

Modélisation des bâtiments zéro-énergie : optimisation technico-économique

Maria FERRARA ^{1,2}, Joseph VIRGONE ^{*1}, Enrico FABRIZIO ³, Frédéric KUZNIK ¹, Marco FILIPPI ²

¹ CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA-Lyon, Université Lyon1, 20 Av A. Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France

² Dipartimento Energia (DENERG), Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10124, Torino, Italie

³ DISAFA, Università degli Studi di Torino, Via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO), Italie

***joseph.virgone@univ-lyon1.fr**

RESUME. Les éléments clés du cadre réglementaire européen qui concerne l'optimisation technico-économique sont définis dans la directive 2002/91/CE (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) et sa refonte en 2010. Le niveau optimal recherché correspondra à une fourchette de niveaux de performances pour lesquels l'analyse coûts/bénéfices calculée sur la durée de vie estimée d'un bâtiment est positive. L'objet de ce travail est de développer des stratégies générales visant à clarifier la relation entre certaines variables décisionnelles de la conception des bâtiments quasi zéro énergie, les paramètres connexes et leur gamme de variabilité. Cela se fait en réalisant au préalable une étude paramétrique, visant à identifier l'influence relative entre les variables et les solutions de conception optimale du point de vue énergétique. Nous présentons quelques résultats obtenus grâce à l'environnement de calcul TRNSYS et à la procédure établie pour l'optimisation économique à l'aide de l'outil GenOpt. L'étude de cas est une maison individuelle basse consommation située à Ambérieu-en-Bugey.

MOTS-CLÉS : Bâtiment zéro-énergie, directive Européenne, optimisation technico-économique.

ABSTRACT. The key elements of the EU regulatory framework concerning the technical and economic optimization are defined in Directive 2002/91/EC (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD) and its revision in 2010. The desired optimal level corresponds to a range of performance levels where the cost / benefit calculated on the estimated life of a building analysis is positive. The scope of the work is to develop general strategies to clarify the relationship between some of the decisional variables of the ZEBs design, the related parameters and their range of variability. This is done making beforehand a parametric study, aiming at identifying the relative influence between variables and the optimal design solutions from the energy point of view. We present some results obtained from the environment TRNSYS calculation and procedure established for the economic optimization using the GenOpt tool. The case study is a low-consumption single-family house located in Ambérieu-en-Bugey.

KEYWORDS : Net zero-energy building, European directive, technical and financial optimization.

1. INTRODUCTION

Cette étude est née dans le contexte des nouveaux défis imposés par la refonte de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD recast, 2010) qui impose l'adoption de mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. L'objectif est que tous les nouveaux bâtiments doivent

devenir quasi zéro énergie (nZEB) d'ici à 2020. Il faut noter qu'une bonne conception de nZEB est strictement liée à l'échelle locale, en fonction des données climatiques, des technologies et des matériaux disponibles, le mode de vie de la population. Il est évident que la conception d'un bâtiment quasi zéro énergie comporte un surcoût à la construction mais que ce surcoût peut être rentabilisé. Par conséquent, l'EPBD a indiqué que les États membres doivent s'assurer que les exigences de rendement énergétique minimales soient fixées en vue d'atteindre le niveau optimal de coût, qui est défini comme le niveau de performance énergétique qui entraîne les coûts les plus bas au cours de la durée de vie économique estimée. Basé sur la méthode de coût global, l'objectif est de définir pour chaque État membre les stratégies les plus efficaces pour améliorer la performance du bâtiment avec le plus bas coût global. Cela doit être fait pour différents types de bâtiments (résidentiel, collectif ou individuel, tertiaire, ...) pour lesquels l'étude doit s'appuyer sur un bâtiment de référence à définir. Nous avons appliqué la méthodologie, dans ce travail, au cas de la maison individuelle.

Après une brève description de l'étude de cas et de sa modélisation sous TRNSYS, une étude paramétrique, visant à identifier l'influence relative entre les variables et les solutions de conception optimale du point de vue énergétique, est présentée. La méthode du coût global est ensuite appliquée à l'étude de cas : GenOpt est utilisé pour déterminer le niveau optimal de coût du bâtiment. Au-delà du résultat, cette étude montre la méthodologie et les outils qui peuvent conduire à un moyen rapide d'explorer les différentes configurations du bâtiment avec un grand nombre de simulations, comme demandé par la norme européenne.

