

# Développement d'un outil pour l'optimisation des besoins d'une habitation et le choix des systèmes à énergie renouvelable

Tiberiu Catalina<sup>1</sup>, Joseph Virgone<sup>2,3</sup>, Eric Blanco<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CETHIL – Centre de Thermique de Lyon, INSA Lyon, 20 Avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex  
[tiberiu.catalina@insa-lyon.fr](mailto:tiberiu.catalina@insa-lyon.fr)

<sup>2</sup>DGCB – ENTPE, rue Maurice Audin - 69518 VAULX en VELIN Cedex, <sup>3</sup> Université Lyon 1  
[joseph.virgone@entpe.fr](mailto:joseph.virgone@entpe.fr)

<sup>4</sup>AMPERE –Ecole Centrale de Lyon, Bâtiment H9, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex  
[eric.blanco@ec-lyon.fr](mailto:eric.blanco@ec-lyon.fr)

---

## RESUME.

Cet article décrit un outil d'aide à la décision, SERAD, qui a été créé dans le but d'être utilisé comme un instrument pour prédire et optimiser la demande énergétique des bâtiments, pouvant également être utilisé comme un moyen de conception/choix des systèmes d'énergie renouvelable. Dans une première phase, les besoins en chauffage d'une habitation sont obtenus via des modèles de prédiction. Ces modèles ont été obtenus préalablement par une analyse de régression à partir d'un grand jeu de données réalisé par des simulations en régime dynamique. Les entrées de ces modèles sont le facteur de forme, l'inertie thermique du bâtiment exprimée par une constante de temps, le coefficient moyen de déperdition par transmission ( $U_{bat}$ ), la surface des baies vitrées définie comme le ratio surface vitrée/surface habitable et un coefficient de climat qui tient compte de la température extérieure et du rayonnement solaire. Les sorties des modèles sont les besoins mensuels en énergie et sont exprimées en kWh/m<sup>3</sup>/mois. La deuxième phase correspond à la conception des systèmes à énergie renouvelable. Dans cette étape, le dimensionnement des systèmes ainsi qu'un calcul économique de rentabilité et un calcul de l'impact environnemental sont réalisés. Dans la dernière étape, une méthode d'aide à la décision est utilisée pour le choix du système ou multi-système qui convient le mieux vis à vis des critères énergétiques, économiques et environnementaux.

MOTS-CLÉS : outil de conception, systèmes d'énergie renouvelable, méthode multicritère

---

## ABSTRACT.

This article describes a decision-support tool, SERAD, which was created in order to be used as a tool to predict and optimize the energy demand of buildings. It can also be used as a mean of design / choice of renewable energy systems. In a first phase, energy heating demand of a house is obtained through predictive models. These models have been obtained in advance by a regression analysis from a large data set produced by dynamic simulations. The entries of these models are the form factor, the thermal inertia expressed by a constant time, the average coefficient of transmission loss ( $U_{bat}$ ), the surface of windows defined as the ratio of glass / living space and a climate coefficient that reflects the outside temperature and solar radiation. The output models are the monthly energy needs and are expressed in kWh/m<sup>3</sup>/month. The second phase is to design renewable energy systems. In this stage, the design of systems and an economic calculation of profitability and a calculation of environmental impact are made. In the last step, a method of decision support is used for choosing the system or multi-system that best suits according the energetic, economic and environmental criteria.

KEYWORDS : decision-support tool, renewable energy systems, multi-criteria method

