

# Dimensionnement d'une masse thermique pour la réduction des pics de consommation énergétique : influence géo-climatique

Michaël Salvador<sup>1\*</sup>, Benjamin Paris<sup>1</sup> et Stéphane Grieu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire PROMES, Université de Perpignan Via Domitia, 52 Av. Paul Alduy, 66860 Perpignan

\*Auteur correspondant : michael.salvador@univ-perp.fr

**Résumé** - Les systèmes de production d'énergie renouvelable permettent un effacement de puissance. Toutefois, le caractère intermittent de cette production menace la sécurité énergétique du réseau, son injection pouvant en causer la surcharge. Suite à ce constat, l'étude présentée détaille une méthode pour identifier et évaluer l'impact énergétique d'un bâtiment sur le réseau électrique avec l'objectif de le minimiser grâce au juste dimensionnement des systèmes de production et de stockage thermiques, en tenant compte de l'influence géo-climatique.

## Nomenclature

$Imp_{enerTR}$	Impact énergétique temps réel	$AC_{ener}$	Pourcentage d'énergie renouvelable électrique consommée
$IER$	Impact énergétique réseau	$DimSol_{PV}$	Surface allouée aux panneaux solaires photovoltaïques
$P_{app} / P_{prod}$	Puissance électrique appelée / produite	$Dim_{Eol}$	Puissance de l'éolienne
$P_{pic}$	Valeur maximale de la puissance consommée ou injectée au réseau	$DimSol_{Th}$	Surface allouée aux panneaux solaires thermiques
$DPE$	Diagnostic de performance énergétique	$DimECS$	Dimension du ballon d'ECS
$Bilan_{ener}$	Bilan énergétique	$EpDaL$	Épaisseur de la dalle légère

## 1. Introduction

Comme conséquence de la disponibilité de la ressource, la production d'énergie renouvelable, électrique ou thermique, est intermittente. Mais, intégrés au bâti, les systèmes de production EnR permettent de répondre à une partie, voire à la totalité des besoins liés à l'utilisation d'un bâtiment par l'homme. Ce caractère intermittent constitue un frein à leur bon développement [1], bien que des solutions aient été envisagées pour en atténuer les effets, comme, par exemple, le couplage entre un moyen de production et un système de stockage. Bien que le stockage thermique soit technologiquement mature et industrialisé, le stockage de l'énergie électrique, à cause des pertes et de coûts de construction et d'exploitation importants, n'est pas aujourd'hui rentable [2]. L'expérience démontre qu'une étude tenant compte, pour le dimensionnement des installations, de facteurs humains, des habitudes de vies et surtout des besoins et disponibilités, est nécessaire [3]. Or la plupart de ces paramètres sont sujets à interprétation, ce qui rend difficile le bon dimensionnement des réseaux et des centrales. Parallèlement à ce constat, on peut mettre en avant que l'hybridation d'au moins deux sources d'énergie renouvelable pourrait permettre d'étendre les périodes de production [4]. Cette solution, bien qu'imparfaite, présente l'avantage certain d'offrir des coûts acceptables. Notons toutefois que l'objectif n'est pas ici l'indépendance énergétique, le réseau étant nécessaire en cas de déficit ou d'excès de production d'énergie des dispositifs intégrés au bâti. D'autre part, il est très difficile de quantifier précisément, à l'instant  $t$ , la production cumulée du parc de petites centrales [5]. Plutôt négligées jusque là, elles représenteraient aujourd'hui en France 680 MWc et seront, à terme, obligatoirement considérées pour le bon fonctionnement du réseau. Ni maîtrisé, ni quantifié, ni prévisible, une perte soudaine de cet apport énergétique au

réseau aurait pour conséquence la moins fâcheuse une augmentation brutale de la demande en énergie auprès des centrales industrielles. Ainsi, l'optimisation du dimensionnement des dispositifs de production d'énergie renouvelable, thermique et électrique, et des dispositifs de stockage thermique, passifs ou actifs, semble nécessaire pour intégrer, avec le minimum d'impact possible, les énergies renouvelables au paysage énergétique actuel [6]. Qu'un bâtiment consomme de l'énergie ou qu'il soit excédentaire et injecte de l'énergie au réseau, il a un impact sur ce réseau. Le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), bien que fournissant une information utile, n'en permet pas l'évaluation. En effet, il ne tient pas compte de l'augmentation du trafic net entre un bâtiment équipé de systèmes de production d'énergie et le réseau, ni des variations de la courbe de charge. C'est cette information que l'impact énergétique met en avant, dans le but de réduire la charge, non pas moyenne mais réelle, pour le réseau.