2. LE BATIMENT DE REFERENCE ET LA MODELISATION

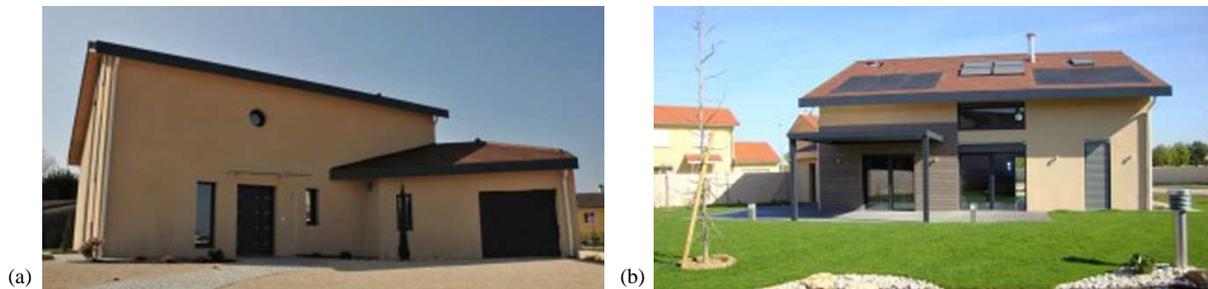


Figure 1 : Photos du bâtiment de référence. a) Façade Nord, b) Façade Sud

L'étude de cas, qui a été considéré comme bâtiment de référence (BR), est une maison unifamiliale située à Ambérieu-en-Bugey, dans l'Ain. Il est représentatif de la nouvelle construction de maison individuelle dans la région. La surface brute de plancher (SBP) des deux étages est égale à 155 m². Il est possible de reconnaître un grand nombre de caractéristiques de conception généralement utilisées dans les maisons basse consommation : l'espace de vie isolé est une forme compacte cubique (rapport S/V est égal à environ 0,68 m⁻¹, S étant la surface déperditive et V le volume chauffé) qui minimise la surface d'échange entre l'intérieur et l'extérieur. Afin de réduire les pertes de chaleur par les fenêtres et de bénéficier des apports solaires, le maximum de grandes ouvertures est orienté vers le sud (49 % de la surface totale vitrée sur le mur sud externe, 19 % sur la pente du toit sud), tandis que le pourcentage d'ouvertures vers l'est et l'ouest est moins important (respectivement 10 % et 15 % de la surface totale vitrée) et il n'y a que de très petites ouvertures orientées au nord (7% de la surface totale vitrée). Le ratio de surface vitrée est d'environ 1/5 de la SBP: le minimum imposé par la réglementation RT 2012,

égal à 1/6 de la SBP, est largement dépassé. Un avant-toit protège les fenêtres orientées au sud afin de réduire l'inconfort en été. L'isolation thermique est réalisée par l'intérieur, créant ainsi un pont thermique au plancher intermédiaire, qui a été limité par l'utilisation de rupteurs de ponts thermiques. Cependant, cette solution élimine les ponts thermiques au niveau du plancher bas et du toit. Pour le moment, 20 cm de matériau isolant sont utilisés sur des parois extérieures, 30 cm sous le plancher bas et 40 cm en toiture.

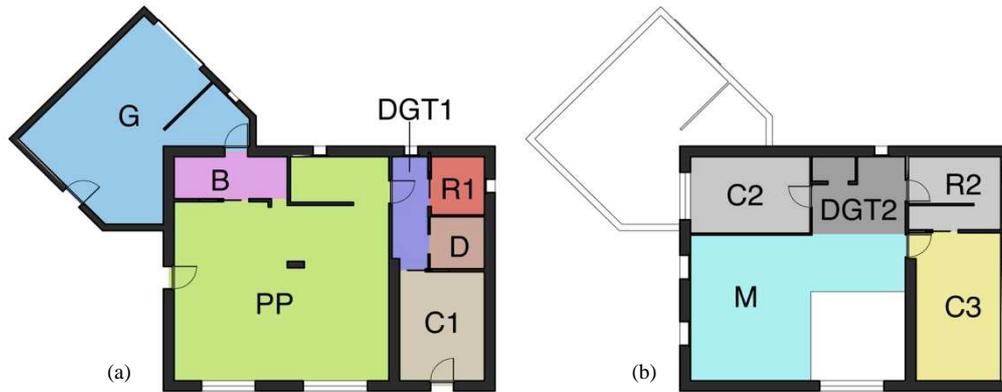


Figure 2 : Plans de la maison et zones thermiques: Pièce Principale (PP), Mezzanine (M), Chambres (C1-2-3), Toilettes (R1-2), Garage (G), Buanderie (B), Désengagements (DGT1-2), Dressing (D). a) Rez de chaussée, b) Premier étage.