---

## 1. INTRODUCTION

De plus en plus les sources d'énergies renouvelables vont co-habiter avec les sources d'énergies conventionnelles. Ces sources peuvent couvrir les besoins en énergie des habitations, cependant elles

sont sujettes à des contraintes spécifiques en termes de puissance et de disponibilité. De plus, elles nécessitent un investissement économique conséquent, limitant ainsi la rentabilité d'un tel système par rapport à une consommation d'énergie classique. Les contraintes de ces sources devront être bien intégrées afin d'optimiser leur utilisation et ainsi limiter les apports extérieurs. L'enjeu est double, puisque économique et écologique. L'utilisation des énergies renouvelables pose trois problèmes : le premier est le choix des systèmes, le second est le dimensionnement des systèmes choisis, qui est un compromis entre l'exigence de performance du système et les contraintes économiques, matérielles et environnementales, enfin le dernier problème est celui de la régulation de ces systèmes. Installation de plusieurs sources d'énergie renouvelable sur le même site est encore plus attrayante lorsque des économies d'énergie substantielles pourraient être faites si les avantages de chaque source sont associés. Les besoins d'énergie des bâtiments ont une influence sur la conception des systèmes énergie renouvelable, il est donc très important d'abord d'optimiser la performance énergétique des bâtiments et après d'analyser les différentes sources d'énergie renouvelable qui pourraient être ajoutées. Dans la plupart des cas des simulations dynamiques sont nécessaires, mais elles exigent cependant une quantité considérable de données et de temps même pour un utilisateur expérimenté et, dans certains cas du matériel informatique puissant. Pour trouver un compromis entre les méthodes simples et celles trop complexes d'évaluation des besoins d'énergie, une bonne alternative sera d'utiliser des modèles de prédiction qui peuvent estimer les besoins énergétiques avec des faibles erreurs par rapport aux simulations qui sont considérées actuellement les méthodes les plus précises d'estimation.

En utilisant une grande base de résultats de simulations, nous avons développé des fonctions polynômiales qui peuvent prédire avec une précision de 5% les besoins de chauffage mensuels pour des maisons d'habitation. Ces équations ont été mises en œuvre dans un outil d'aide à la décision appelé SERAD et en connexion avec différents modules de calcul des systèmes d'énergies renouvelables, le tout ayant pour but d'être utilisés dans une méthode d'aide à la décision.

## 2. STRUCTURE DE L'OUTIL

SERAD a été créé comme un outil nécessaire pour la décision quand on traite un nombre important d'alternatives et de critères. Son développement est devenu obligatoire afin de rendre possible l'analyse de toutes les solutions possibles et de les optimiser en même temps, sans l'aide d'un code de simulation du bâtiment complexe.