## 2. Modélisation de bâtiments sous environnement TRNSYS

TRNSYS, un logiciel de modélisation thermique, et DAYSIM, utilisé pour déterminer les besoins en éclairage artificiel, ont permis de développer plusieurs modèles de bâtiments. Des documents fournis par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), comme la « Réglementation Thermique 2005 », ont été consultés. On distingue trois types de modèles, représentatifs des paysages urbains français et suisse : « résidentiel » (6 modèles), « tertiaire » (2 modèles) et « industriel » (1 modèle). Pour notre étude, un seul modèle est considéré : une habitation de plein pied d'une surface habitable de 150 m<sup>2</sup>, située à Perpignan, orientée plein sud et habitée par une famille de 4 personnes (2 adultes et 2 enfants). C'est le bâtiment étalon. Les habitudes de vie ont été modélisées. A partir de relevés énergétiques, basés sur la consommation réelle mensuelle et non sur des estimations, ce modèle a été validé. Des panneaux solaires thermiques et P.V., ainsi qu'une éolienne à axe vertical intégrée au bâti [7], équipent l'habitation. Un ballon d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) fait office de dispositif de stockage thermique actif, la masse au sol, par l'intermédiaire du plancher chauffant, étant un moyen de stockage passif. L'ensemble des modèles développés répond aux critères du « tout électrique » afin de faciliter le comptage énergétique sans se risquer à un calcul hasardeux, résultant notamment de l'évolution constante du pouvoir calorifique du gaz. Est ensuite défini un coefficient, révisé à chaque intervalle de facturation, afin d'obtenir une valeur en kWh facturés. Enfin, le rendement des équipements doit être pris en considération avec les réserves d'usage, car annoncé le plus souvent par le constructeur. Ainsi, le recours au « tout électrique » nous affranchit d'une partie de ces calculs, la plupart des rendements étant proches de 1.

## 3. L'impact énergétique

### 3.1. Impact énergétique temps réel

$Imp_{enerTR}(i)$  est une balance de puissance calculée à chaque pas de temps (1). Il s'agit de déterminer la somme des puissances sortantes (dans le cadre d'un bâtiment équipé au moins d'un dispositif de production) et entrantes pour un bâtiment relié au réseau électrique :

$$Imp_{enerTR}(i) = P_{app}(i) - P_{prod}(i) \quad (1)$$

avec  $Imp_{enerTR}(i)$  l'impact énergétique temps réel,  $P_{app}(i)$  la puissance électrique appelée par le bâtiment et  $P_{prod}(i)$  la puissance électrique produite par le bâtiment, à l'instant  $i$ .

### 3.2. Impact énergétique réseau

Classiquement, l'impact énergétique réseau temps réel présente une caractéristique linéaire. Cependant, il paraît souhaitable de « casser » cette linéarité dans l'analyse d'une courbe de

charge. On réalise ainsi un traitement des données permettant de pénaliser les acteurs du « mal consommer » mais également du « mal produire » énergétique. C'est pourquoi est considérée la valeur absolue de  $Imp_{enerTR}(i)$ . La dimension du bâtiment étudié ayant un impact sur l'IER, il convient de mettre en relation  $Imp_{enerTR}(i)$  avec la taille de ce bâtiment.  $Imp_{enerTR}(i)$  est donc ramené à une valeur comprise entre 0 et 1 par division par  $P_{pic}$ , la valeur maximale de la puissance consommée ou injectée au réseau pendant l'intervalle de temps considéré. 0 correspond à une absence d'échange avec le réseau, 1 à un échange maximum (2). Pour pénaliser plus lourdement les comportements extrêmes (proche de 1), le résultat obtenu est multiplié par un coefficient avant utilisation de la fonction exponentielle. Ainsi, un coefficient égal à 3 permet d'obtenir un seuil de début de pénalisation, à ~70 % de la puissance maximale. Le résultat obtenu est l'impact énergétique réseau (3), stigmatisant les comportements extrêmes et favorisant une politique de consommation étalée dans le temps :

