fonctionne comme coordinateur de ce réseau connecté. Aussi, en accord avec les spécifications techniques du système considéré, un *gateway* peut gérer un maximum de 50 connections (lampes, capteurs, ...).
- Concernant les gains énergétiques potentiels rendus possibles par l'intégration de ce genre de système, ils ont été évalués via une analyse de la littérature disponible (Martirano, L., 2011), (Lin, et al., 2019), (Tejani, Al-Kuwari, & Potdar, 2011).
- La durée de vie du système a été fixée à 5 ans.
- Les lampes connectées considérées sont uniquement de type LED :

La durée de vie d'une LED a été fixée à 25000 h, bien que techniquement la définition de cette durée de vie ne suit pas une métrique précise et partagée dans le monde de l'éclairage. Plusieurs valeurs allant de 15000h à 25000h sont souvent mentionnées.

Au niveau luminaires, seules les lampes E27 White PHILIPS HUE ont été analysées.

¹ <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2020-lci-documentation/extension-database-xi-electronics/>

² Détails de la campagne de mesures réalisées disponibles en Annexe.

³ cf. définition dans la description du système : section B.1 de cette partie.

- Trois cas sont considérés pour la phase d'utilisation et pour la phase de production :
 - Un cas « limite basse » : Pour la phase d'utilisation, on considère une consommation de veille résultant d'une mesure⁴ pour les lampes connectées lorsqu'elles sont éteintes. On considère que le *gateway* est en veille 99% du temps. Pour la phase de production, une quantification optimiste a été réalisée⁵.
 - Un cas « moyen » : Pour la phase d'utilisation, on considère une consommation de veille respectant les spécifications annoncées par le fabricant pour les lampes connectées lorsqu'elles sont éteintes, hormis pour le *gateway* qui ne semble jamais rentrer en veille en pratique. Pour la phase de production, une quantification « au meilleur candidat » a été réalisée.
 - Un cas « limite haute » : Pour la phase d'utilisation, on considère une consommation de veille respectant les spécifications annoncées par le fabricant pour les lampes connectées lorsqu'elles sont éteintes, hormis pour le *gateway* qui ne semble jamais rentrer en veille en pratique. Pour la phase de production, une quantification « au meilleur candidat » a été réalisée.
- Le capteur de présence permet de basculer les luminaires entre les positions « allumés » et « éteints » en fonction de la présence de mouvement dans sa zone de détection. La fonctionnalité de *dimming*, qui consiste en une adaptation dynamique des luminaires en fonction de l'illumination courante et détectée par le capteur, n'est pas considérée ici⁶.

⁴ Lien vers la mesure utilisée : <https://www.anandtech.com/show/6805/philips-hue-automated-home-lighting-gets-colorful/6>.

⁵ Détails des évaluations de l'énergie grise disponibles en Annexe.

⁶ Le modèle construit permet cependant d'intégrer une simulation de ce type d'usage : jouer sur une atténuation de l'éclairage fera varier la consommation du luminaire, ce qui peut être traduit par une variation du coefficient d'économie d'énergie α (comme détaillé dans ce rapport).

Annexe 2 • Détails de la campagne de mesure

Des mesures élémentaires de premier ordre ont été réalisées pour mieux cerner les profils de consommation des différentes parties du système d'éclairage intelligent considéré. Dû au COVID-19 et aux conditions particulières de la période de confinement qui en a résulté, un accès matériel limité n'a pas permis d'obtenir les courbes AC courant-tension et/ou de mesurer directement la puissance via les signaux AC. Le matériel de mesure qui a été utilisé est composé des appareils suivants :

- DMM 7510 Multimeter, Tektronix, Keithley ;
- AC Power Source 2240, 230V/500W, PeakTech ;
- DC Power Supply PS3003 with double LCD display ;
- DMM Fluke 117 ;
- Un montage *custom* (ouverture simple de la ligne) permettant la mesure du courant via le DMM7510.

Les 2 principaux objectifs étaient (1) d'obtenir une valeur moyenne de consommation pour chacun des nœuds dans un cadre d'utilisation typique et (2) d'avoir une meilleure compréhension du *duty cycle* des différents modes de fonctionnement (principalement actif, veille) pour les différents nœuds.

- Pour le **gateway**, le courant *en aval* du convertisseur AC/DC a été mesuré, permettant donc de calculer la puissance consommée (après le convertisseur) puisque la tension est constante (DC, 5V). **La valeur moyenne obtenue est de $0,2585 \text{ A} \times 5 \text{ V} = 1,2925 \text{ W}$** . Des mesures de courant AC ont également été faites *en amont* du convertisseur AC/DC. Cependant, dû aux limitations mentionnées ci-dessus, cela n'a pas permis de définir précisément la consommation électrique moyenne du *gateway* (depuis mesures AC). Il est à noter que les signaux mesurés ne sont pas des sinusoïdes mais des signaux type « switched-mode power supply » (SMPS), ce qui impacte le calcul de la puissance. Des simulations ont été réalisées pour obtenir une approximation de la puissance mais cela dépasse le cadre de ce rapport et n'est donc pas considéré ni utilisé ici. Les mesures réalisées ici ne semblent donc **pas remettre en cause les spécifications du constructeur** vis-à-vis de la consommation maximale de son produit (environ **1,25 W**), bien que les résultats soient légèrement supérieurs (environ +3%). **Par contre**, les mesures réalisées semblent montrer que **le gateway ne se met jamais en veille**, ce qui ne semble pas aligné avec les indications données par le constructeur.

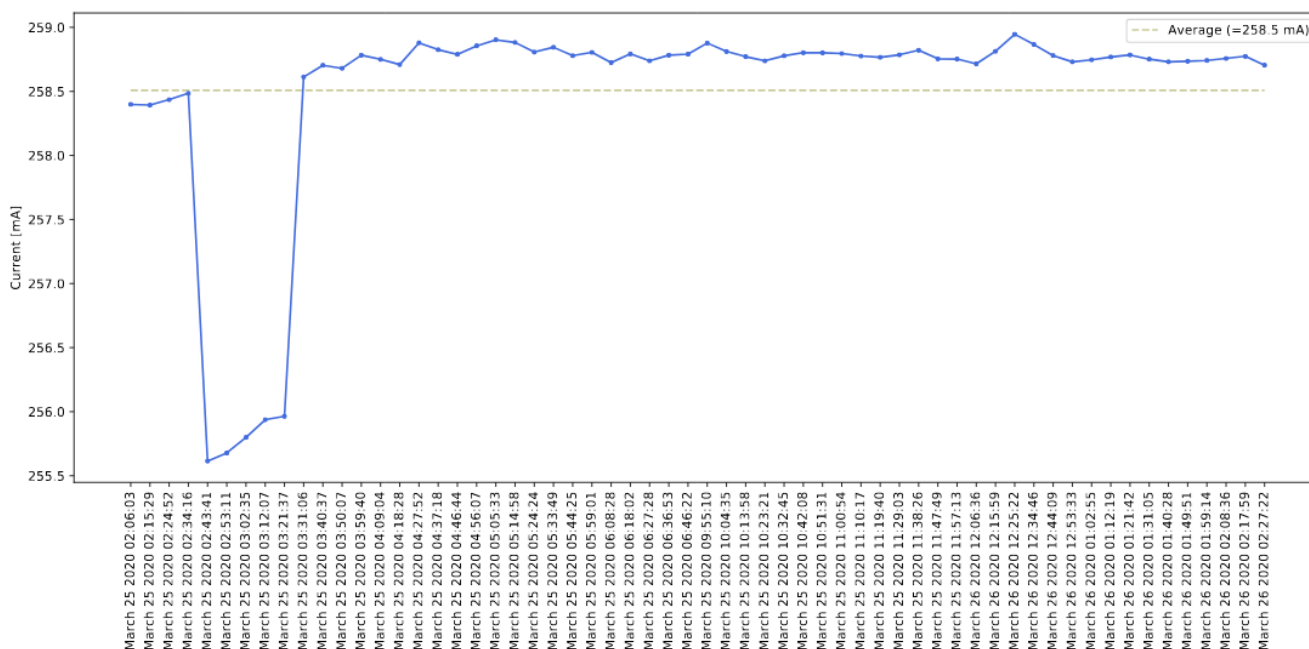


Figure 1 – Consommation moyenne de courant du gateway PHILIPS HUE sur des intervalles de 60 secondes

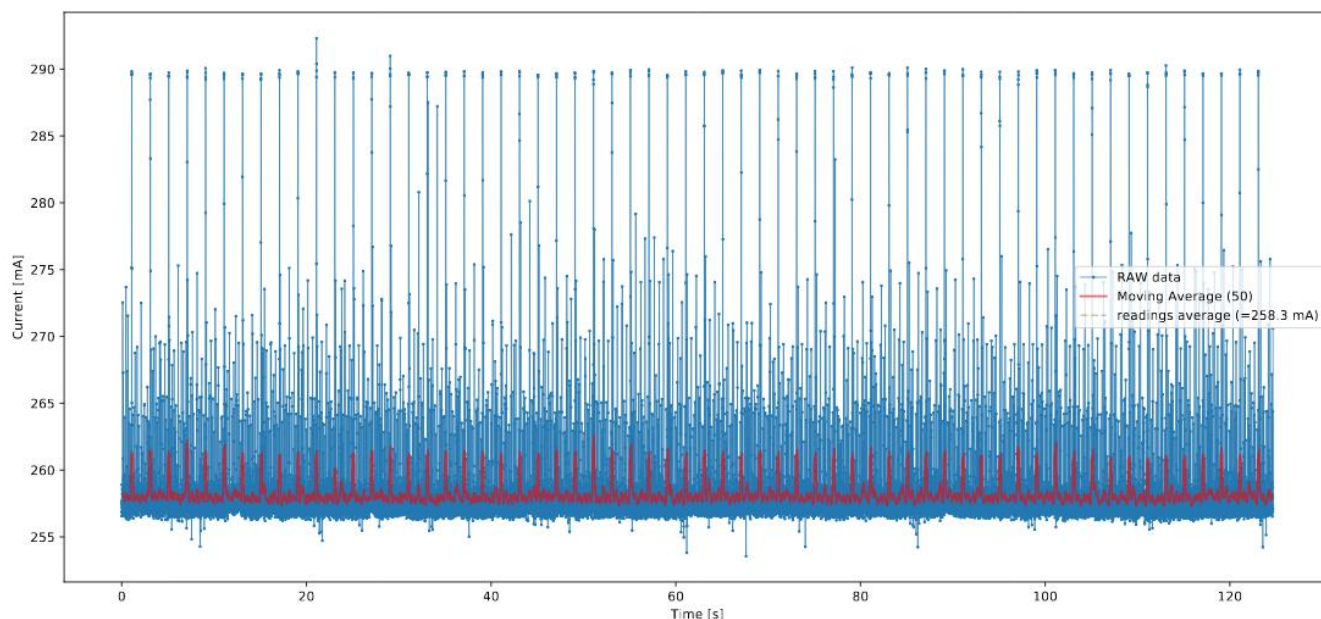


Figure 2 – Profil du courant traversant le hub PHILIPS HUE sur un intervalle de temps de 120 secondes

- Pour la **lampe connectée**, seul le courant AC a été mesuré (cf. limitations des possibilités dues au confinement). Il est à noter que les signaux mesurés ne sont pas des sinusoïdes mais des signaux type « switched-mode power supply » (SMPS) comme illustré ci-dessous, ce qui impacte le calcul de la puissance. Des simulations ont été réalisées pour obtenir une approximation de la puissance mais cela dépasse le cadre de ce rapport et n'est donc pas considéré ni utilisé ici. Il a donc été choisi de considérer les spécifications données par le fournisseur ainsi que deux autres sources pour comparaison (Friedli, Kaufmann, Paganini, & Kyburz, 2016), (Joshi, 2013). **Une consommation électrique de 0,4 à 0,5 W a été considérée ici lorsque la lampe est éteinte.**

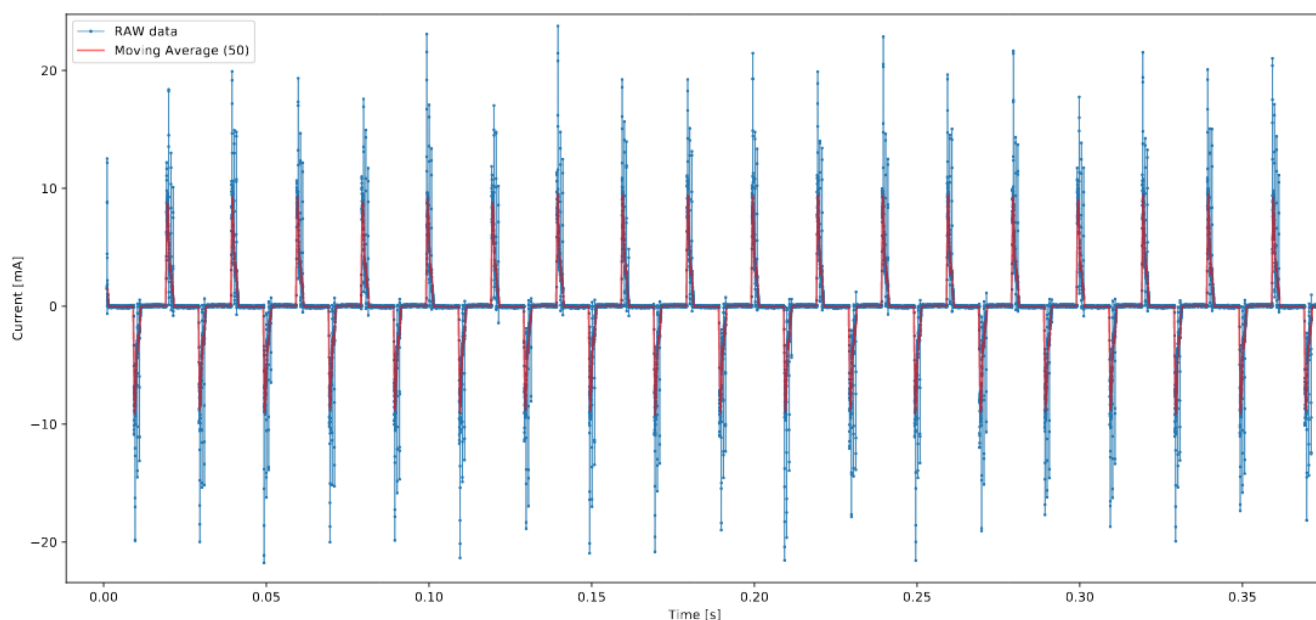


Figure 3 – Profil de courant AC mesuré sur la lampe connectée lorsque la lampe est éteinte