Concernant le modèle sous TRNSYS, les températures de consigne pour le chauffage et le refroidissement ont été fixées respectivement à 19°C et 26°C dans toutes les zones thermiques (voir la Figure 2). Le débit de renouvellement d'air a été fixé à 0,7 Vol/h. Le fichier météo Meteonorm de Ambérieu a été utilisé dans la simulation. Sur la base de ces paramètres, les besoins de chauffage sont estimés à 48 kWh/m²/an, alors que les besoins de refroidissement sont de 12 kWh/m²/an. La valeur de besoin en chauffage peut sembler élevée dans ce contexte, mais il faut remarquer qu'il s'agit d'un besoin qui prend en compte à la fois les pertes par transmission et ventilation, avec un taux de ventilation fixe et aucun système de récupération n'a été modélisé. En fait, sur 48 kWh/m²/an le besoin (théorique) correspondant à la ventilation des locaux peut être estimé en 38 kWh/m²/an. Un système de ventilation adapté aux bâtiments zéro-énergie est pourvu en général d'un échangeur qui permet de réduire la demande d'énergie au tiers de la valeur initiale et donc permettrait de passer 11,4 kWh/m²/an pour la ventilation, ce qui engendre un besoin total de 21,4 kWh/m²/an.

3. L'ETUDE PARAMETRIQUE ET L'OPTIMISATION TECHNIQUE

3.1. LA METHODE

Comme déjà mentionné, une étude paramétrique sur le BR a été faite dans le but d'estimer l'impact de la variation de chaque élément de l'enveloppe du bâtiment et de la géométrie sur la consommation finale d'énergie annuelle totale. Afin d'assurer le déroulement facile et rapide de plusieurs simulations, le logiciel de simulation TRNSYS (SEL et al., 2012) a été couplé avec le logiciel d'optimisation GenOpt (BNL, 2008), qui permet de définir les paramètres et les contraintes pour réaliser l'étude paramétrique. De cette manière, le besoin d'énergie peut être calculé en utilisant TRNSYS en entrant les valeurs des paramètres sélectionnés par GenOpt. Chaque simulation avec les valeurs des

paramètres est enregistrée dans un fichier texte. Les valeurs sont ensuite élaborées dans des feuilles de calcul.

Les paramètres choisis pour la maison sont présentés dans la figure 3 et décrits dans le tableau 1. L'intervalle et le pas de leur variation ont été fixés en fonction des exigences de la réglementation (par exemple, la surface de fenêtre minimum est fixée à la limite imposée par la réglementation nationale française), la faisabilité technique et les critères du marché (par exemple, les types de fenêtres sont choisis parmi ceux disponibles sur le marché français). La valeur initiale (INI) est la valeur fixe prise en charge par les paramètres pendant la variation des autres paramètres, qui correspond à la valeur réelle du BR. Les caractéristiques des types de fenêtres sont décrites dans le tableau 2.

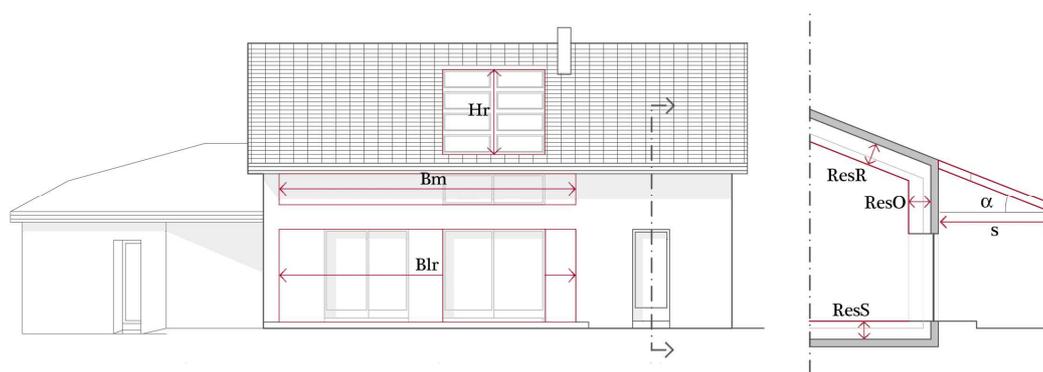


Figure 3 : Représentation des paramètres sur la façade sud et la coupe transversale