$$C(i) = \frac{Coef * |Imp_{enerTR}(i)|}{P_{pic}} \quad (2)$$

$$IER = \frac{1}{n_{max}} \sum_{i=1}^{n_{max}} e^{3 * \frac{\|Imp_{enerTR}(i)\|}{P_{pic}}} - 1 \quad (3)$$

avec  $P_{pic}$  la valeur maximale de la puissance consommée ou injectée au réseau pendant l'intervalle de temps considéré,  $i$  le pas de temps et  $n_{max}$  la limite de l'intervalle d'étude. Le pas de temps considéré pour l'étude est fixé à 1 minute. L'expérience montre que réduire ce pas de temps n'apporte pas d'information supplémentaire. Si, par contre, le pas de temps dépasse 10 minutes, le résultat obtenu n'est plus représentatif du comportement étudié. Enfin, la dernière étape consiste en une analyse des variations de consommation et de leur fréquence. Sont considérés les changements d'état du bâtiment (consommateur/producteur) ainsi que les augmentations de consommation d'énergie, par minute, de plus de 10 % de la capacité totale de ce bâtiment. On obtient alors un indicateur que nous souhaitons le plus représentatif possible. L'objectif n'est pas de remplacer le DPE mais d'approfondir l'analyse grâce à une information issue de l'étude du bâtiment et tenant compte des habitudes de vie de ses occupants.

#### 4. Réduction de l'impact énergétique

En optimisant les puissances installées pour chacun des systèmes de production d'énergie, renouvelable ou pas, ainsi que la capacité des dispositifs de stockage thermique (ballon d'ECS, dalle légère), il est possible de réduire l'impact énergétique temps réel. Bien qu'une meilleure isolation du bâtiment permette d'augmenter son efficacité énergétique, ce point ne sera pas abordé dans cet article. Un seul scénario est considéré : chauffage par le sol basse température, ballon d'ECS équipé de capteurs solaires et hybridé avec une PAC air/eau dont le COP est calculé dynamiquement. La réduction de l'impact énergétique s'appuie sur l'optimisation des quatre paramètres suivants : la dimension du ballon d'ECS (DimECS), l'épaisseur de la dalle légère (EpDaL) constituée d'une chape qui résulte d'un mélange de sable et de béton faiblement dosé, les surfaces allouées respectivement aux panneaux solaires P.V. (DimSol<sub>PV</sub>) et aux panneaux solaires thermiques (DimSol<sub>Th</sub>) et, enfin, la puissance de l'éolienne (DimEol). Le tableau 1 présente les résultats obtenus en simulation pendant un an. Ce tableau met en évidence l'impact énergétique du bâtiment considéré, en ayant recours au modèle développé. Les algorithmes de minimisation utilisés (chemin central, région de confiance, ensembles actifs et SQP) ne différencient volontairement pas l'énergie entrante de

l'énergie sortante. Deux objectifs : diminuer l'IER tout en évitant une augmentation de la consommation globale d'énergie, avant déduction de l'apport des sources d'énergie renouvelable. Des valeurs limites ont été appliquées pour chacun des paramètres dimensionnés, le ballon d'eau chaude est limité à 500 l et l'installation solaire P.V. à 3kWc. Sont mentionnés dans le tableau 1, le résultat du calcul du DPE (obtenu par le cumul des besoins pour le conditionnement de l'air et la production d'ECS, énergie renouvelable thermique déduite), les consommations énergétiques nettes, le bilan énergétique ( $Bilan_{ener}$ ), c'est-à-dire la différence entre l'énergie consommée et l'énergie produite puis injectée au réseau, le pourcentage d'énergie renouvelable électrique produite sur site et consommée ( $AC_{ener}$ ) et, enfin, le dimensionnement des systèmes de production et de stockage.