- Pour le **détecteur de présence**, le courant d'alimentation a été mesuré en fournissant la tension nominale (i.e. 3V DC) via un générateur de tension (DC Power Supply PS3003) au lieu des piles (2 x AAA, 1.5 V). Un profil type du courant mesuré est présenté ci-dessous. Ce genre de profil est caractéristique de nœuds mobiles IoT (Gray, 2018) et était répété à intervalles de temps constants (environ toutes les 5 secondes). Cela conduit à un *duty cycle* approximatif de 95%-5% (veille-actif). Un profil similaire a lieu lorsqu'un

évènement est généré par la détection d'un mouvement par le capteur. Il est clair que la gestion de la consommation énergétique de ce nœud reflète la contrainte d'énergie limitée due à la batterie. Cependant, ce nœud étant alimenté par des piles, **sa consommation électrique lors de l'utilisation n'est pas comptabilisée.**

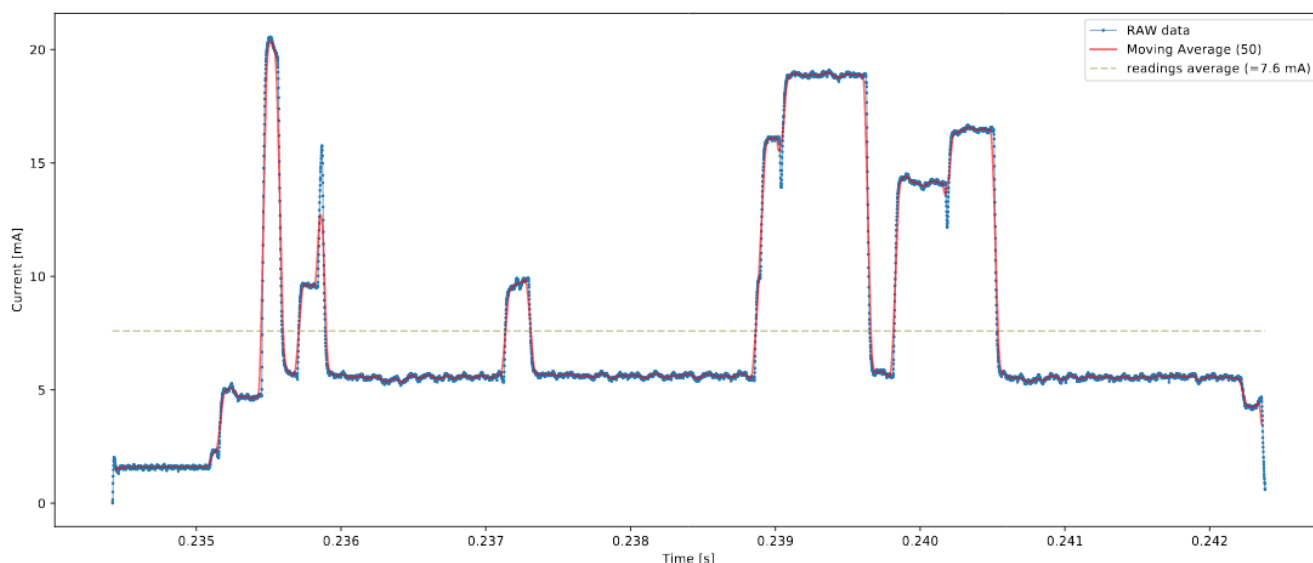


Figure 4 – Profil de courant type pour le capteur de présence

Il est important de noter que parmi ces trois nœuds, **seul le capteur de présence semble présenter une gestion appropriée de sa consommation d'énergie.** En effet, il y a bien présence d'une alternance entre mode veille et mode actif avec un *duty cycle* cohérent pour l'IoT (Bol, Boyd, & Dornfeld, 2011). Cette gestion précise est certainement due à la contrainte d'alimentation sur batterie, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres nœuds (directement connectés au réseau électrique). **Ceci rejoint le constat d'un rapport indépendant** (Friedli, Kaufmann, Paganini, & Kyburz, 2016) qui souligne que d'importantes améliorations doivent être réalisées par les producteurs de ce genre d'équipements en appliquant les mêmes contraintes de consommation électrique que pour des systèmes sur batterie.

Annexe 3 • Formalisation mathématique de la pertinence énergétique (détails de calcul)

Afin d'évaluer la pertinence **énergétique** de l'introduction d'une couche smart dans un environnement, une fonction de coût global $G(t)$ peut être définie (démarche similaire à (Kumar T., 2017) et (Van Dam, 2013)) :

$$G(t) = C \cdot E_{savings}(t) - E_{smart}(t)$$

, soit :

$$G(t) = C \cdot E_{savings}(t) - \underbrace{(E_{embodied}^{smart}(t) + C \cdot E_{funct}^{smart}(t))}_{E_{smart}(t)}$$

Cette fonction évalue, en fonction du temps, le gain énergétique (en énergie primaire) net $G(t)$ réalisé en tenant compte :

- Du facteur de conversion C d'énergie électrique en énergie primaire⁷.
- De la diminution de consommation énergétique occasionnée par une meilleure gestion de l'infrastructure, où $\alpha(t)$ est la fraction de l'énergie consommée (en supposant $\alpha(t) = \alpha_0$) et $P(t)$ la consommation instantanée :

$$E_{savings}(t) = \int \alpha(t)P(t) dt = \alpha_0 \beta \mu_{Conso}^{baseline} \cdot t$$

, où α est appelé « coefficient d'économie d'énergie » et β le ratio entre le temps ON et OFF du système dans l'application initiale⁸.

- De l'énergie de fonctionnement ainsi que de l'énergie grise nécessaire pour produire les différents éléments de la couche intelligente et connectée⁹ :

$$E_{smart}(t) = E_{embodied}^{smart}(t) + C \cdot E_{funct}^{smart}(t)$$

$$E_{embodied}^{smart}(t) = \sum_i E_{LC_i}^{smart} + E_{maintenant}^{smart}(t) = \sum_i E_{LC_i}^{smart} + \underbrace{\frac{E_{replacement}}{T_{replacement}}}_{\mu_{Maintenance}^{smart}} \cdot t$$

$$\sum_i E_{LC_i}^{smart} = E_{RawMaterials}^{smart} + E_{Manufacturing}^{smart} + \frac{E_{transport}^{smart}}{T_{transport}} + \frac{E_{EoL}^{smart}}{T_{EoL}}$$

$$E_{funct}^{smart}(t) = \int P_{Operation}^{smart}(t) dt = \mu_{Operation}^{smart} \cdot t$$

L'analyse de cette fonction permet d'obtenir le point dit de neutralité énergétique, qui correspond au temps d'amortissement, ou **temps de récupération**, à partir duquel les économies permises par l'introduction de la couche intelligente compensent le coût énergétique de sa production et de son exploitation.

Ce point de neutralité énergétique est défini par $G(T_{PB}) = 0$, où T_{PB} ¹⁰ est le temps de récupération (i.e. « *payback time* ») mentionné précédemment, et s'exprime selon l'expression suivante :

$$T_{PB} = \frac{\sum_i E_{LC_i}^{smart}}{C \alpha_0 \beta \mu_{Conso}^{baseline} - C \mu_{Operation}^{smart} - \mu_{Maintenance}^{smart}}$$

⁷ Une valeur de $C=3$ a été considérée dans ce rapport (Taylor, 2015)

⁸ Par exemple, pour une lampe allumée 3 heures par jour : $\beta = 3/24 = 0.125$

⁹ Dans la dernière équation est formulée l'hypothèse que la consommation électrique peut être ramenée à un profil de puissance moyen sur la durée correspondante. Cette hypothèse en approche moyenne est cohérente avec le degré de précision du modèle tel qu'il est actuellement construit.

¹⁰ Expression mathématique de T_{PB} disponible en annexe.

Annexe 4 • Formalisation mathématique de la variabilité des comportements

En pratique cependant, les gains réalisés grâce à l'introduction de la couche intelligente et connectée ne sont pas systématiquement constants dans le temps – notamment, par exemple et comme exploré dans la suite de ce rapport, lorsque les gains d'énergie sont obtenus par des changements de comportement engendrés par l'utilisation des nouveaux outils connectés. Cette variation temporelle des gains permis par la technologie peut être modélisée par l'introduction d'une dépendance temporelle pour le coefficient d'économie d'énergie α , qui devient $\alpha(t)$.

Plusieurs modèles sont possibles pour décrire les variations du coefficient α , et leur pertinence dépendra du type de phénomène modélisé (type de changement de comportement, par exemple). Dans ce rapport, le modèle qu'il a été choisi d'explorer et mettre en œuvre est celui dit d'« évolution en escaliers » (cf. **Error! Reference source not found.**). Ce choix a été motivé par deux raisons principales :

- Le fait que cette modélisation ait déjà été étudiée dans la littérature aujourd'hui accessible (Van Dam, 2013) nous permet d'en évaluer la pertinence sur la base de travaux précédents.
- Le développement mathématique à la base de ce modèle « en escalier » reste simple et accessible, ce qui facilitera la compréhension puis la réutilisation du modèle présenté dans ce rapport¹¹.

La modélisation en escalier a été réalisée selon les paramètres suivants :

$$\alpha(t) = \begin{cases} r_0 \alpha_0 & \text{si } 0 \leq t < t_1 \\ r_1 \alpha_0 & \text{si } t_1 \leq t < t_2 \\ \dots & \text{si } \dots \\ r_{n-1} \alpha_0 & \text{si } t_{n-1} \leq t < t_n \end{cases}$$

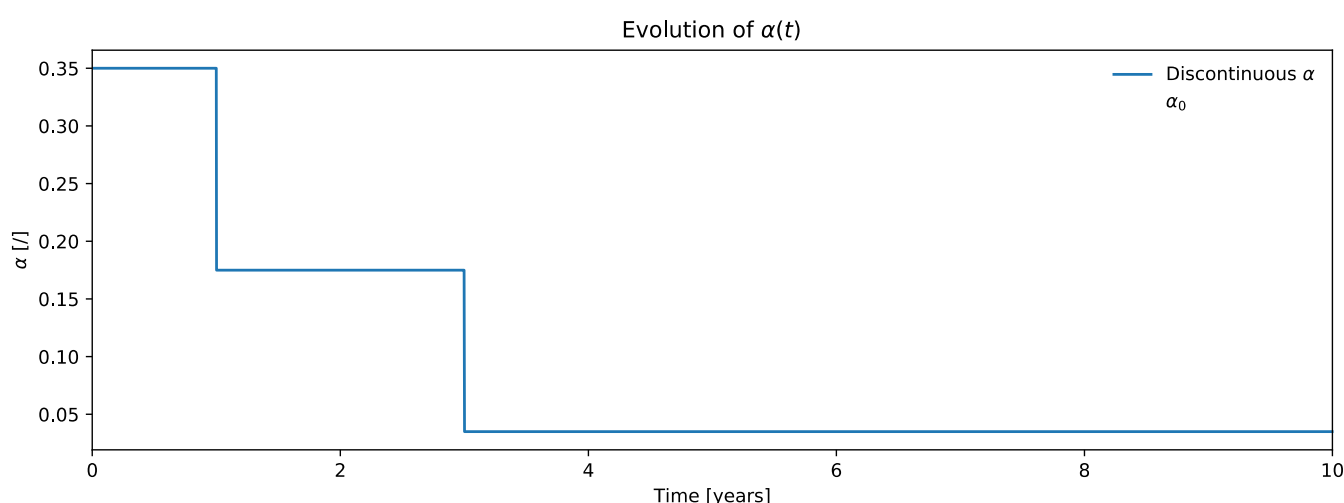


Figure 5 : Evolution de $\alpha(t)$ pour $\alpha_0 = 0.35$, $r_0 = 1$, $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.1$, $t_1 = 1$, $t_2 = 3$, $t_3 = 10$.

$$E_{savings}(t) = \int \alpha(t)P(t) dt = \alpha_0 \beta \mu_{P_{Conso}}^{baseline} \left(\int_0^{t_1} r_0 \alpha_0 dt + \int_{t_1}^{t_2} r_1 \alpha_0 dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^t r_{n-1} \alpha_0 dt \right)$$

$$E_{savings}(t) = \beta \mu_{P_{Conso}}^{baseline} (r_0 \alpha_0 (t_1 - 0) + r_1 \alpha_0 (t_2 - t_1) + \dots + r_{n-1} \alpha_0 (t - t_{n-1}))$$

$$E_{savings}(t) = \alpha_0 \beta \mu_{P_{Conso}}^{baseline} (r_0 (t_1 - 0) + r_1 (t_2 - t_1) + \dots + r_{n-1} (t - t_{n-1}))$$

Le cas $\alpha(t) = \alpha_0$ est récupéré pour $r_0 = r_1 = \dots = r_{n-1}$.

¹¹ La modélisation de $\alpha(t)$ par une exponentielle décroissante a également été développée et implémentée par les membres du groupe de travail dans le cadre des recherches menées (des détails sur ces travaux peuvent être obtenus en entrant en contact avec The Shift Project, pour mise en contact avec les personnes concernées), mais n'est pas publiée dans ce rapport. Il s'agit cependant des pistes de complexification possible du modèle, qui pourront être explorées par les acteurs s'en saisissant.

Annexe 5 • Description et implémentation du modèle

Le **modèle Python** résultant de l'implémentation de la formalisation mathématique du modèle STERM est constitué de **3 blocs principaux**, comme illustré à la Figure 6 :

1. **Un bloc « définition système »** (<NAME>_system.py) qui définit les quantités spécifiques au système sous étude, i.e. énergie grise et énergie en utilisation,
2. **Un bloc « modèle »** (TSP_SMARTX_CONFIG.py) qui implémente le modèle mathématique présenté ci-avant,
3. **Un bloc « main »** (TSP_SMARTX_MAIN.py) pour lancer le modèle avec les paramètres désirés.

Pour des raisons de transparence et pour motiver la réutilisation et l'amélioration du modèle, celui-ci a été rendu totalement OpenSource et est disponible à l'adresse suivante : <https://github.com/STERM-TSP/model>.