Nom	Description des paramètres	Unité	Min	Max	pas	INI
ResM	Résistance thermique de la couche d'isolation des murs extérieurs	[m ² Kh/kJ]	0.25	5.00	0.25	1.75
ResT	Résistance thermique de la couche d'isolation du toit	[m ² Kh/kJ]	0.25	5.00	0.25	3.50
ResP	Résistance thermique de la couche d'isolation du plancher bas	[m ² Kh/kJ]	0.25	3.00	0.25	2.50
TF	Type de fenêtre des façades N, E, O	[-]	1	5	1	4
TFS	Type de fenêtre de la façade Sud	[-]	1	5	1	4
TFT	Type de fenêtre du toit	[-]	1	5	1	4
Lrc	Largeur de la fenêtre rez-de-chaussée de la façade sud (hauteur = 2.15 m)	[m]	2.20	7.80	0.20	4.20
Lm	Largeur de la fenêtre au premier étage de la façade sud (hauteur = 0.80 m)	[m]	0.20	7.80	0.20	2.40
Ht	Hauteur de la fenêtre du toit (largeur = 2.28 m)	[m]	0.00	4.72	0.59	4.72
Ct	Profondeur de la casquette du toit sud	[m]	0.20	3.60	0.20	0.80

Tableau 1. Description et valeurs des paramètres

Type	Description	Coeff. U [W/(m ² K)]	Coeff. g
1	4/16/4 – Double vitrage	2.00	0.70
2	3/12.7/2.5 – Double vitrage, faible émissivité	1.76	0.59
3	4/16/4 – Double vitrage, faible émissivité avec argon	1.43	0.58
4	4/16/4/16/4 – Triple vitrage	0.70	0.50
5	4/16/4/16/4 – Triple vitrage avec argon	0.40	0.40

Tableau 2. Description des types de fenêtres

3.2. LES RESULTATS

Ici, quelques résultats relatifs à la variation de certains paramètres sont présentés. Les graphiques donnent sur l'axe vertical le pourcentage de la variation de la performance énergétique concernant les besoins de chauffage et de refroidissement séparément et aux consommations totales selon la variation du paramètre donné sur l'axe horizontal. Dans chacun des schémas, la valeur "INI" du paramètre est reconnaissable par le point où la courbe coupe l'axe horizontal. Les valeurs positives de ce pourcentage correspondent à une amélioration de la performance énergétique par rapport à la valeur de référence, tandis que les valeurs négatives représentent une diminution de la performance énergétique : le point le plus haut de la courbe des besoins totaux correspond à la valeur optimale du paramètre.

Le graphique de la figure 4a présente la courbe de variation de performance liée à la variation de l'isolation du toit (paramètre ResP). Une insulation élevée a un effet positif sur les besoins de chauffage et donc sur les besoins totaux, puisque l'effet sur le refroidissement est presque nul. La figure 4b présente les résultats relatifs au paramètre Ct : la valeur optimale (0,8 m) correspond à la valeur INI et dérive d'un compromis entre l'effet positif des apports solaires en hiver et l'effet négatif en été. Les valeurs optimales de tous les paramètres sont reportées dans le tableau 3.