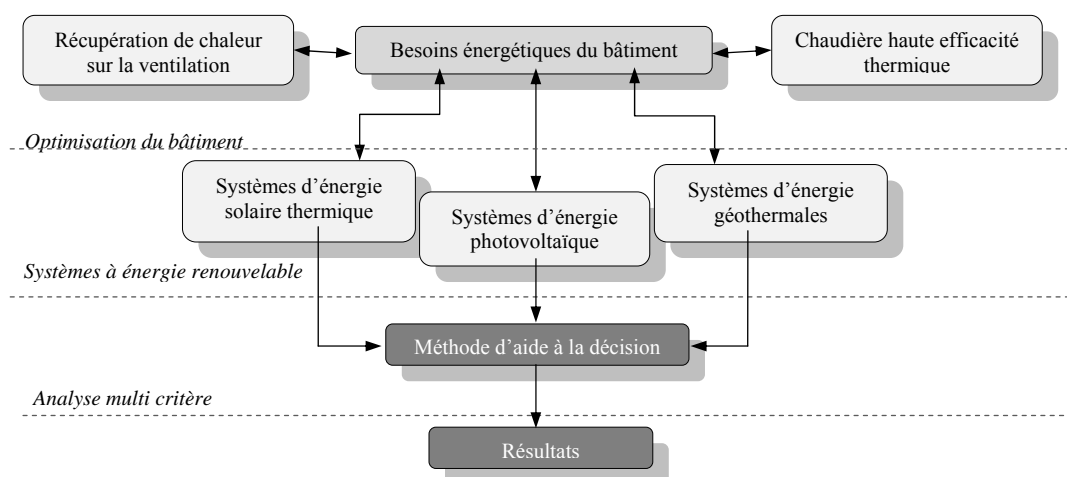


Figure 1 : Structure modulaire du SERAD

## 2.1. BESOINS ENERGETIQUES DU BATIMENT

Les besoins pour le chauffage et pour l'électricité sont estimés et analysés avec l'outil SERAD. En s'appuyant sur une base de données complète des consommateurs d'énergie électrique et utilisant des scénarios d'utilisation, les consommations d'énergie électrique sont calculées à ce niveau. Le défi majeur dans cette première étape a été d'estimer les besoins mensuels de chauffage. Supposons qu'on a une « boîte noire » avec les sorties connues (besoins en chauffage), la complexité du problème a été de trouver les bonnes entrées et surtout les modèles qui donnent des résultats précis. Les modèles de prédictions ont eu comme base, les simulations en dynamique avec un pas de temps horaire réalisées en utilisant le logiciel TRNSYS (Klein et al., 2000). Le modèle de bâtiment, connu sous le nom de « Type56 », est compatible avec les exigences générales de la directive européenne (Directive Européenne, 2002) sur la performance énergétique des bâtiments et a été utilisé pour notre étude.

Nous avons constaté que les modèles dans les « boîtes noires » pouvaient se mettre sous forme de fonctions polynomiales avec les entrées suivantes :

- Le coefficient de forme ( $C_f$ ), qui est défini comme le rapport entre le volume chauffé du bâtiment ( $V$ ) et la somme de toutes les surfaces qui sont en contact avec l'extérieur, le sol ou avec des espaces non chauffés ( $\sum A_i$ ).
- Le coefficient moyen de déperdition par l'enveloppe du bâtiment ( $U_{bat}$ ) défini dans la Réglementation Thermique Française Standard (CSTB, 2005).
- La constante de temps du bâtiment ( $\tau$ ) qui définit l'inertie thermique de la structure.
- Le ratio surface vitrée/surface habitable de plancher (RVS).
- Coefficient du climat ( $C_c$ ) représenté par la température sol-air.

La température sol-air (Yumrutas et al., 2007) a été calculée en utilisant les valeurs mensuelles de température et de rayonnement solaire horizontal et avec un coefficient de convection extérieur de  $23 \text{ W/m}^2\text{K}$  (CSTB, 2005) pour tous les fichiers météo étudiés. En utilisant une base de données de 18,144 simulations, des régressions ont été possibles et des fonctions polynômiales ont été obtenues. Une analyse de sensibilité a été réalisée avec 270 cas de validation et une erreur relative maximale de 5% a été détectée pour le climat de Nice (chaud et humide). Les modèles d'estimation sont restreints au climat de la France (Strasbourg-Nice- comme limites inférieure et supérieure) mais aussi aux maisons individuelles qui prennent des valeurs de  $C_f$  entre 0.7-1.25. Pour l'optimisation énergétique d'un bâtiment plusieurs solutions sont possibles. L'optimisation de la morphologie d'un bâtiment permet de fortes réductions d'énergie car pour un bâtiment qui a un coefficient de forme grand (ex.  $C_f=1.25$ ), qui se traduit par un volume chauffé plus grand par rapport à la surface déperditive, une réduction de la consommation est possible par rapport à le même bâtiment mais avec une  $C_f$  plus petit.

(Depecker et al., 2001) ont étudié la relation entre la forme du bâtiment et sa consommation d'énergie. Fig.2 montre l'impact du ratio  $V/\sum A_i$  sur les besoins en chauffage pour une maison de  $100\text{m}^2$  située à Paris avec une valeur du  $U_{bat}$  (CSTB, 2005) de  $0.7\text{W/m}^2\text{K}$  et avec une faible inertie thermique du bâtiment ( $\tau=10\text{h}$ ). La saison de chauffage dans les modèles d'estimation est considérée d'Octobre à Avril et la température de consigne de  $19^\circ\text{C}$ .