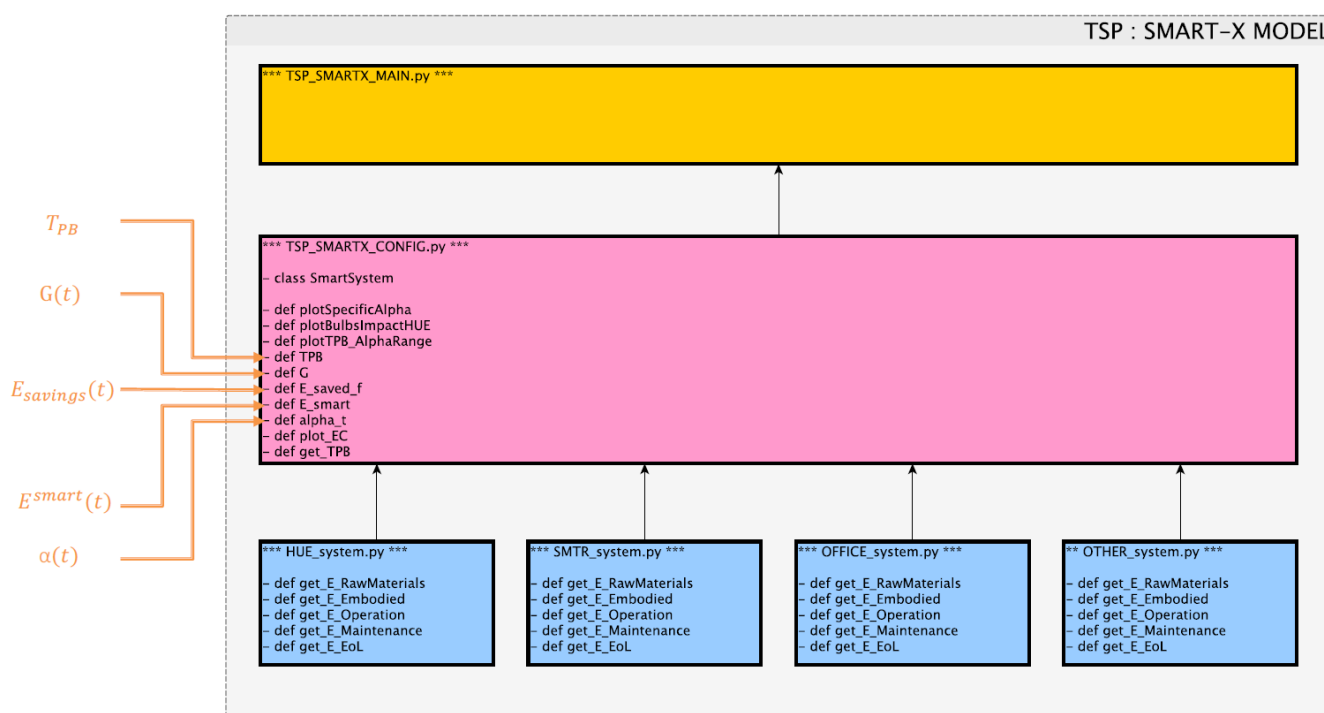


Figure 6 - Architecture du modèle Python (OpenSource)

Annexe 6 • Guide pour lecture des figures

Trois familles de figures sont présentées dans ce rapport :

1. Le temps de récupération T_{PB} en fonction de α_0
2. Les gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0
3. Les courbes des gains énergétiques cumulés en fonction du temps

Ci-dessous, un exemple pour chaque type de figure avec quelques annotations (en orange) permettant de **mieux comprendre comment lire et interpréter ces figures**. Attention, les figures utilisées ci-dessous n'ont aucune valeur en termes de conclusion : leur seul but est de servir de support pédagogique pour cette section sur la lecture des figures présentes dans ce rapport.

Courbes du temps de récupération T_{PB} en fonction de α_0

La visualisation du temps de récupération T_{PB} en fonction de α_0 pour toute la gamme de α_0 – plutôt que pour une valeur unique du coefficient – permet principalement d'observer :

- La limite basse de α_0 en-dessous de laquelle le temps de récupération est inférieur à la durée de vie et d'ainsi évaluer la possibilité pratique de rendre le système pertinent.
- L'influence du comportement de l'utilisateur sur le temps de récupération (via le changement de la valeur du coefficient).

Dans la littérature, il est possible d'obtenir cet indicateur temps de récupération (ou un indicateur proche voir équivalent). Cependant, cela est fait pour des α_0 ponctuels. Une quantification sur l'ensemble des valeurs que peut prendre α_0 permet donc une meilleure compréhension des tendances.

L'impact du comportement utilisateur est observable sur les courbes en pointillé à la Figure 7. Si les gains énergétiques réalisés diminuent au fur et à mesure du temps, cela impacte T_{PB} . Il y a donc un phénomène de « relèvement » de la courbe quantifié dans ce type de figures. Dans le cas où le comportement utilisateur assure des gains constants dans le temps, les courbes en pointillé sont confondues avec les courbes continues.

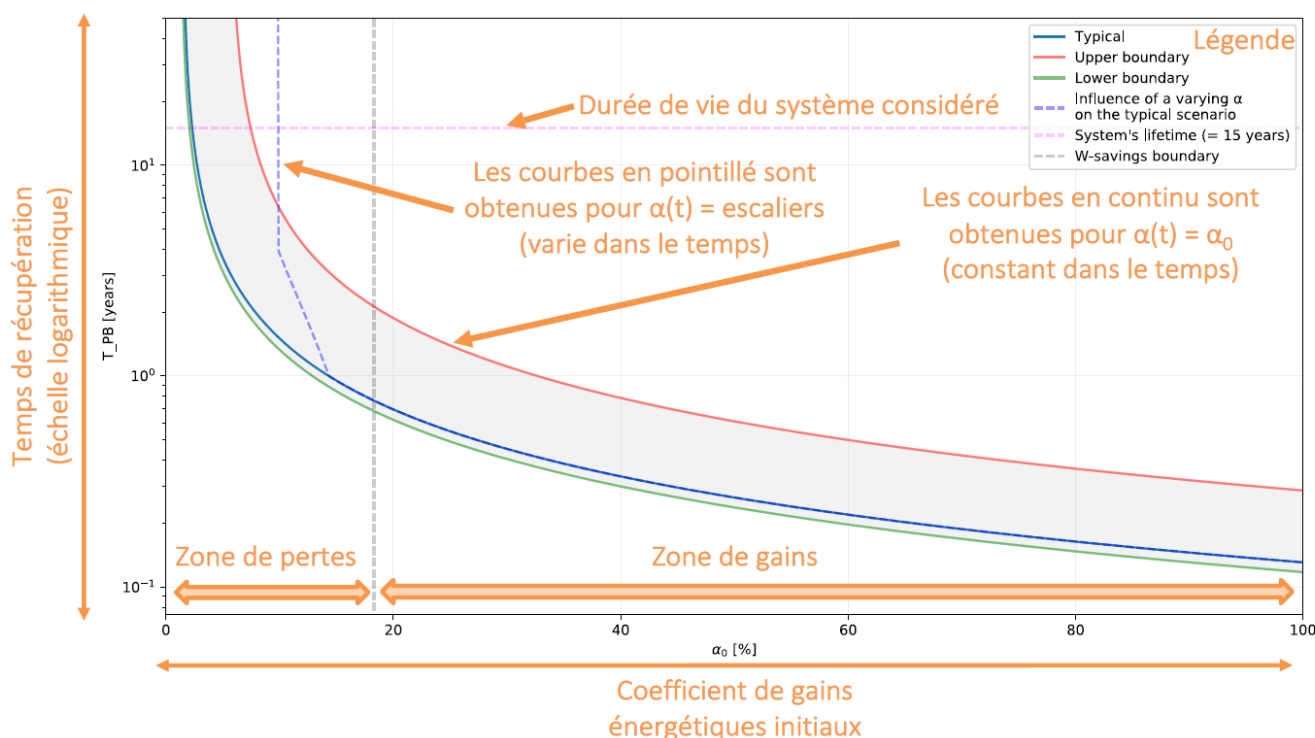


Figure 7 - Temps de récupération en fonction de α_0 - aide à la lecture

- *Typical* : estimation correspondant au cas « moyen » défini précédemment (cf. « A.2. Hypothèses »)
- *Upper boundary* : estimation correspondant au cas « limite haute » défini précédemment
- *Lower boundary* : estimation correspondant au cas « limite basse » défini précédemment
- *Influence of a varying α on the typical scenario* : estimation correspondant au cas « moyen » défini précédemment mais durant lequel alpha varie au court du temps
- *System's lifetime* : durée de vie du système (borne maximale pour le temps de récupération T_{PB})
- *W-savings boundary* : limite basse pour α afin d'assurer un bilan énergétique nul à la durée de vie du système

Courbes des gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0

La visualisation des gains énergétiques nets en fonction de α_0 pour toute la gamme de α_0 permet principalement d'observer :

- La limite basse sur α_0 au-dessous de laquelle les gains énergétiques nets ne peuvent être positifs sur la durée de vie du système.
- L'influence du comportement de l'utilisateur sur les gains énergétiques nets.
- Pour un α_0 et un comportement utilisateur donnés, les gains énergétiques potentiels à la durée de vie du système.

L'impact du comportement utilisateur est observable sur les courbes en pointillé à la Figure 8. Si les gains énergétiques réalisés diminuent au fur et à mesure du temps, cela impacte *de facto* les gains énergétiques réalisés en fin de vie. La zone entre les courbes représente le « manque à gagner » énergétique ou dit autrement, la différence entre une approche théorique qui considère un comportement utilisateur constant et une approche plus proche de la pratique qui essaye de tenir compte de l'impact du comportement de l'utilisateur.

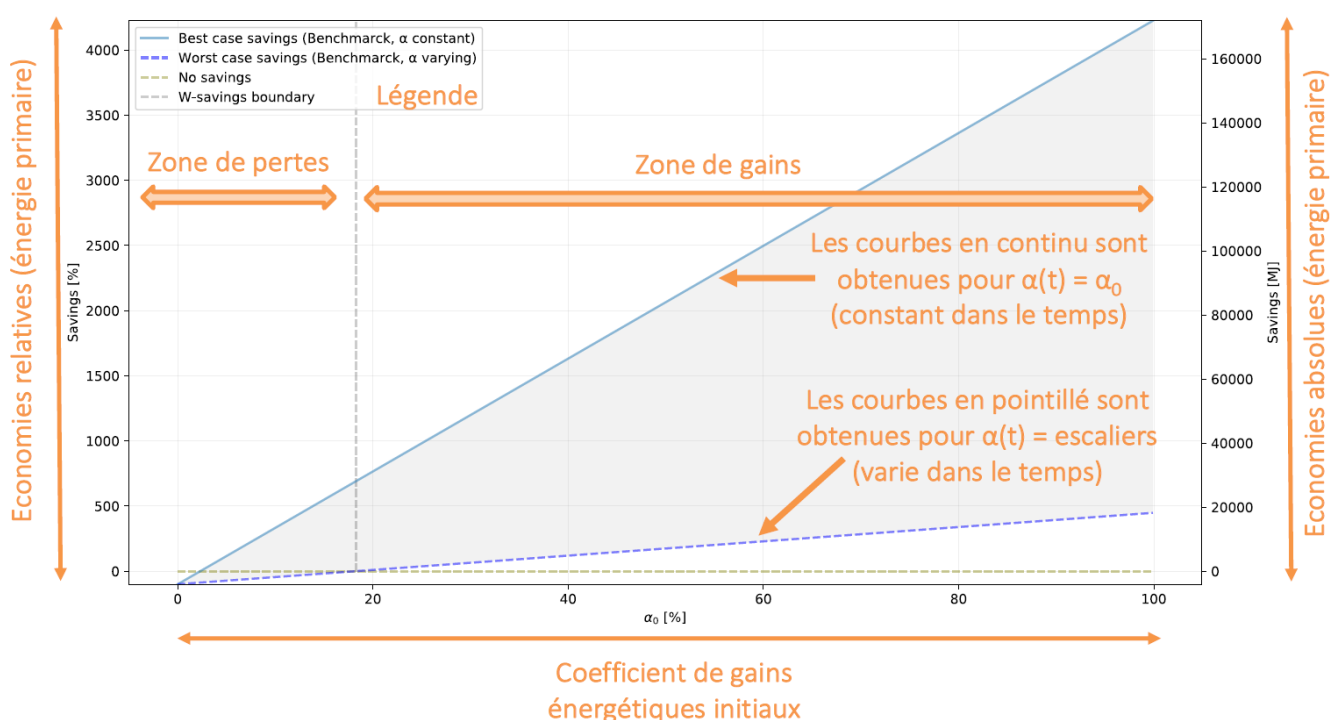


Figure 8 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 - aide à la lecture

- *Best case savings* : gains énergétiques à la durée de vie du système pour α constant dans le temps
- *Worst case savings* : gains énergétiques à la durée de vie du système pour α qui a varié dans le temps
- *No savings* : bilan énergétique nul à la durée de vie du système
- *W-savings boundary* : cfr ci-avant

Courbes des gains énergétiques cumulés en fonction du temps

La visualisation des courbes d'énergie cumulées en fonction du temps a pour objectif de mieux comprendre les interactions entre les différents gains et coûts énergétiques. Cela permet de mieux appréhender les résultats présentés dans les autres figures ainsi que de percevoir les importances relatives entre les différentes quantités en fonction du temps. Par exemple, la Figure 9 permet d'observer la saturation sur les gains énergétiques réalisés au cours du temps si le comportement utilisateur n'est pas idéal.

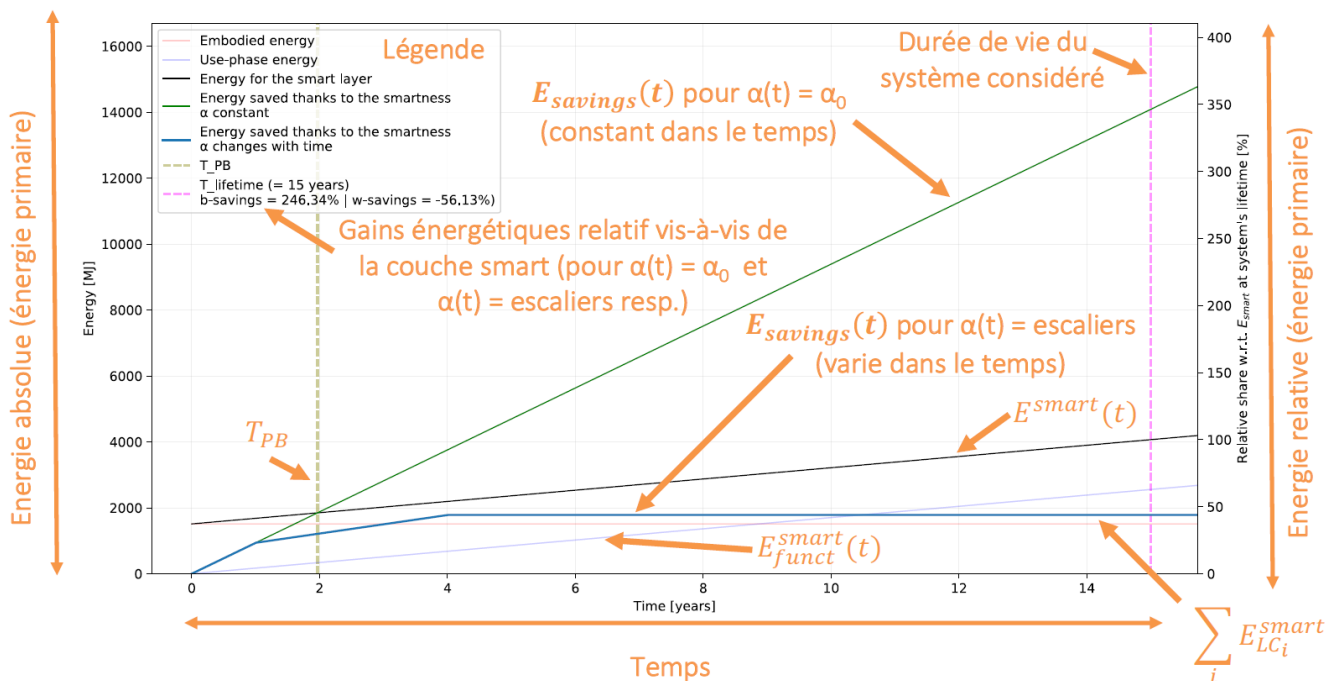


Figure 9 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps - aide à la lecture

- *Embodied energy* : consommation d'énergie due à la phase de production (énergie grise)
- *Use-phase energy* : consommation d'énergie de tout le système en phase d'utilisation
- *Energy for the smart layer* : consommation d'énergie de la couche connectée en phase d'utilisation
- *Energy saved thanks to the smartness* : économies d'énergie due à la couche connectée
- T_{PB} : temps d'amortissement
- $T_{lifetime}$: durée de vie du système

Annexe 7 • Cas d'étude : le local résidentiel

La paramétrisation du modèle STERM associée à ce cas d'étude est disponible dans le tableur « [STERM] Use case param » sur le site de The Shift Project.