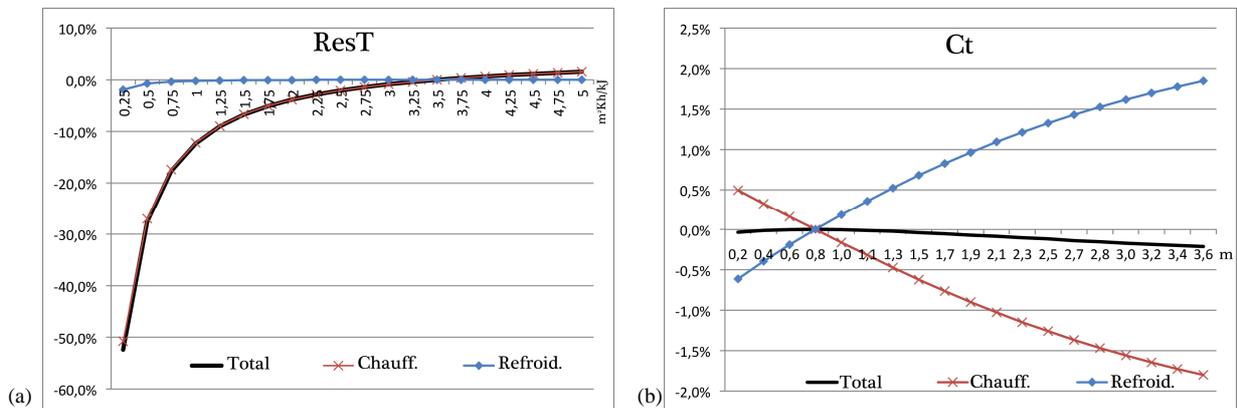


Figure 4 : Exemples d'études paramétriques. a) Paramètre ResP, b) Paramètre Ct.

	ResM [m²Kh/kJ]	ResT [m²Kh/kJ]	ResP [m²Kh/kJ]	TF [-]	TFS [-]	TFT [-]	Lrc [m]	Lm [m]	Ht [m]	Ct [m]
Valeur optimale	5	5	3	5	5	5	2.20	0.20	1.18	0.80

Tableau 3. Valeurs optimales de tous les paramètres étudiés

4. L'OPTIMISATION ECONOMIQUE

4.1. LA METHODE

Le niveau optimal recherché correspondra à une fourchette de niveaux de performances pour lesquels l'analyse coûts/bénéfices calculée sur la durée de vie estimée d'un bâtiment est positive. Les entrées de ce calcul sont les données climatiques, les caractéristiques du bâtiment de référence qui doivent être prédéfinis, l'accès aux infrastructures énergétiques et leurs coûts, les caractéristiques des usagers, les coûts des matériaux et des technologies, etc. Il est bien évident que la conception d'un bâtiment zéro énergie n'est pas encore rentable du point de vue des coûts, et que cela donnera lieu à des résultats différents en fonction du pays et du type d'utilisation des bâtiments (bâtiments tertiaires ou résidentiels).

Dans les différents Etats Membres de l'Union Européenne les procédures pour le déroulement de ces calculs à partir de la définition des bâtiments de référence sont actuellement en cours. Un groupe de travail au sein de la REHVA (Federation of European Heating, Ventilating and Air Conditioning Associations) a aussi été mis en place. Le travail que nous avons mené est le fruit d'une collaboration franco-italienne en vue d'améliorer nos méthodes et de les appliquer au cas de la maison individuelle.

Conformément à la directive EPBD, les calculs de coûts globaux se traduisent par une valeur actualisée nette des coûts engagés au cours d'une période de calcul définie, en tenant compte des valeurs résiduelles des composants ayant des durées de vie plus courtes que celles du bâtiment et qui doivent donc être remplacés au cours des 30 années du calcul. Selon le mode opératoire décrit dans la norme européenne EN 15 459 (CEN, 2007), le coût global est directement lié à la durée du calcul qui est noté τ dans la relation suivante.

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_j \left(\sum_{i=1}^n C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) - V_{f,\tau}(j) \right) \quad (1)$$

où C_G représente le coût global visé à partir de l'année τ_0 , C_I est le coût de l'investissement initial, $C_{a,i}(j)$ est le coût annuel pour le composant j à l'année i (y compris les frais et les coûts périodiques ou remplacements en cours d'exécution), $R_d(i)$ est le taux d'actualisation pour l'année i , $V_{f,\tau}$ est la valeur finale du composant j à la fin de la période de calcul.

Dans le contexte de coût optimal recherché dans cette procédure, les coûts sont écrits en tant que fonction de paramètres notés p . Ainsi, les termes de l'équation précédente deviennent :

$$C_I = \sum_j f_j(p) \quad (2) \quad C_{a,i}(j) = f_{a,i,j}(p) \quad (3)$$

Coût d'investissement	Paramètre	Unité	Fonction coût unitaire (€/unité)
Isolation intérieure des murs extérieurs	ResM	m ²	37.639*exp(0.351*ln(ResM))
Isolation de la toiture	ResT	m ²	43.478*exp(0.309*ln(ResT))
Isolation du plancher bas	ResP	m ²	38.115*exp(0.186*ln(ResP))
Fenêtre Type 1	Surface	m ²	349.35x+28.17
Fenêtre Type 3	Surface	m ²	390.85x+29.37
Fenêtre Type 4	Surface	m ²	454.16x+36.62
Fenêtre Type 5	Surface	m ²	460.45x+34.45