Paramètres	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
DPE	129 $kWh.m^2.an$	80 $kWh.m^2.an$	76 $kWh.m^2.an$	92 $kWh.m^2.an$
Consommation	19380 $kWh$	12050 $kWh$	11000 $kWh$	14200 $kWh$
IER	3,7 (5)	2,2	1,6	2,9
$Bilan_{ener}$	19380 $kWh$	5170 $kWh$	4370 $kWh$	2015 $kWh$
$AC_{ener}$	n.a.	31 %	40 %	58 %
DimSol <sub>PV</sub> /DimEol	0 $kWc/0 kWc$	2,4 $kWc/3,1 kWc$	2,5 $kWc/3,2 kWc$	3 $kWc/4 kWc$
DimSol <sub>Th</sub> /DimECS	0 $kWc/300 l (0l)$	3,5 $kWc/400 l$	8 $kWc/300 l$	22 $kWc/500 l$
EpDaL	100 mm	100 mm	180 mm	250 mm

Tableau 1 : Impact énergétique

*Cas 1* : pas d'exploitation de systèmes de production d'énergie renouvelable. Le DPE est forcément élevé, tout comme l'IER, ce qui reflète l'impact sur le réseau d'un tel bâtiment. Deux cas de figure sont considérés : ballon d'eau chaude sanitaire présent ou absent. En l'absence de dispositifs de production, nous avons procédé à l'optimisation du dimensionnement du seul dispositif de stockage thermique : le ballon d'ECS. L'utilisation d'un tel dispositif permet de réduire sensiblement l'IER de 5 à 3,7, soit moins 35 %.

*Cas 2* : sont ici considérés les systèmes de production d'énergie renouvelable, correctement dimensionnés. Il en résulte une diminution significative de l'IER et de la consommation, une grande partie de l'énergie thermique nécessaire étant fournie par l'installation solaire thermique. Les dispositifs de production ont été dimensionnés au plus juste suivant deux objectifs: la minimisation de l'IER et le maintien des coûts de l'installation (un amortissement entre 15 à 17 ans), par les seuls revenus du solaire photovoltaïque. Notons ici que la baisse de l'IER correspond à une diminution de la valeur du DPE.

*Cas 3* : en optimisant les quatre paramètres ( $\{DimSol_{PV}, DimSol_{Th}\}$ , DimEol, DimECS et EpDaL), le cas 3 est optimal en matière de dimensionnement des moyens de production et de stockage. Les coûts de construction sont également maîtrisés avec un amortissement sur les 20 années d'exploitation de la centrale P.V. Ici, l'écart se creuse entre le DPE et l'IER. A DPE sensiblement égal, l'IER y est bien meilleur. Ceci révèle l'impossibilité d'exploiter le DPE comme marqueur d'impact pour un bâtiment sur le réseau électrique.

*Cas 4* : sur-dimensionnement des dispositifs de stockage thermique. Ici, plus de limite de coût. Ce mauvais dimensionnement engendre une augmentation du DPE et de l'IER. L'inertie thermique est problématique, entraînant une augmentation de la consommation énergétique. Notons que le sur-dimensionnement des dispositifs de production a pour effet positif une amélioration nette du  $Bilan_{ener}$ , mais au détriment de l'IER.

Dans tous les cas, l'ajout d'un dispositif de stockage permet d'amortir la demande en énergie. Ainsi, plus le dispositif de stockage présente une inertie thermique importante, plus l'amortissement est important. Cependant, une masse thermique trop importante engendre un temps de réponse du dispositif de chauffage plus important. D'autre part, et comme le présente la courbe de charge de la figure 1, une masse thermique trop importante (cas 4) ou trop faible (cas 1) engendre une augmentation de la quantité d'énergie nécessaire au maintien du confort.