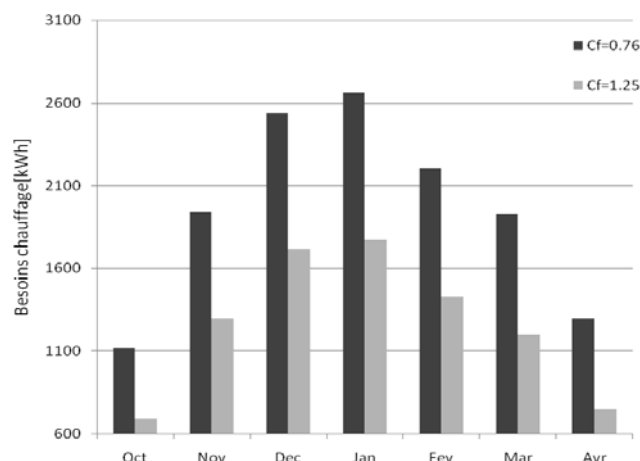


Figure 1 : Impact du coefficient de forme sur les besoins annuels de chauffage

Le ratio surface vitrée/surface habitable est supposé égal à 20% et la distribution sur l'enveloppe est : 40% au Sud, 20% au Nord, Est et Ouest. Les modèles de prédictions ont été créés pour différentes orientations de référence données dans les Réglementations Françaises (RT2000-RT2005), mais aussi pour d'autres. L'inertie thermique du bâtiment pourrait également être un bon élément dans le processus d'optimisation. L'effet de l'inertie est particulièrement mis en évidence en mi-saison et en été, périodes où les besoins pour le chauffage/refroidissement sont réduits. Les avantages d'une forte inertie ne sont pas seulement liés à la réduction d'énergie mais également à l'amélioration du confort thermique.

Les résultats du tableau 1 montrent l'effet d'augmentation de la constante de temps de 4 heures à 100 heures sur les besoins en chauffage pour les mois de janvier et d'avril. Les hypothèses de cette étude sont les mêmes que pour le cas précédent avec l'exception que le  $C_f$  prend une valeur de 1,25.

Pour le mois de janvier on observe une légère réduction de 5% pour les besoins de chauffage entre le bâtiment ayant une constante de temps de 4h et celui ayant 100h, tandis que pour le mois d'avril cette réduction atteint jusqu'à 14%.

Constante de temps du bâtiment [h]	4	20	50	70	100
Besoins chauffage-Janvier	1785	1770	1743	1725	1697
Besoins chauffage-Avril	771	743	703	684	668

Tableau 1 : Impact de la constante de temps sur la consommation de chauffage exprimée en kWh pour les mois de janvier et avril

La surface vitrée pourra être aussi un élément permettant d'augmenter/réduire les besoins en chauffage/refroidissement d'une maison. (Persson et al.,2006) ont montré qu'en utilisant des fenêtres à haute efficacité thermique serait encore meilleur que d'avoir des parois isolées mais sans fenêtres.

L'explication se retrouve par le fait qu'une fenêtre peut capter et utiliser l'énergie solaire pour chauffer la maison pendant des périodes d'ensoleillement mais quand la température extérieure est inférieure à la température intérieure. Les normes françaises proposent un optimum de référence de 16.5% de surface vitrée par rapport à la surface habitable mais cette valeur pourrait aller jusqu'à 22%,

des valeurs plus élevées en augmenteraient les risques de surchauffe pendant la période estivale. La surface vitrée doit toujours être analysée en même temps que l'inertie thermique, car ce sont deux éléments très liés entre eux et qui peuvent réduire fortement la consommation d'énergie. En ce qui concerne les apports internes, une étude annexe a été réalisée en vue de trouver les facteurs de récupération des gains internes en fonctions du type de source (radiatif ou convectif).

## 2.2. SYSTEMES D'ENERGIE RENOUVELABLE

Les résultats de la première étape de l'outil SERAD sont utilisés pour la deuxième phase qui représente la conception de systèmes d'énergies renouvelables. Plusieurs modèles physiques ont été mis en œuvre et validés préalablement.