Tableau 4. La fonction coût d'investissement des éléments de construction

Ces fonctions coûts ont été déterminées en combinant les listes de prix français (Batiprix, 2005) et les données des entreprises de construction locales, tous les coûts comprennent le coût des travaux d'installation et de main d'œuvre. L'analyse des coûts a révélé que les fonctions de coût d'isolation sont des fonctions exponentielles, alors que les coûts des fenêtres ont été simplifiés sous forme de fonctions linéaires. Un système d'énergie tout-électrique typique a été considéré pour cette étude. Le coût d'investissement est considéré de 300 €/kW de puissance installée, avec un temps de remplacement de 15 ans. Le prix de l'énergie a été supposé égal aux prix courants des grandes compagnies d'électricité qui varient en fonction des types d'abonnement. Dans nos calculs, les coûts ont été fixés à 0,07952 €/

kWh en heures de nuit et 0,11442 € / kWh en heures de jour. Le taux d'intérêt du marché a été estimé à 4 % avec un taux d'inflation égal à 2 %, la période de calcul est de 30 ans.

4.2. LES RESULTATS

Toutes les combinaisons des valeurs des paramètres effectuées par le programme d'optimisation peut être considéré comme un ensemble de mesures d'efficacité énergétique (EMEE), conformément aux lignes directrices européennes (Guidelines, 2012). On notera que dans (1) seulement les coûts variables liés à la variation des paramètres ont été examinés. Donc, la fonction « objectif » d'optimisation représente le coût global pour chaque EMEE.

Le graphique de la figure 5a présente le processus d'optimisation suivi par l'algorithme PSOCC (algorithme d'optimisation pour les variables discrètes) sélectionné par GenOpt. La fonction coût évolue dans une bande dont la hauteur est de plus en plus réduite, et converge vers une valeur minimale. Le processus s'arrête lorsque la même valeur minimale se produit plus d'un certain nombre de fois défini par l'utilisateur. La représentation consommation/coût de la figure 5b a été faite rapportant toutes les valeurs de coût obtenues pour chaque simulation en fonction de la consommation d'énergie primaire (le facteur de conversion de l'énergie primaire pour l'électricité en France est égal à 2,58) comme indiqué dans (Guidelines, 2012). Au lieu d'une ou plusieurs courbes du type Pareto, on obtient un nuage de points, chacun représentant une combinaison de valeurs de paramètres. La valeur de prestation énergétique optimale est celle qui possède le coût global minimum (Figure 5b, C_OPT).

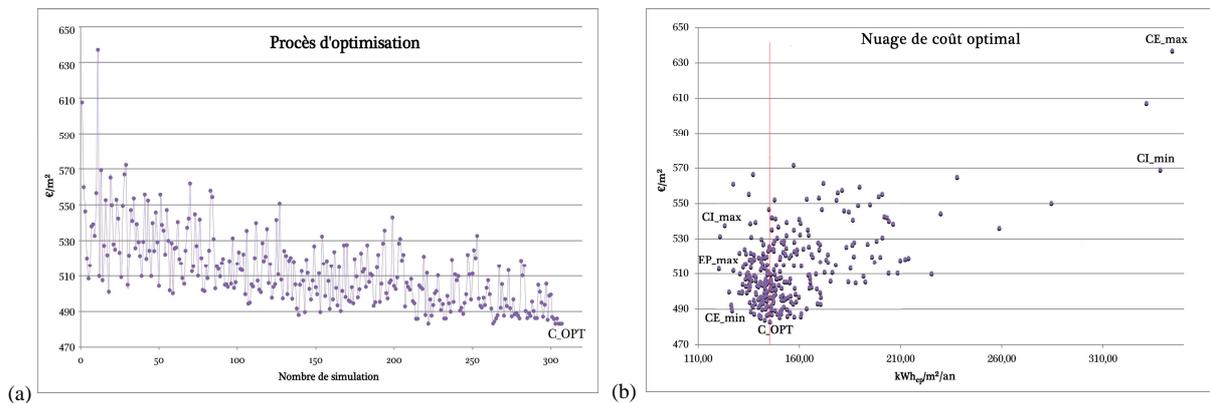


Figure 5 : Optimisation économique. a) Processus de l'optimisation, b) Nuage de coût optimal.