Autre effet induit par la masse thermique, une diminution des pics de consommation par étalement et déphasage de la demande. Ainsi, le sous-dimensionnement d'un tel dispositif implique un déphasage insuffisant. Un sur-dimensionnement peut par contre conduire à une baisse de confort pour les occupants du bâtiment, due à l'incapacité du dispositif de chauffage à agir sur la masse thermique dans un laps de temps acceptable. Quel que soit le cas de figure considéré, agir sur la masse thermique demande d'autant plus de temps qu'elle est importante.

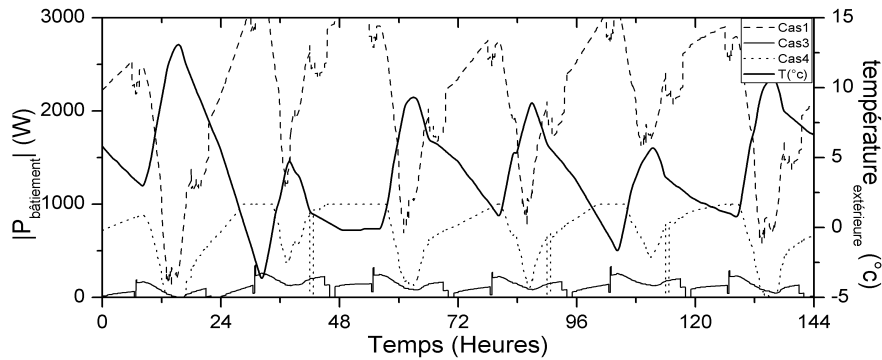


Figure 1 : courbes de charge du dispositif de chauffage étudié sur six jours

## 5. Implantation géographique

L'étude de l'implantation géographique d'un bâtiment sur son impact énergétique est réalisée grâce au modèle étalon précédemment présenté. Les résultats obtenus pour Perpignan sont les résultats de référence. Quatre autres lieux géographiques ont été choisis pour leurs profils météorologiques : Lisbonne, Glasgow, Oslo et Paris. Lisbonne présente un climat tempéré, en raison de sa proximité immédiate avec l'océan atlantique et de l'influence du Gulf Stream, la température y est comprise entre 15°C et 30°C. La proximité de l'océan assure une exposition régulière au vent, tandis que la latitude assure une omniprésence du soleil. Glasgow, avec son climat continental froid, a été choisi en raison du faible ensoleillement de la ville (moins de 700 kWh/m<sup>2</sup>/an). En contre partie, cette dernière est quotidiennement balayée par les vents. Oslo présente un climat quasi polaire. Il s'agit là d'un cas extrême mais intéressant, où malgré le faible rayonnement solaire perçu, l'énergie solaire a un rôle à jouer. Paris, avec son climat continental tempéré, est une ville de choix pour effectuer ce type de simulation. L'irradiation solaire moyenne annuelle y est correcte (1200 kWh/m<sup>2</sup>), les vents pouvant atteindre 40 km/h.

Ville considérée	Lisbonne			Glasgow			Oslo			Paris		
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 1	Cas 2	Cas 3
DPE (kWh.m <sup>2</sup> .an)	93	55	41	167	130	110	217	140	109	144	103	90
Consommation (kWh)	18951	8280	7504	27080	19620	18109	34551	21107	22347	22008	15427	15940
IER	6,2	2	1,7	2,9	1,7	1,6	5,1	3	2,8	4,3	3,6	3,6
Bilan <sub>ener</sub> (kWh)	18951	2854	2518	27080	10580	9948	34000	13571	13880	22008	7654	7205
AC <sub>ener</sub> (%)	n.a.	40,9	60	n.a.	53,6	57	n.a.	60	58	n.a.	23	28
DimSol <sub>pV</sub> /DimEol (kWh)	0/0	2,2/1,5	2/1,5	0/0	1,5/3,5	1,5/4	0/0	3/4	3/4	0/0	2,5/2	3/1,5
DimSol <sub>Th</sub> (kWh)/DimECS (l)	0/150	2/200	4/250	0/150	2/200	10/300	0/150	4/300	10/300	0/150	4/400	10/300
EpDaL (mm)	100	100	120	100	100	250	100	100	250	100	100	190

Tableau 2 : Influence de l'emplacement géographique sur la consommation énergétique et l'IER