### 2.2.1. Energie solaire thermique

L'énergie solaire est idéale pour la production d'eau chaude sanitaire ou pour chauffer une maison avec un plancher radiant. Pour récupérer l'énergie solaire, des panneaux solaires sont utilisés. Actuellement, de nombreux producteurs fabriquent des panneaux solaires thermiques avec différentes caractéristiques thermiques. L'un des paramètres le plus important dans la conception du système est le rendement des panneaux et leur surface. L'équation 1 montre la relation de calcul du rendement en fonction de plusieurs paramètres:

$$n = n_0 - \frac{U_1(T_{mf} - T_e)}{H^*} - \frac{U_2(T_{mf} - T_e)^2}{H^*} \quad (1)$$

où  $n_0$  est le rendement optique du panneau solaire,  $U_1, U_2$  sont des coefficients de perte de chaleur par conduction et convection,  $T_{mf}$  est la température moyenne de l'eau chaude,  $T_e$  est la température extérieure et  $H^*$  est le rayonnement global. Les résultats du SERAD ont été comparés et validés avec un autre outil appelé Solo2000. Un calcul financier est réalisé, en utilisant des paramètres comme le coût d'investissement, la durée de vie du système etc. Concernant l'impact environnemental une comparaison est faite avec d'autres sources d'énergie (gaz, électricité, charbon). Les résultats sont exprimés en tonnes de CO<sub>2</sub> évitées par an. En utilisant les mêmes hypothèses que dans les cas précédents nous avons analysé six alternatives d'utilisation de l'énergie solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire (ECS). Les besoins pour la production d'ECS sont de 2893,6 kWh pour 4 personnes à Paris. Dans le tableau 2 est illustré l'impact de l'utilisation de l'énergie solaire thermique sur la consommation d'énergie, ainsi que le temps de retour du système.

Solution	Energie fournie [kWh]	Taux de couverture [%]	Temps de retour [années]
1	1561	53.94	8.25
2	1790	61.81	9.59
3	1931	66.73	11.12
4	1172	40.52	10.98
5	1511	52.24	11.36
6	1680	58.01	12.77

Tableau 2. Impact de la surface de panneaux solaires et de leur impact sur le taux de couverture et le temps de retour

Les trois premières solutions correspondent à une augmentation de la surface (3,4 et 5 m<sup>2</sup>, n = 0,67) et le dernier cas, correspond à la même augmentation pour la surface mais avec un rendement des panneaux inférieur (n = 0,47). Il peut être observé à partir du Tableau 2 qu'un faible rendement des panneaux solaires a un impact majeur sur la réduction de l'énergie mais aussi sur le temps de retour qui passe de 8 ans à 11 ans par rapport à la solution 1, où le rendement est plus grand.

L'un des avantages de SERAD est que c'est un outil transparent avec la possibilité de modification de tous les paramètres qui interviennent dans les calculs. L'impact environnemental des solutions ci-dessus est analysé et comparé à une consommation équivalente au gaz. Les résultats ont montré qu'une réduction de 316 kgCO<sub>2</sub>/an est possible avec la solution 1, tandis que pour la solution 3 cette réduction pourrait atteindre 392 kgCO<sub>2</sub>/an. Dans le cas où ces solutions sont couplées avec une chaudière bois, plus de 2,3 tonnesCO<sub>2</sub>/an pourront être évitées.

De plus par rapport à l'utilisation d'un chauffage électrique qui a comme coût annuel 1236 €, l'utilisation du bois fait que ce coût est réduit jusqu'à 672 €. Les valeurs économiques utilisées ont été prises des données statistiques et de la littérature mais les utilisateurs de SERAD peuvent changer toutes les entrées des calculs (prix de l'électricité, abonnement, prix du bois, type de bois, rendement des chaudières, coût d'entretien des chaudières, etc.). L'hypothèse pour ces résultats est que le rendement de la chaudière bois est de 80% et du bois sec a été utilisé dans la combustion. Le nombre de connexions entre les systèmes et la multitude des paramètres d'optimisation fait que c'est une démarche impossible pour trouver la meilleure solution sans le support d'un outil informatique.