Scénario 1

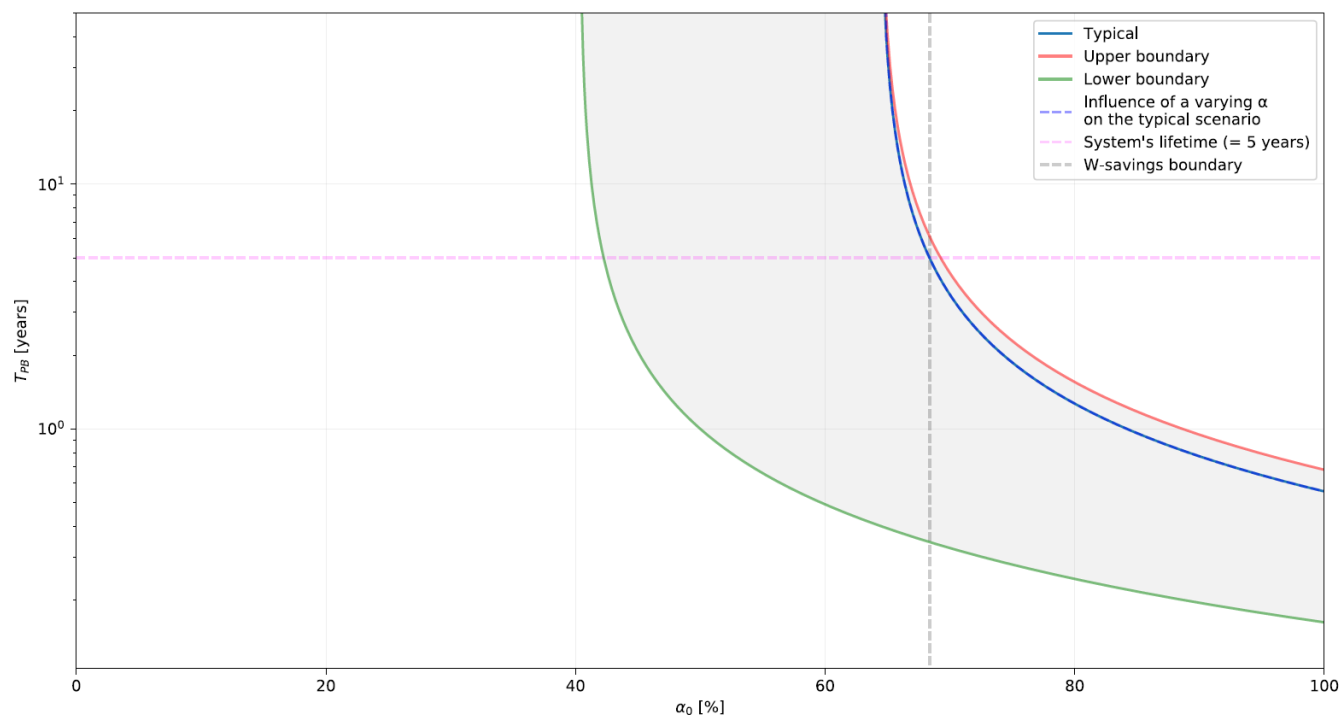


Figure 10 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 1

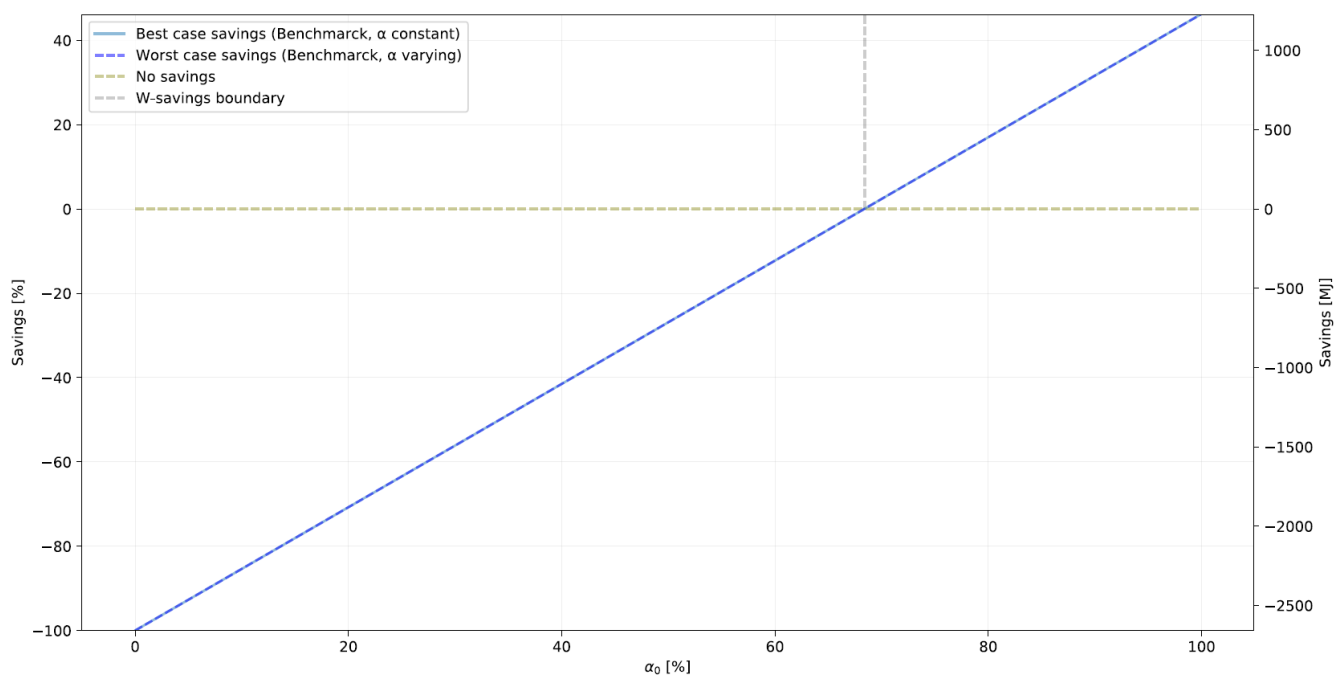


Figure 11 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 1

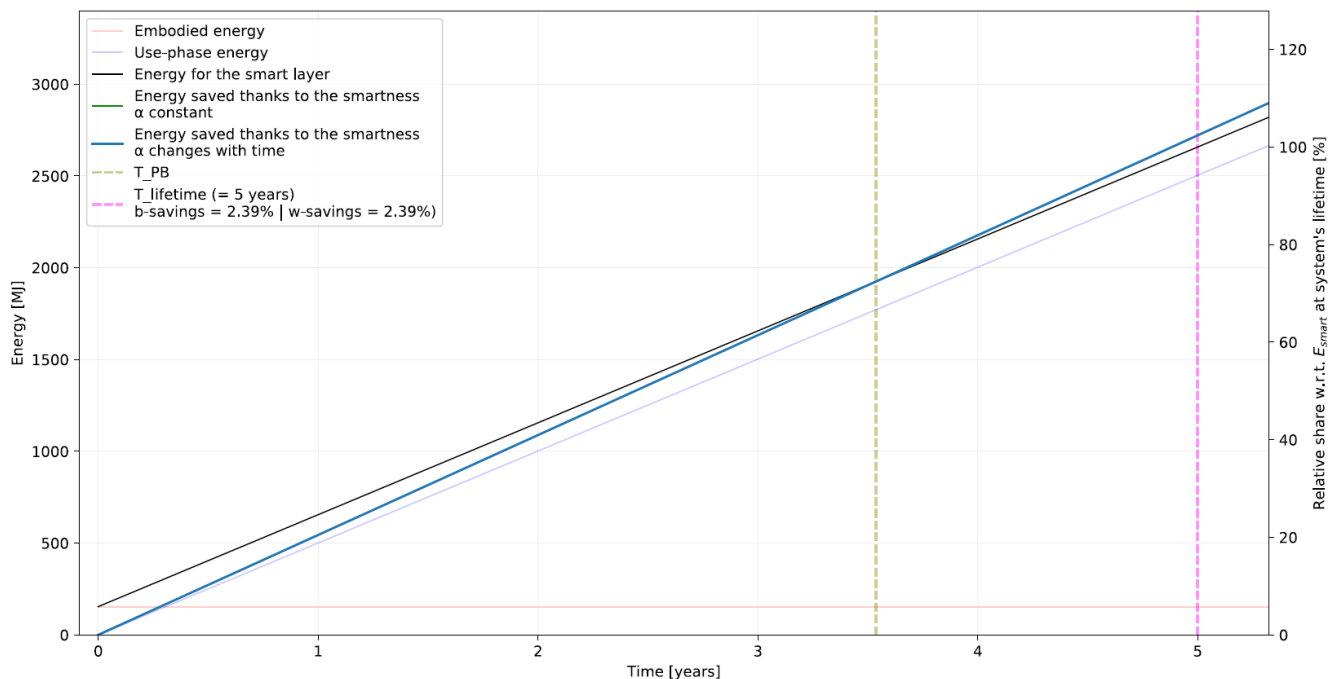


Figure 12 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps – Local résidentiel, scénario 1