Ensuite, des valeurs significatives ont été identifiées sur le nuage. Premièrement, la valeur de coût optimal (C_OPT) est indiquée : dans ce cas, le niveau optimal de coût est égal à 145,5 kWh_{ep}/m²/an, avec un coût global de 483 euros/m². Les valeurs des paramètres qui conduisent au niveau optimal de coût sont indiquées dans le tableau 5.

	ResM [m ² Kh/kJ]	ResT [m ² Kh/kJ]	ResP [m ² Kh/kJ]	TF [-]	TFS [-]	TFT [-]	Lrc [m]	Lm [m]	Ht [m]	Ct [m]
Valeur C_OPT	2.25	3	3	1	3	3	2.20	0.6	0	0.2

Tableau 5. Valeurs des paramètres qui conduisent au niveau optimal de coût C_OPT.

Afin d'évaluer les limites de l'optimisation et de voir la position du niveau de coût optimal, les valeurs maximales et minimales, tant en termes de coûts d'investissement (CI_min et CI_max) et

d'énergie (CE_min, CE_max, y compris tous les coûts liés au système énergétique), sont explorés dans la composition de leur coût global (figure 6). EP_min indique les besoins énergétiques minimaux. Dans la figure 6, CI_TFT représente le coût d'investissement lié aux paramètres concernant la fenêtre de toit (TFT et Ht), CI_TFS est le coût d'investissement lié aux fenêtres de la façade sud (paramètres TFS, Lrc et Lm) et CI_TF est le coût d'investissement lié aux autres fenêtres.

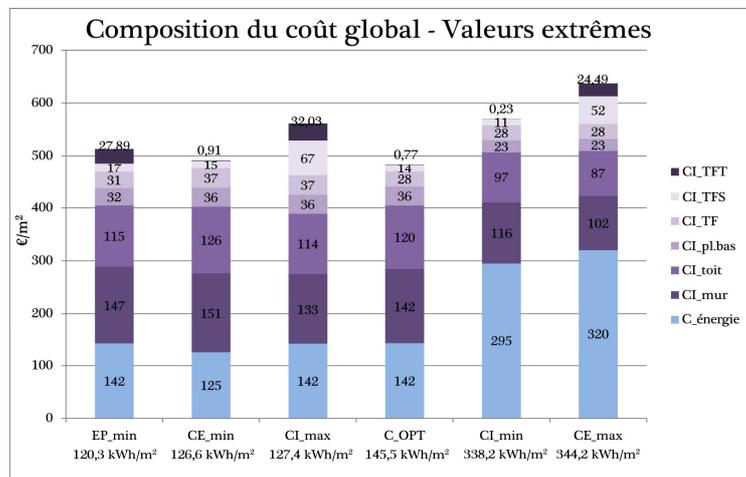


Figure 6 : Composition du coût global pour les valeurs extrêmes

5. DISCUSSION

Comme le coût de l'électricité est très élevé, il est clair que, compte tenu du calcul sur 30 ans, un coût initial élevé sur l'investissement permettant une haute performance de l'enveloppe est également recommandé d'un point de vue économique. Ce n'est qu'un exemple, que ce travail a tenté d'établir une procédure rapide et précise pour l'optimisation qui pourrait être appliquée à différentes études de cas (Ferrara, 2013). Il est connu que l'utilisation du système énergétique le plus efficace pourrait conduire à une solution différente. En outre, d'autres études doivent être réalisées en termes d'analyse de sensibilité basée sur la variation des données financières et les coûts des produits.

6. REFERENCES

- Batiprix, 2005. Gros œuvre et Second œuvre, 22^e édition, vol. 1-2, Groupe Moniteur
- Berkeley National Laboratory, 2008 «GenOpt-Generic Optimization Program». *User Manual*, Version 2.1.0, Berkeley
- BPIE (Buildings Performance Institute Europe), 2010. «Cost Optimality. Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Building Directive», BPIE
- CEN (European Committee for Standardization), 2007. Standard EN 15459:2007
- EPBD recast, 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*
- Ferrara, Maria, 2013. «Modelling Zero Energy Buildings : technical and financial optimisation». Master of Science thesis, Polytechnic of Turin.
- Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU
- RT 2012. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, «Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.»