### 2.2.2. *Energie solaire photovoltaïque*

L'énergie photovoltaïque est une solution intéressante pour convertir la lumière du soleil en électricité en utilisant des cellules photovoltaïques. Le deuxième module de SERAD permet d'évaluer la production d'énergie et la viabilité économique des différents types de projets photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques ont relativement peu de composants, mais le comportement de ces composants n'est pas linéaire et leurs interactions sont complexes. Dans la première partie des calculs, on estime la quantité d'énergie solaire reçue au cours d'une année par les panneaux photovoltaïques, en fonction de différents paramètres comme l'orientation, la pente, les données climatologiques, etc.

Dans la deuxième partie du calcul, différents paramètres du système sont définis, comme les pertes, types de panneaux, coût de l'investissement, maintenance, etc. Dans la Figure 4 on observe comment la surface des panneaux influence le rapport énergie nécessaire/énergie fournie. Les hypothèses considérées sont que la consommation électrique est de 10 kWh/jour, les panneaux sont orientés plein sud avec une pente de 45° et trois solutions ont été analysées (10, 15 et 20m<sup>2</sup>). Les données météorologiques de la ville de Paris ont été utilisées dans les calculs. En utilisant le solaire photovoltaïque 1,12 tonnes CO<sub>2</sub>/10 ans pourraient être évitées pour la première solution, 1,64 tonnes CO<sub>2</sub>/10 ans pour la deuxième solution et 2,14 tonnes CO<sub>2</sub>/10 ans pour la dernière.

Comme pour le module de calcul des installations à capteurs thermiques, dans ce module un calcul financier est réalisé en fonction de plusieurs paramètres comme le prix de vente/achat de l'électricité, les frais d'entretien, l'investissement initial.

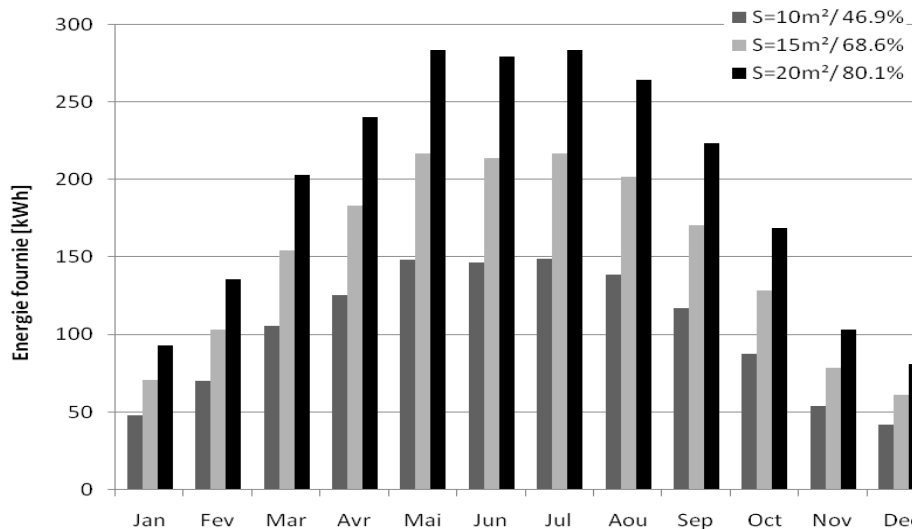


Figure 4. Impact de la surface de panneau PV sur l'énergie fournie et le taux de couverture

### 2.2.3. Pompe à chaleur géothermale

Pour maintenir une température confortable dans un bâtiment, une quantité importante d'énergie pourra être nécessaire. Par rapport à d'autres sources d'énergie pour le chauffage qui doivent être transférées sur de longues distances, l'énergie du sol a l'avantage d'être disponible sur place et en grande quantité. Une pompe à chaleur géothermique (PCG) est utilisée pour chauffer/refroidir l'espace intérieur en se basant sur les principes d'une machine frigorifique classique. Chaque kW d'électricité utilisé par un PCG permet de produire plus de 3kW de chaleur à partir de l'énergie du sol. La partie la plus importante du calcul d'une installation PCG concerne le calcul de la longueur de l'échangeur du système qui fait le transfert avec le sol.