Scénario 2

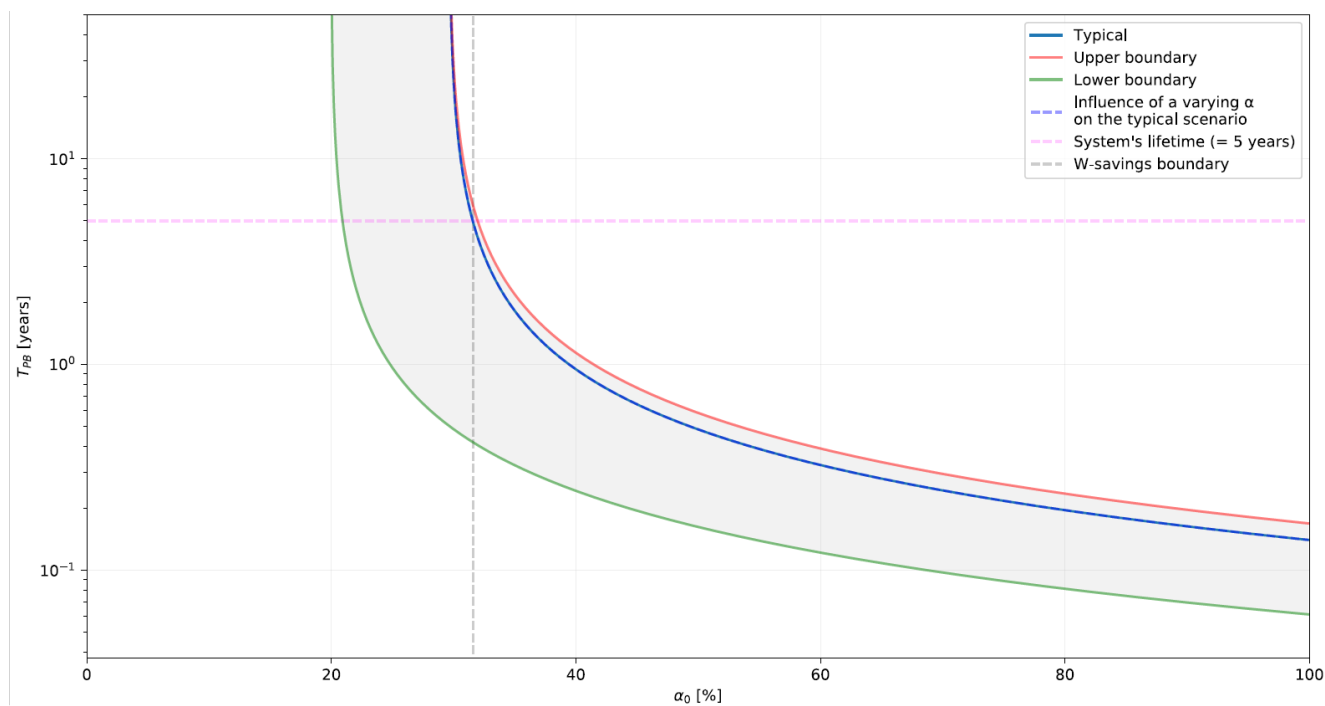


Figure 13 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 2

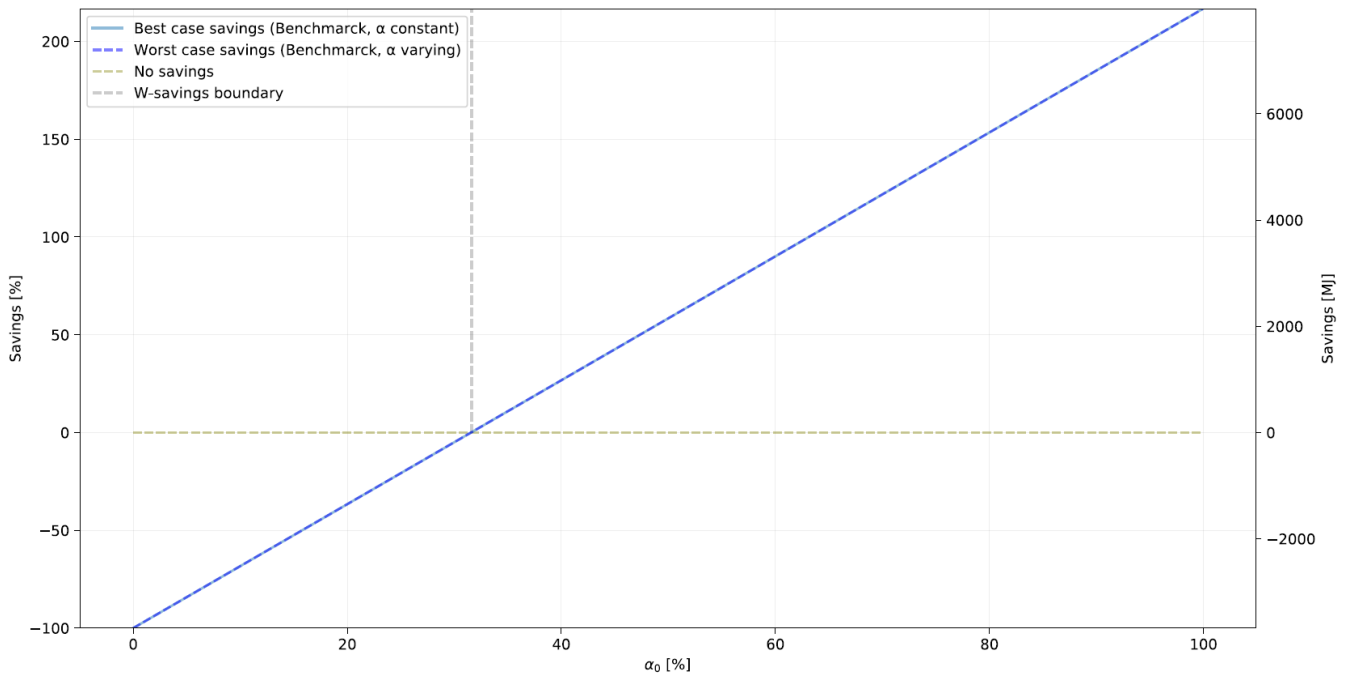


Figure 14 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 2

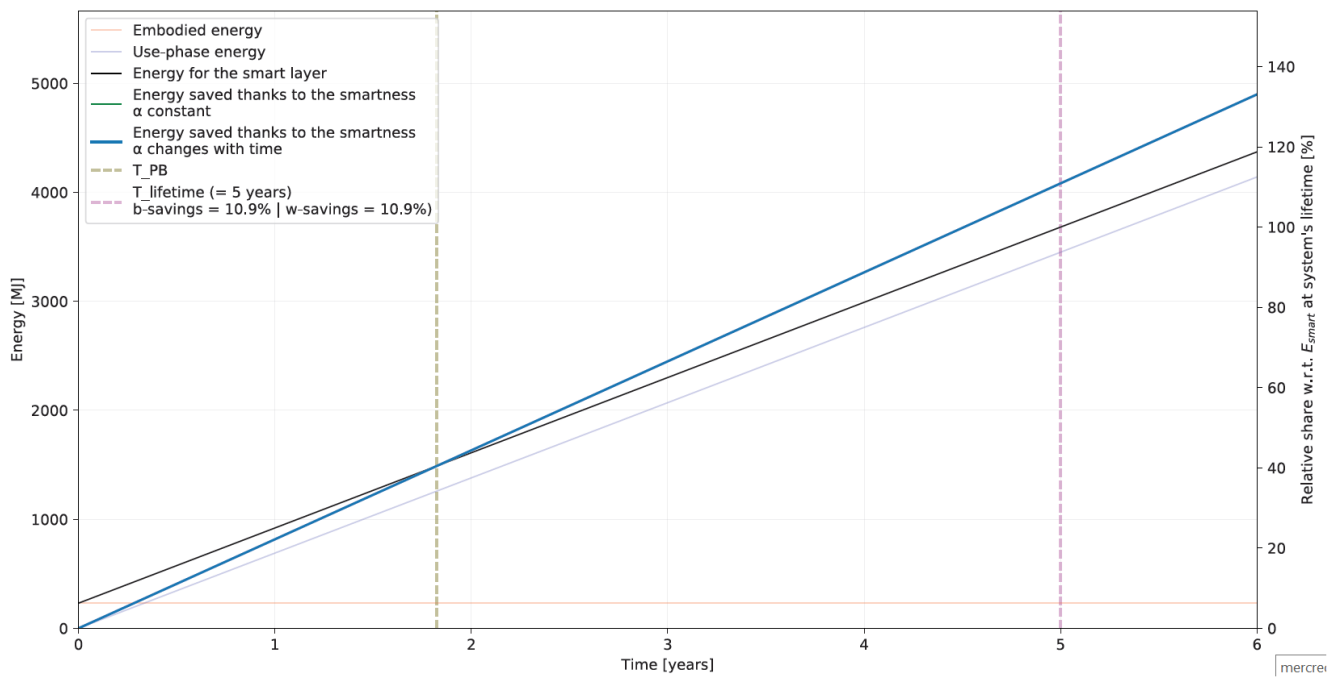


Figure 15 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps – Local résidentiel, scénario 2

Scénario 3

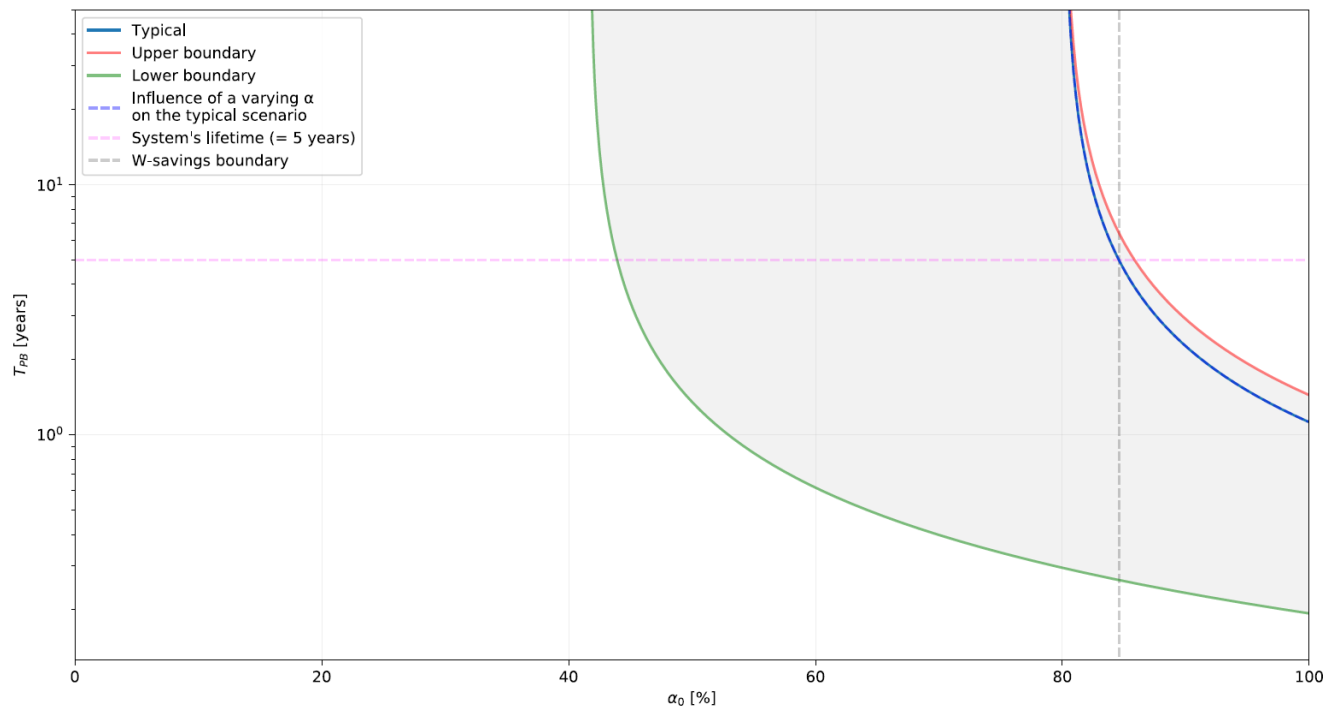


Figure 16 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 3

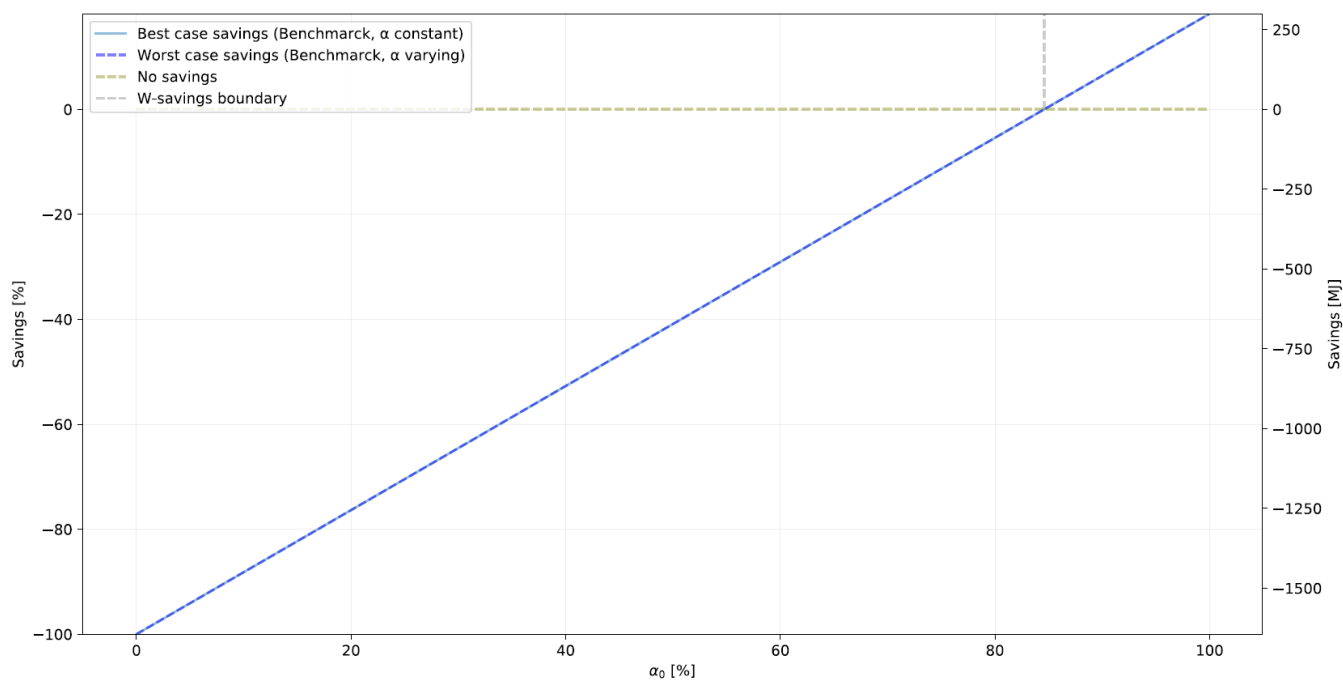


Figure 17 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Local résidentiel, scénario 3

Annexe 8 • Cas d'étude : les locaux professionnels tertiaires

La paramétrisation du modèle STERM associée à ce cas d'étude est disponible dans le tableur « [STERM] Use case param » sur le site de The Shift Project.

Détails des caractéristiques des cas d'étude « locaux tertiaires »

Les modélisations ont été réalisées pour quatre typologies de locaux, illustratives de différents usages professionnels dans le milieu tertiaire :

Local	Longueur côté fenêtre	Profondeur	Hauteur sous plafond	Surface
Bureau individuel	3 m	4 m	2,80 m	12 m ²
Bureau collectif (2 à 3 personnes)	3,85 m	6,23 m	2,80 m	23,8 m ²
Plateau de bureaux	15,60 m	9,62 m	2,80 m	150,07 m ²
Salle d'enseignement	9,60 m	7,20 m	2,80 m	69,12 m ²

Les fenêtres courent sur toute la longueur du mur, comme dans les bâtiments tertiaires classiques. L'allège est de 80 cm et la hauteur de la fenêtre de 1,25 m.

Les quatre locaux étudiés sont orientés de la même manière. Ainsi, les variations de consommation entre les locaux ne sont pas liées à l'orientation.

Hypothèses, normes et formalisation de la modélisation *DIALux*[®]

Conditions d'éclairage

L'éclairage est défini en respectant la norme NF EN 12464-1.

Cette norme donne les mêmes contraintes dans les deux cas étudiés ici (bureaux et salle d'enseignement) :

- Niveau d'éclairage moyen à maintenir $\overline{E_m} = 500lux$
- Uniformité : $\frac{E_{min}}{E_{moy}} \geq 0,6$
- Eblouissement : UGR < 19
- Température de couleur : Tc = 4000K
- Indice de rendu des couleurs : IRC > 80.

Formalisation mathématique

Les calculs ont été réalisés sous le logiciel *DIALux*[®] selon la norme NF EN 15193-1.

Dans cette norme, la consommation électrique totale de l'installation d'éclairage W_t s'exprime :

$$W_t = W_{L,t} + W_{P,t}$$

Avec :

- $W_{L,t}$: l'énergie consommée par les luminaires ;
- $W_{P,t}$: l'énergie consommée par les auxiliaires, principalement la régulation et la charge des luminaires de secours

L'énergie consommée par les luminaires est donnée par :

$$W_{L,t} = \sum \{(P_n \times F_c) \times [(t_D \times F_o \times F_D) + (t_N \times F_o)]\}$$

Avec :

- P_n : puissance totale des luminaires installés ;

- F_c : facteur d'éclairage constant lorsqu'une régulation de l'éclairage constant gère la puissance totale installée ;
- t_D : temps d'utilisation en période jour ;
- F_o : facteur de dépendance de l'occupation ;
- F_D : facteur de dépendance de la lumière du jour éclairant le local ;
- t_N : temps d'utilisation en l'absence de lumière du jour (période nuit).

L'énergie consommée par les auxiliaires est donnée par :

$$W_{p,t} = \sum \{P_{pc} \times [t_y - (t_D + t_N)] + (P_{em} \times t_{em})\}$$

Avec :

- P_{pc} : puissance totale des auxiliaires des systèmes de régulation intégrés dans les luminaires lorsque ceux-ci sont éteints ;
- t_y : durée d'une année standard en heures ;
- P_{em} : puissance totale de charge des luminaires de secours ;
- t_{em} : temps de charge de l'éclairage de secours.

Remarque :

Si les auxiliaires de régulations sont déportés hors des luminaires, il s'agira de rajouter leur consommation également quand les luminaires sont éteints. La version actuelle de la norme considère que les auxiliaires de régulation sont intégrés aux luminaires et éteint lorsque les luminaires sont éteints.

Spécifications techniques des capteurs et modules communicants

Les capteurs actuellement disponibles sur le marché permettent de contrôler plusieurs luminaires, le nombre variant en fonction des modèles. Leur rayon de détection est limité et varie également suivant les modèles.

Un seul capteur n'est donc pas toujours suffisant pour contrôler tout un local. De même, dans le cas de locaux de grande surface, le contrôle par zone peut être une solution envisageable, à condition de ne pas sacrifier les conditions de confort déterminées par les normes NF EN 12464-1 et NF X 35-103, ni de créer une ambiance anxieuse liée aux contrastes entre les zones éclairées et les zones éteintes.