Pour chacun des cas (cf. section 4), le comportement des occupants est standardisé et donc pas forcément représentatif de la réalité. Les habitudes diffèrent d'un pays à un autre, en particulier pour les heures des repas et les rythmes de vie. Afin de comparer les résultats obtenus, l'ensemble des paramètres considérés pour la simulation ont été figés. Ces résultats sont présentés par le tableau 2. On constate qu'une consommation énergétique accrue engendre

naturellement une augmentation de l'IER, sauf cas particuliers liés à la façon de consommer, comme à Glasgow où la faible disponibilité des ressources énergétiques renouvelables contraint à une consommation permanente pour le maintien d'un confort acceptable. A l'inverse, à Lisbonne, où les besoins en énergie sont faibles, l'IER y est moins bon qu'à Glasgow, en raison des oscillations observées sur la courbe de charge. Même observation pour Oslo et Paris. Oslo, malgré un climat extrême, n'obtient pas le plus mauvais IER, en raison de la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables, en particulier le vent. Tous les cas étudiés font état d'une amélioration des performances et de l'efficacité énergétique liée à l'optimisation, en matière de dimensionnement, de la masse thermique propre au bâtiment. Elle est peu coûteuse et très efficace pour l'étalement de la demande et le stockage de l'énergie thermique solaire. Les marges de dimensionnement sont toutefois limitées à un intervalle allant de 0 à 250 mm pour l'épaisseur de la dalle chauffante et de 0 à 300 l pour le ballon d'ECS. A aucun moment l'algorithme d'optimisation des paramètres du modèle, pour diminuer l'IER et la consommation électrique, n'a jugé bon de diminuer la taille des dispositifs de stockage, sans toutefois atteindre la valeurs limites fixées. Si une plus grande capacité de stockage permet d'écarter la demande en énergie, cette capacité engendre des pertes. Par contre, pour Lisbonne, il a été nécessaire de réduire la taille des dispositifs de production d'énergie afin de préserver le niveau de performance et l'efficacité énergétique. Pour Glasgow et Oslo, les épaisseurs de dalle préconisées par l'algorithme, comme conséquence du climat de ces deux cités (froid et peu ensoleillé), dépassent les limites fixées.

## 6. Conclusion et perspectives

L'objectif de cet article est de définir et de quantifier, pour un bâtiment donné, son impact énergétique sur le réseau électrique. Ainsi, il a été montré qu'un juste dimensionnement des systèmes de production d'énergie renouvelable, couplés à un stockage ad-hoc et intégrés au bâti, permet de limiter cet impact. Le dispositif de stockage doit être dimensionné afin de ne pas engendrer de surcoût à la construction, pouvant à long terme dégrader les performances énergétiques du bâtiment. Les prochains modèles développés considèreront les caractéristiques de matériaux à changement de phase spécialement conçus pour le bâtiment. A terme, les travaux entrepris porteront sur l'application de la méthodologie à l'échelle d'un quartier, d'une région puis d'un pays. Ces derniers permettront de mettre en évidence les gisements d'économie d'énergie disponibles selon les régions climatiques et leur influence sur la courbe de charge du réseau électrique considéré.

### Références

- [1] B.K. Sovacool, The intermittency of wind, solar, and renewable electricity generators: Technical barrier or rhetorical excuse? , *Utilities Policy* , Vol. 17, 288–296, 2009.
- [2] I. Hadjipaschalis, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 13, 1513–1522, 2009.
- [3] H. Camblong, Micro-grids project, Part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal, *Renewable Energy*, Vol. 34, 2141–2150, 2009.
- [4] S. Obara, Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator, *International Journal of Hydrogen Energy* , Vol. 32, 323–336, 2007.
- [5] J.V. Paatero, Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks, *Renewable Energy*, Vol. 32, 216–234, 2007.
- [6] H. Lund, Energy system analysis of 100% renewable energy systems—The case of Denmark in years 2030 and 2050, *Energy*, Vol. 34, 524– 531, 2009.
- [7] G. Muller, Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings, *Renewable Energy*, Vol.34,1407–1412, 2009.