En utilisant une modélisation des tuyaux des tuyaux enterrés dans le sol, on calcule la longueur nécessaire de tuyaux pour répondre aux besoins énergétiques obtenus précédemment par les modèles d'estimation. En utilisant les mêmes hypothèses que dans les cas précédents, maison de 100m<sup>2</sup> à Paris,  $U_{bat}=0.7W/m^2K$ , 20% surface vitrée/surface habitable, nous avons calculé l'impact environnemental et le temps de retour d'une PCG installée sur ce projet. Il a été constaté que la longueur nécessaire de l'échangeur est de 123 m, le temps de retour est de 3 ans et 15,7 tonnes de CO<sub>2</sub> /10 années sont évitées par rapport à un système à gaz.

### 2.3. ANALYSE MULTICRITERE

Sachant le nombre trop grand des alternatives et de combinaisons possibles entre différentes solutions il est obligatoire de faire appel à une méthode d'aide à la décision. Dans notre cas nous avons utilisé la méthode multicritère ELECTRE III (Roy, 1968), méthode qui est classée comme une méthode de surclassement. Elle utilise des surclassements pourvus d'un indice de crédibilité, calculé sur la base d'un indice de concordance flou et d'un veto flou. Cela entraîne une certaine complexité, notamment au niveau du graphe des surclassements. L'objectif final de la méthode est d'aider le décideur dans le processus de décision. Dans notre cas, les alternatives et les critères sont présentés dans le tableau 3.

<b>Solutions + optimisation énergétique du bâtiment</b>		
Panneaux thermiques surface 1	Panneaux PV surface 1	PCG 1
Panneaux thermiques surface 2	Panneaux PV surface 2	PCG 2
...	...	...
N solutions	N solutions	N solutions
<b>Critères</b>		
Réduction d'énergie	Temps de retour	Impact environnemental

Tableau 3. Solutions et critères utilisées dans la méthode d'analyse multicritère

### 3. CONCLUSIONS

En s'appuyant sur une grande base de données des valeurs obtenues à partir de simulations, nous avons trouvé des modèles d'estimation des besoins mensuels de chauffage. Il a été constaté que cinq entrées sont nécessaires et qu'en utilisant des fonctions polynomiales il est possible de prédire avec une erreur maximale de 5% les besoins de chauffage. Des simulations ont démontré que la morphologie du bâtiment, l'inertie thermique et la surface vitrée sont des paramètres importants dans le processus d'optimisation énergétique et de plus leur corrélation est nécessaire. Les modèles d'estimation et des modèles physiques des différents systèmes d'énergies renouvelables ont été modélisés et ont été mis en œuvre dans un outil d'aide à la décision appelé SERAD. Il permet une évaluation des besoins électriques et de chauffage, ainsi qu'un calcul énergétique, financier et d'impact environnemental des sources d'énergies renouvelables. Une méthode d'aide à la décision a été implantée dans l'outil sachant le nombre trop important des alternatives entre les systèmes et le bâtiment.

### 4. BIBLIOGRAPHIE

S.A. Klein et al., TRNSYS-Reference Manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI (USA), 2000.

Directive 2002/91/EC of the European parliament and of the council of December 16, 2002 on the energy performance of buildings.

French Thermal Standard 2005, CSTB

R. Yumrutas, O. Kaska, E.Yıldırım, Thermal estimation of total equivalent temperature difference values for multilayer walls and flat roofs by using periodic solution, *Building and Environment* 42 (2007), 1878–1885.

P. Depecker, C. Menezo, J. Virgone, S. Lepers, Design of building shape and energetic consumption, *Building and Environment* 36 (2001), 627–635.

M.L. Persson, A. Roosa, M. Wall, Influence of window size on the energy balance of low energy houses, *Energy and Buildings* 38, (2006) 181–188.

Roy, Bernard (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), *Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*, (8): 57–75.