Les capteurs étudiés sont listés dans le tableau ci-dessous :

Marque	Modèle	Nb récepteurs	Surface couverte	Consommation ¹²	
				On	Off
Philips	<i>Occuswitch DALI</i>	15	25 m ²	1,2 W	
Philips	<i>ActiLume DALI</i>	11	50 m ²	700 mW + 40 mW par luminaire	
Sylvania	<i>Encastré DALI</i>	10	40 m ²	724 mW	260 mW
Sylvania	<i>Saillie 1-10V</i>	10	50 m ²	809 mW	305 mW
Thorn	<i>Sensalite encastré DALI</i>	10	40 m ²	810 mW	200 mW
Thorn	<i>Sensalite saillie DALI</i>	10	50 m ²	850 mW	230 mW
Thorn	<i>Sensa réglables DALI</i>	10	40 m ²	970 mW	340 mW
Thorn	<i>Sensa micro-ondes DDM</i>	10	200 m ²	1270 mW	700 mW

Les modules communicants étudiés sont listés dans le tableau ci-dessous :

Marque	Modèle	Type	Nb maxi connexions	Consommation ¹²
Zumtobel	<i>mbLINK</i>	Émetteur	25 capteurs	20 mW

¹² Données constructeurs

Zumtobel	<i>mbLINK</i>	Récepteur	25 luminaires	20 mW
Zumtobel	<i>mbLINK mini</i>	Émetteur	15 capteurs	30 mW
Zumtobel	<i>mbLINK mini</i>	Récepteur	15 luminaires	30 mW
Philips	<i>Concentrateur Zigbee</i>	Gateway	25 appareils	2,5 W

Remarques :

- *Thorn* et *Zumtobel* utilisent les mêmes capteurs et modules radios/DALI, fournis par le fabricant *Tridonic* appartenant au même groupe (*Zumtobel*).
- La consommation du concentrateur *Zigbee* pour Philips nous a été accessible, mais pas celle des capteurs connectés.
- Les solutions sans fil proposées par *Sylvania* sont dédiées à des usages industriels.
- *Zumtobel* propose des systèmes permettant de piloter plusieurs centaines de luminaires, en filaire (DALI) et sans fil (radio), dans un immeuble par exemple, mais ce type de matériel est trop spécifique pour être intégré à cette étude qui se veut plus générale.
- *Steinel*, fournisseur de capteurs du bâtiment, entre autres pour *Trilux*, ne communique pas la consommation de ses capteurs.

Résultats des modélisation *DIALux®* pour les trois latitudes

Résultats pour le site de Marseille

Local	Simple interrupteur		Détection et gradation		Economie d'énergie [%]
	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	
Bureau individuel	141,03	11,75	71,69	5,97	- 49
Bureau 2-3 personnes	257,66	10,74	165,53	6,90	- 35 %
Plateau de bureaux	2117,05	14,11	1795,63	11,97	- 15 %
Salle d'enseignement	901,05	13,04	646,41	9,35	- 28 %

Détection et gradation Consommation capteur comptée		Économie relative [%]
Conso totale [kWh/an]	LENI [kWh/m ² /an]	
82,3	6,88	- 41 %
186,55	7,8	- 27 %

1832,42	12,17	- 14 %
677,95	9,85	- 24 %

Résultats pour le site de Paris

Local	Simple interrupteur		Détection et gradation		Economie d'énergie [%]
	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	
Bureau individuel	144,14	12,01	78,33	6,53	- 46 %
Bureau 2-3 personnes	261,16	10,89	173,12	7,22	- 34 %
Plateau de bureaux	2131,74	14,2	1825,29	12,16	- 14 %
Salle d'enseignement	910,15	13,17	662,85	9,59	- 27 %

Détection et gradation Consommation capteur comptée		Économie relative [%]
Conso totale [kWh/an]	LENI [kWh/m ² /an]	
88,84	7,43	- 38 %
194,14	8,12	- 25 %
1862,08	12,36	- 13 %
694,39	10,09	- 23 %

Résultats pour le site de Bruxelles

Local	Simple interrupteur		Détection et gradation		Economie d'énergie [%]
	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	Consommation totale [kWh/an]	Consommation surfacique [kWh/m ² /an]	

Bureau individuel	145,2	12,1	80,59	6,72	- 44 %
Bureau 2-3 personnes	262,35	10,94	175,7	7,33	- 33 %
Plateau de bureaux	2136,73	14,24	1835,36	12,23	- 14 %
Salle d'enseignement	913,24	13,21	668,43	9,67	- 27 %

Détection et gradation Consommation capteur comptée		Économie relative [%]
Conso totale [kWh/an]	LENI [kWh/m ² /an]	
91,1	7,62	- 37 %
196,72	8,23	- 25 %
1872,15	12,43	- 13 %
699,97	10,17	- 23 %

Annexe 9 • Cas d'étude : Rénovation d'un local tertiaire

Implantation de l'IUT de Rouen, positionnement et représentation de la salle étudiée

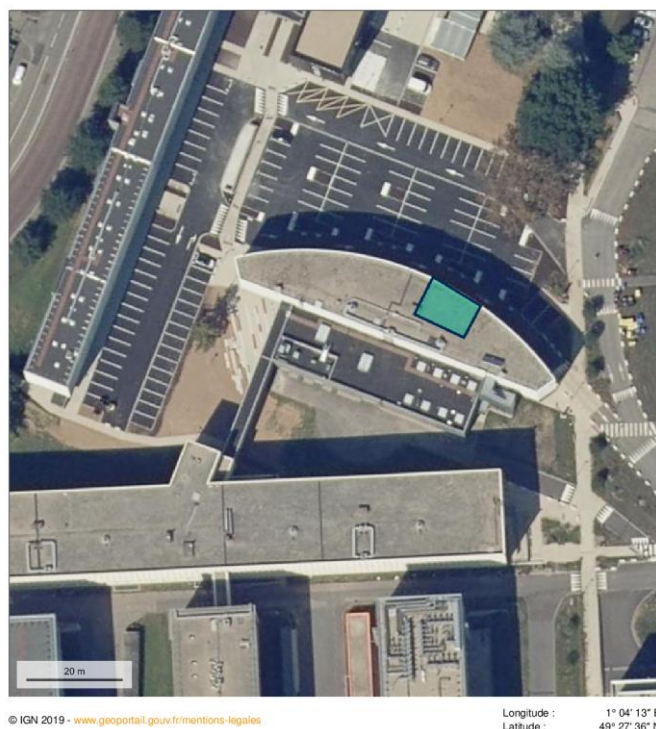


Figure 18 - Implantation de l'IUT de Rouen - Schéma en surbrillance de la salle D110 du bâtiment D du département Génie thermique et Energie (Nord vers le haut)
Source : geoportail.gouv.fr

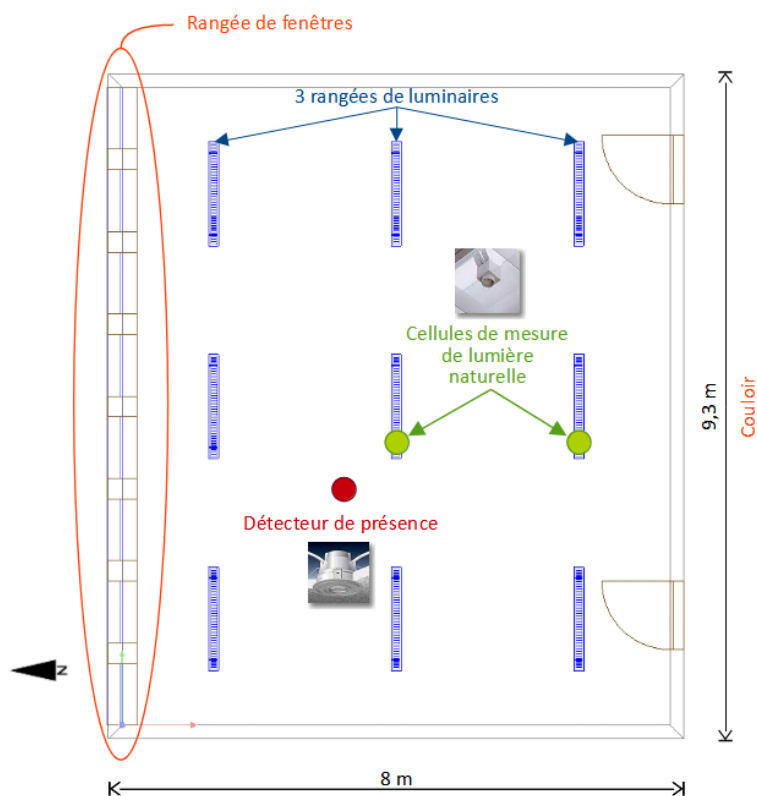


Figure 19 - Schéma de la salle de cours étudiée dans le cas d'étude

Situation initiale

Matériel

8 luminaires de 150 cm de longueur installés en applique équipés chacun de 2 tubes T8 de 58 W chacun et d'un ballast ferromagnétique ; puissance électrique unitaire (tubes + ballast) : 140 W.

Grille défilement peinture laquée couleur crème.

Puissance totale installée dans la salle : 1120 W.

Implantation et commande

Luminaires montés en deux rangées de quatre, pilotées par un va-et-vient manuel qui contrôle toute la salle.

Situation après travaux

Matériel

9 luminaires de 120 cm de long et encastré en faux plafond équipés chacun de 2 tubes de 36 W chacun et d'un ballast électronique *gradable*. Puissance unitaire (tubes + ballast) : 80 W.

Grille de défilement miroirs polis.

Puissance totale installée : 720 W.

Implantation

Luminaires montés en trois colonnes de trois :

- Deux sont régulées (côté fenêtres et milieu de la salle) ;
- La colonne côté couloir n'est pas régulée.

Détection de présence pour couper l'alimentation totale de l'éclairage dans la pièce en cas d'absence.

Résultats

Mesure

Un compteur d'énergie électrique par colonne.

Résultats

Diminution de la puissance installée d'un facteur proche de 2 avec l'installation de 2005 par rapport à celle de 1993, sans changer de technologie de source (tubes fluorescents T8).

Diminution de la consommation d'énergie électrique d'un facteur 3, la gradation et la détection de présence s'ajoutant à la diminution de puissance installée (cela correspond aux économies directes).

Intérêt de la régulation : entre la colonne « fenêtre » et la colonne couloir, un facteur deux sur la consommation électrique.

Commentaires

Au moment de la conception de cette installation, en 2003, les tubes T5 et les ballasts *gradables* à pilotage numérique n'existaient pas, ce qui augmenterait les économies directes.

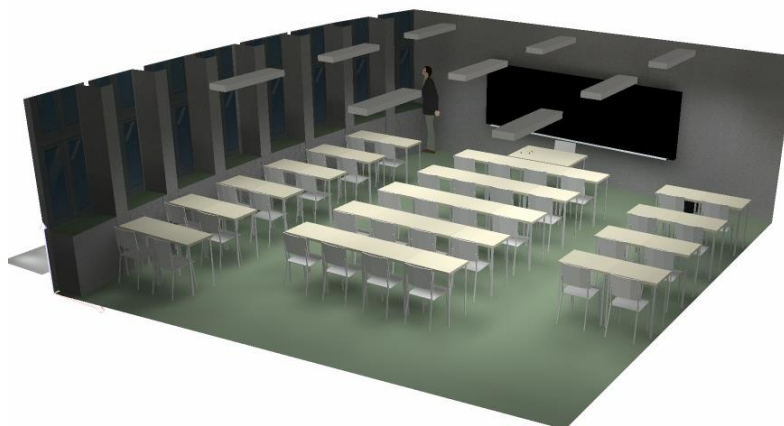


Figure 20 – Modélisation de la salle de cours sous DIALux® pour les études photométriques préalables



Figure 21 - Relevé des compteurs (1 par rangée)

Annexe 10 • L'éclairage public

Ces informations ont été recueillies auprès de Pierre Albrecht et Marion Vilain du Service des Voies Publiques de la Ville de Strasbourg.

Des mesures ont été réalisées avant et après la requalification de l'éclairage public de la rue de Saint-Dié qui a été équipée de matériel de détection de présence.

Caractéristiques de l'installation

Configuration de la voie :

- Trottoir 2 : largeur 2,5 m
- Chaussée : largeur 5,0 m | nombre de voies : 2
- Trottoir 1 : largeur 2,5 m
- Interdistance entre les mâts : 40 m

Installation déposée :

- 11 luminaires
- Interdistance entre les mâts : 40 m
- Mâts : 7 m + crosse
- Hauteur de feux : 10 m environ
- Sources lumineuses : iodure métallique, 100 W

Matériel installé :

- 11 luminaires
- Interdistance entre les mâts inchangée
- Mâts : 7 m
- Luminaire en top, donc hauteur de feux : 7 m
- Sources lumineuses : LED 51 W
- Abaissement de la luminosité de 70 % entre 20 h et 7 h et éclairage sur détection

Travaux réalisés :

- Date des travaux : octobre - novembre 2017
- Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre : département éclairage
- Exécution des travaux partagée entre la régie municipale et l'entreprise SPIE
- Luminaires installés : modèle Zelda du fabricant Eclatec, technologie LED
- 2 systèmes de détection :
 - Modèle Eclatec infrarouge train de lumière
 - Modèle Sogexi SIR sencycity infrarouge et train de lumière

Le flux lumineux émis par l'installation est diminué de 70 % entre 20 h et 7 h. Le système de détection fait remonter le flux des luminaires à sa valeur nominale au passage d'un usager. Le principe du train lumineux consiste à ne remonter le flux que des luminaires proches de la zone où se trouve l'usager et de piloter les autres luminaires au fur et à mesure de son déplacement. Une fois que plus personne n'est détecté dans une zone, les luminaires repassent à -70 % de flux.

Relevés de consommation à l'armoire

L'armoire qui alimente cette installation se nomme Jean Georges Stuber. Celle-ci alimente également l'éclairage de voies adjacentes, lesquelles n'ont pas subi de modifications significatives pendant la période étudiée.

Avant travaux, l'énergie fournie par cette armoire d'alimentation s'élevait à environ 12 500 kWh (janvier 2016 - janvier 2017).

Après travaux, elle a diminué à environ 8 500 kWh (janvier 2019 - janvier 2020).

La baisse de consommation est donc de l'ordre de 4000 kWh.

Les données de consommation sont issues du fournisseur d'énergie. Elles peuvent présenter une incertitude importante qui, d'après les retours d'expérience, peut atteindre 30 % sur certaines installations.

Calcul théorique de l'économie d'énergie

Durée d'éclairage annuelle : 4200 h

Durée de l'abaissement : env. 4000 h

Calcul de la consommation :

$$\text{Consommation [kWh]} = \frac{\text{durée d'éclairage} \times \text{nombre luminaires} \times \text{puissance unitaire}}{1000}$$

Consommation avant requalification :

$$\frac{4200 \times 11 \times 100}{1000} = 4620 \text{ kWh}$$

Consommation après requalification, en considérant qu'aucun usager n'est détecté :

$$\frac{4200 \times 11 \times 51}{1000} - \frac{4000 \times 11 \times 51 \times 0.7}{1000} = 785 \text{ kWh}$$

La nouvelle installation permettrait donc 3835 kWh d'économies, diminuées de la consommation liée à la détection des usagers.

Conclusion

La baisse de consommation mesurée est légèrement supérieure à l'estimation mais reste dans l'ordre de grandeur. L'écart peut s'expliquer par l'incertitude liée aux relevés de consommation.

Consommation calculée des modules de détection

NOM	KAWANTECH	SENSYCITY SIR
TYPE de détection	Caméra détection de forme	IR
FONCTIONNEMENT AVEC DRIVER	0-10 V	DALI
COMMUNICATION ENTRE POINTS LUMINEUX	Abs dans la version testée	Radio LoRa sécurisée
ALIMENTATION	90-250 V	220-240 VAC
CONSOMMATION UNITAIRE	3-4 W	< 1 W
CONSOMMATION ANNUELLE SUR L'INSTALLATION (11 UNITES)	385 kWh	96 kWh

On peut donc en conclure que la consommation des capteurs est significative devant la consommation de l'éclairage. En corolaire, on pourra donc souligner que les capteurs sont d'autant plus intéressants que la puissance d'éclairage qu'ils commandent est importante.

Annexe 11 • L'exemple du compteur communicant

La paramétrisation du modèle STERM associée à ce cas d'étude est disponible dans le tableur « [STERM] Use case param » sur le site de The Shift Project.

Scénario 1

Le premier scénario (1) se caractérise par une attitude du foyer intermédiaire quant à l'évolution des comportements au cours de la durée de vie du compteur. Economie de 3% sur la première période, d'une durée d'un an, et de 0.69%¹³ sur la seconde période, qui couvre le reste de la durée de vie du compteur (14 ans).

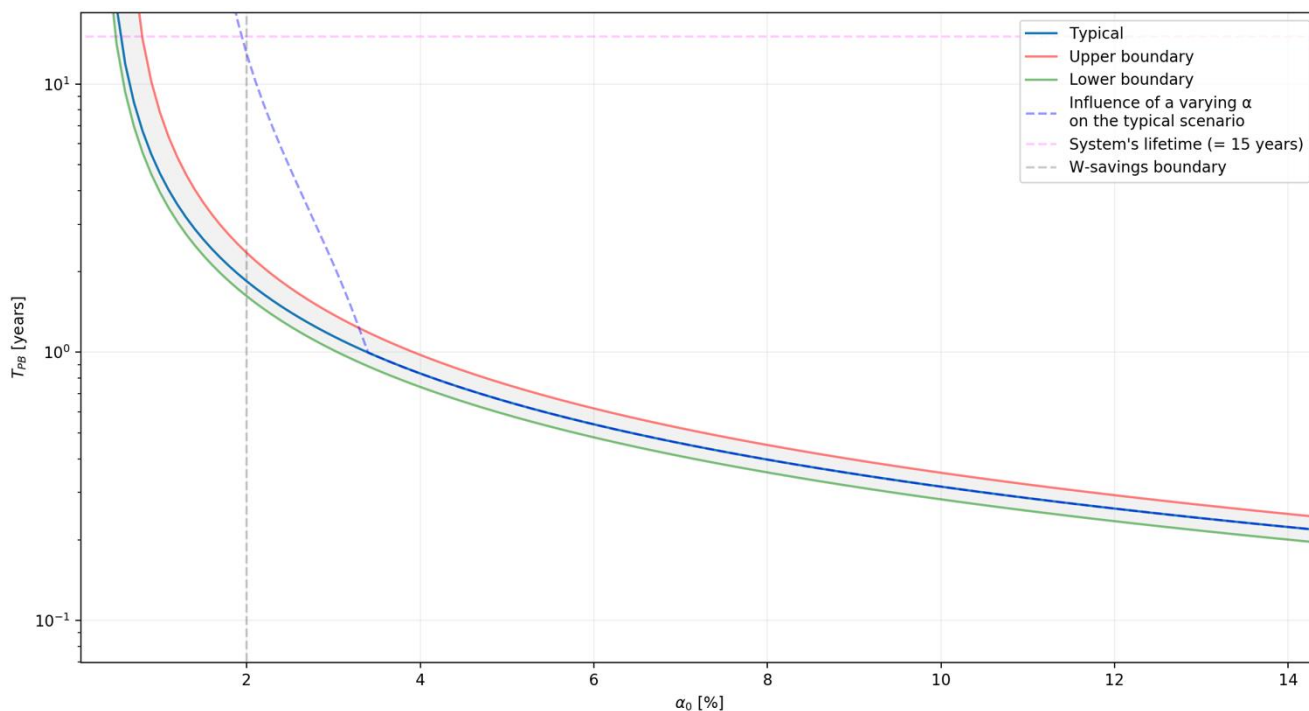


Figure 22 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 1

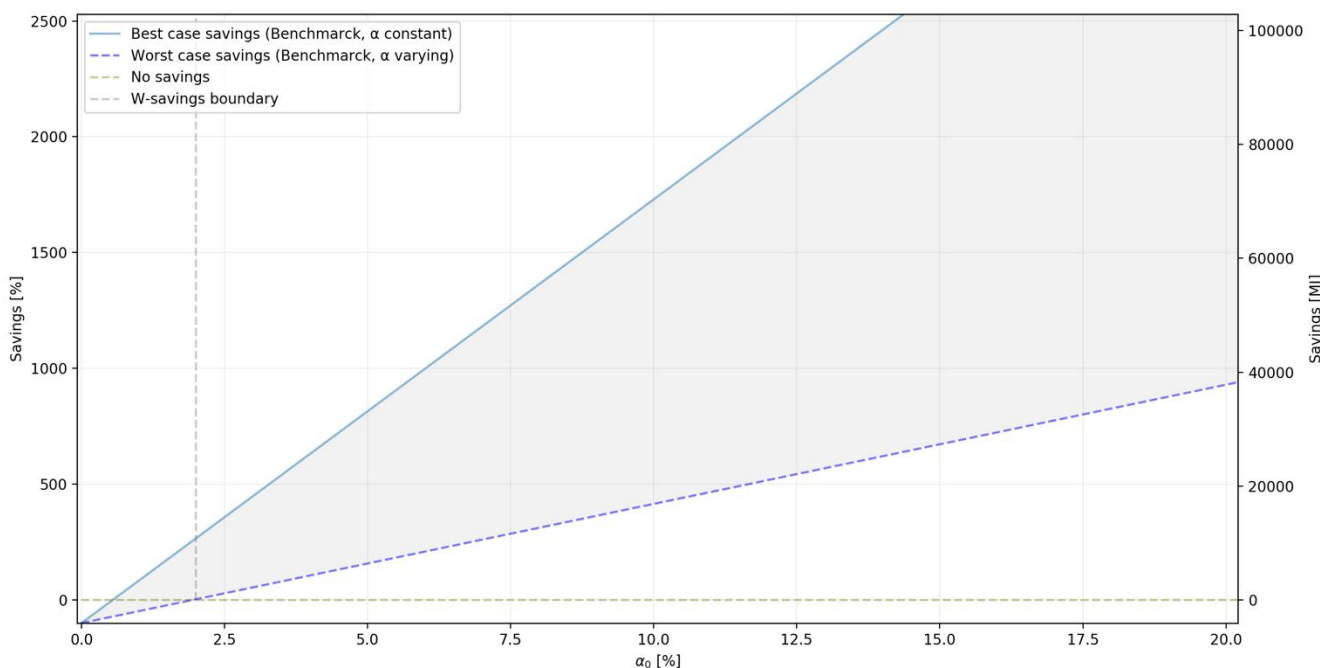


Figure 23 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 1

¹³ (Taylor, 2015)

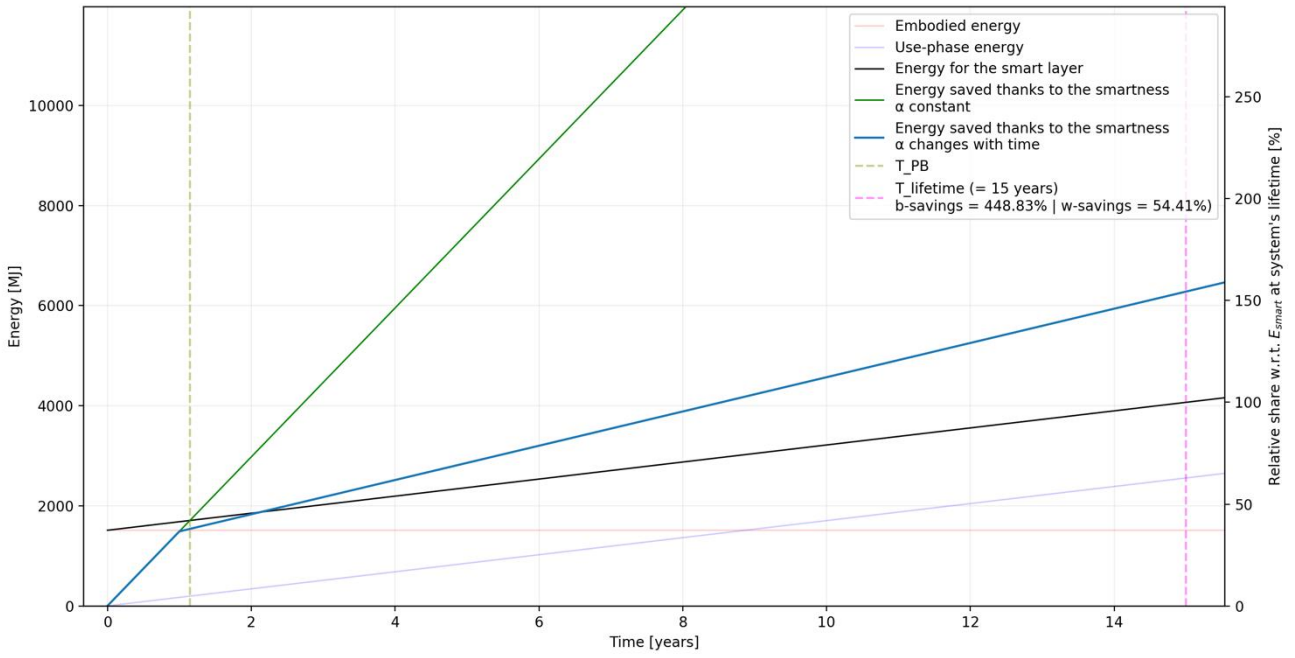


Figure 24 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps – Compteur communicant, scénario 1

Scénario 2

Le deuxième scénario (2) correspond à un foyer où aucune nouvelle habitude se met en place de manière durable malgré les informations données par le compteur communicant. La nouveauté incite à des changements de comportements (3% d'économie) sur la première période, d'une durée de 6 mois, puis un gain nul sur la seconde période, qui couvre le reste de la durée de vie du compteur (14,5 ans).

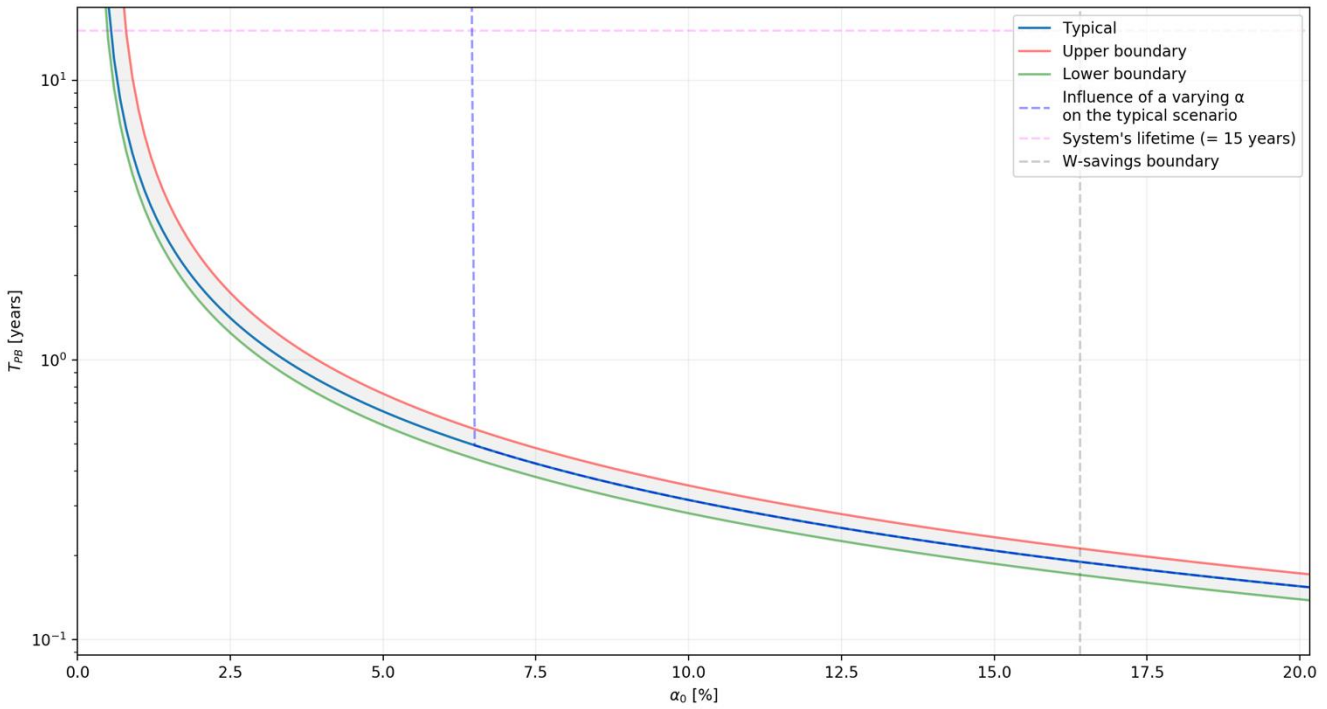


Figure 25 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 2

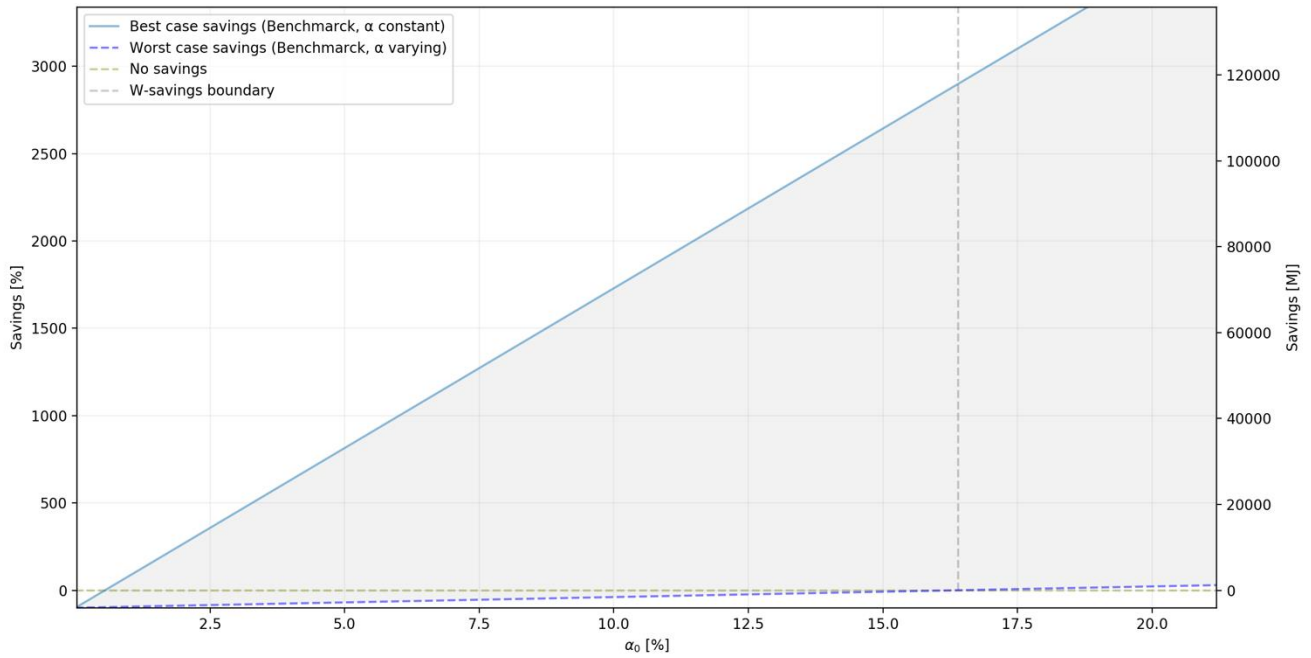


Figure 26 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 2

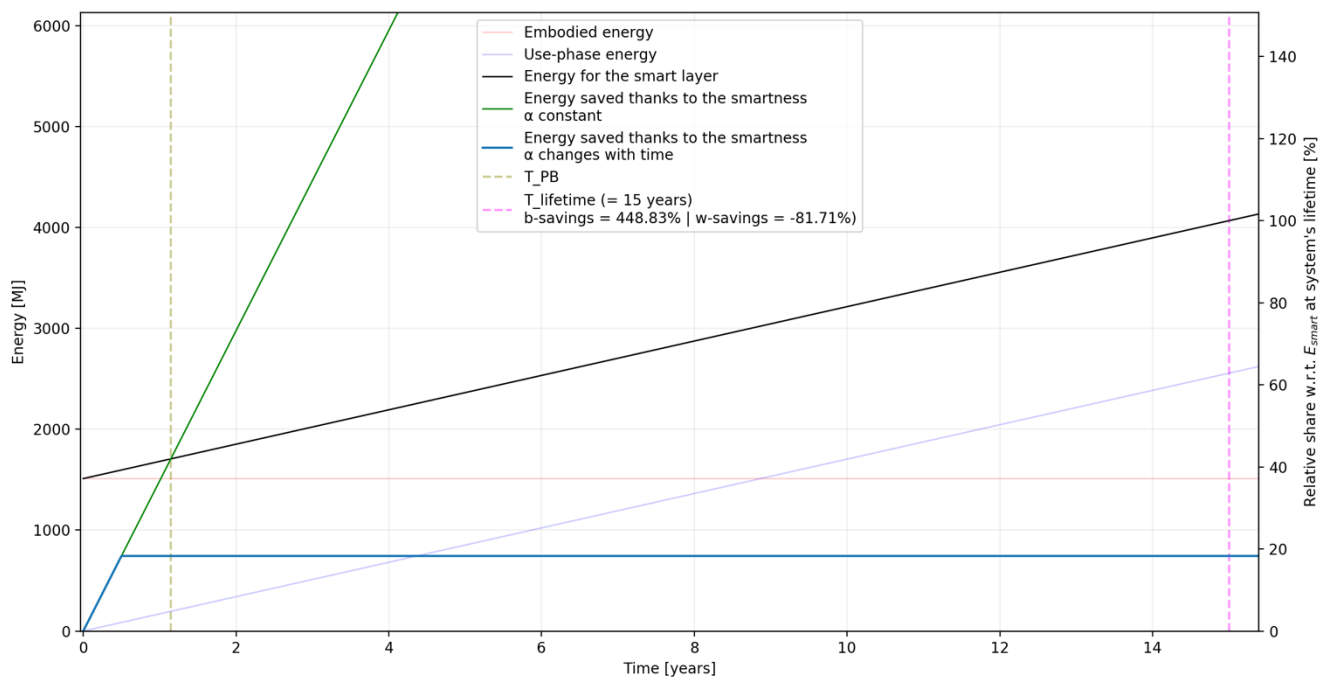


Figure 27 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps – Compteur communicant, scénario 2

Scénario 3

Le troisième scénario (3) caractérise un foyer maintenant ses efforts de changements de comportement, ce qui mène à des économies de 1,5 % chaque année, sur toute la durée de vie du compteur (15 ans). Au vu des observations en situation réelle aujourd'hui disponibles, ce scénario est davantage théorique que réaliste.

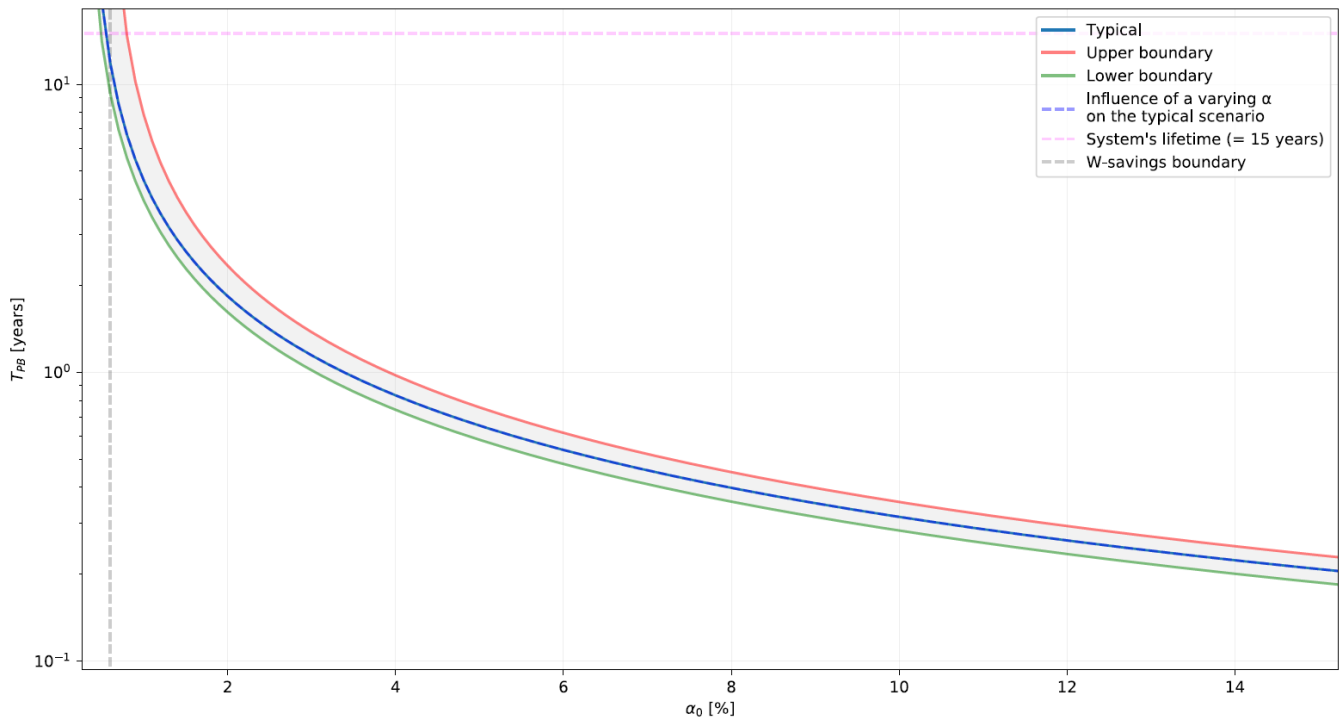


Figure 28 - Temps de récupération en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 3

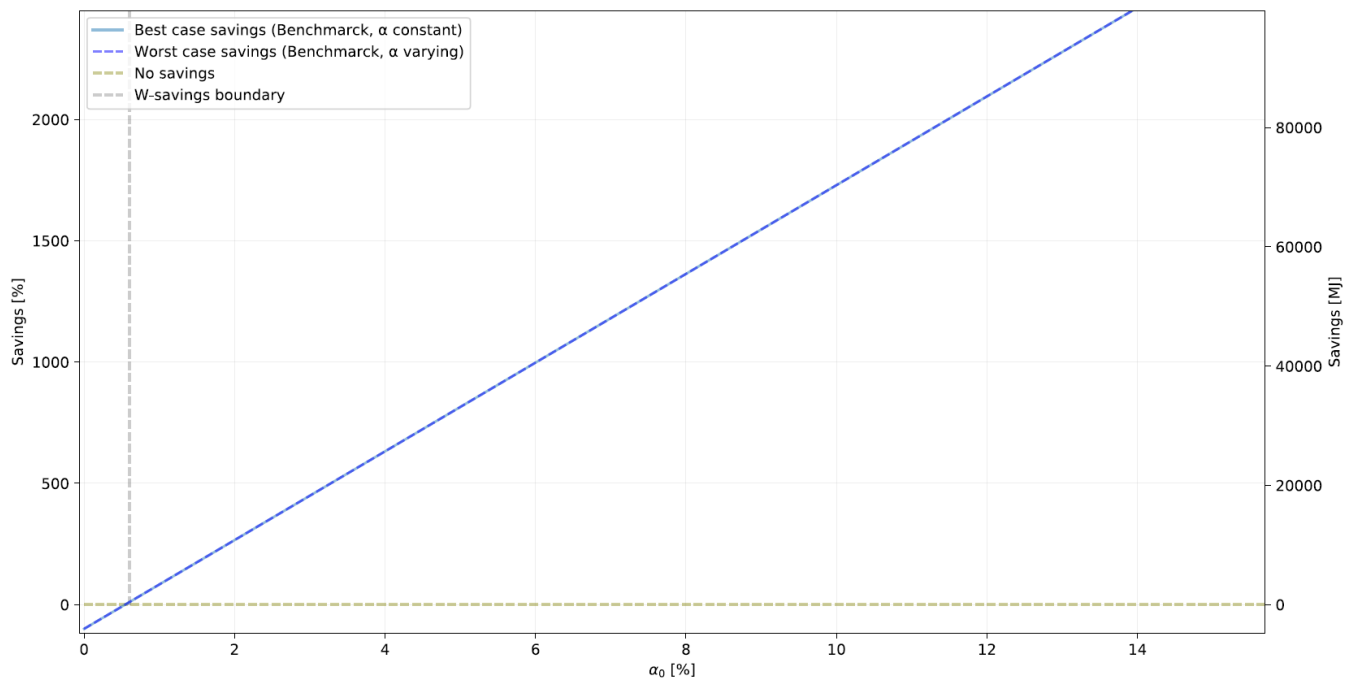


Figure 29 - Gains énergétiques nets à la durée de vie du système en fonction de α_0 – Compteur communicant, scénario 3

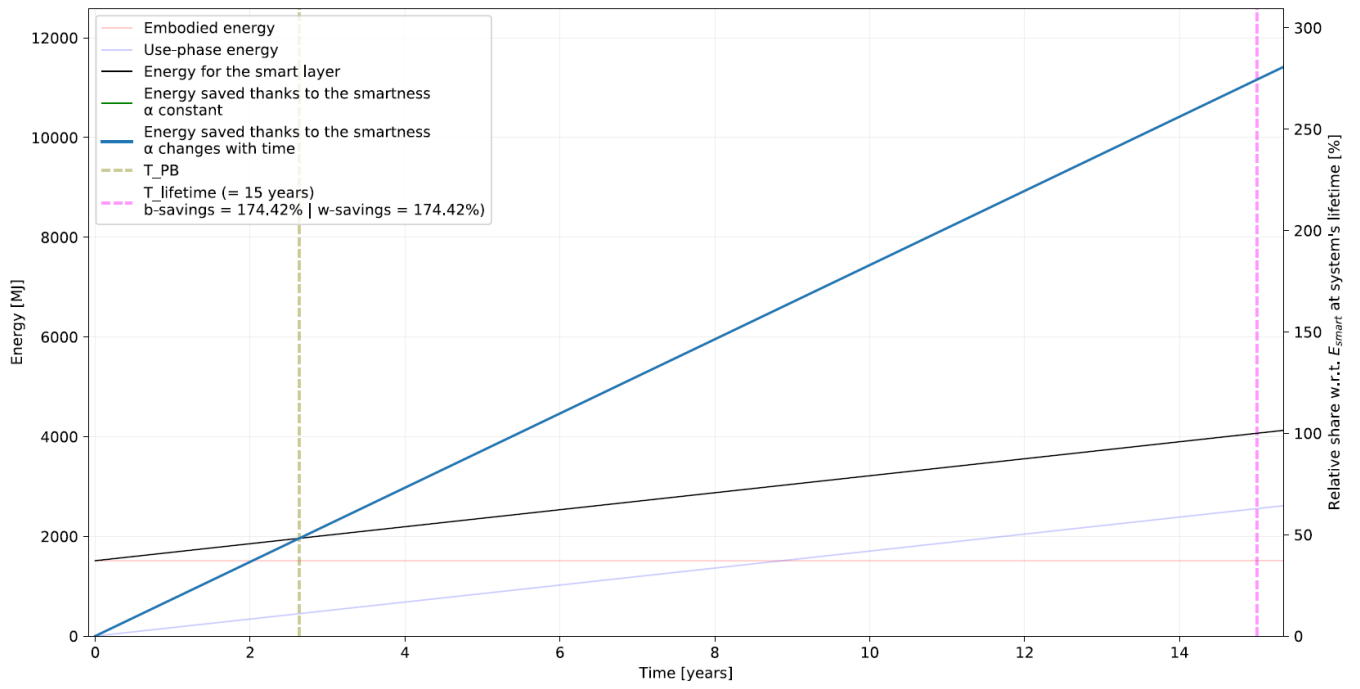


Figure 30 - Courbes d'énergie cumulées en fonction du temps – Compteur communicant, scénario 3