

# COMMANDE DES SYSTÈMES MULTI-ÉNERGIES POUR LES BÂTIMENTS À HAUTE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

*Joseph Virgone<sup>1</sup>, Enrico Fabrizio<sup>1,2</sup>, Yoann Raffenel<sup>1,3</sup>, Eric Blanco<sup>3</sup>, Gérard  
Thomas<sup>3</sup>*

1 CETHIL, Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Domaine scientifique de la  
Doua, Bât. Freyssinet, 40 rue des arts, 69100 VILLEURBANNE

2 DENER, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 24, corso Duca degli Abruzzi, I - 10129  
TURIN

3 CEGELY, Centre de Génie Electrique de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 69134 ECULLY cedex

## **Résumé**

*On entend parler de plus en plus de bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire qu'ils produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Pour arriver à ce résultat, les sources d'énergie renouvelable sont, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter avec les sources d'énergie habituelles sur un même site ; cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale : il est en effet nécessaire de comprendre comment on peut obtenir le meilleur couplage entre demande et offre d'énergie, soit à l'échelle de bâtiment soit à l'échelle de quartier, et définir les règles expertes et les solutions les plus efficaces du point de vue énergétique, les plus rentables du point de vue économique ou les deux.*

*Du point de vue méthodologique, le travail essentiel sur lequel nous nous sommes engagés est d'approfondir les techniques de couplage entre bâtiment, caractérisé par les profils de besoins (électrique, thermique et frigorifique) en puissance et en énergie, et système de production de l'énergie, caractérisé par des profils de production. Ce couplage doit pouvoir se caractériser par un indice permettant de juger l'efficacité du couplage.*

*L'objectif est alors de deux types : sur une installation existante, comment trouver des solutions de commande des systèmes pour réduire au mieux les consommations d'énergie en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre façon d'utiliser ce travail consiste à proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleures du couplage entre demande et offre d'énergie et pour estimer les consommations qui en découlent.*

Mots clés : Energie renouvelable, Habitat Multi-sources, Commande, Modélisation, Optimisation, Intelligence Artificielle

## **1. INTRODUCTION**

Le secteur du bâtiment consomme aujourd'hui 47% de l'énergie produite et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre. Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, tant au niveau du neuf que de l'existant, et de

substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables. Pour cela, il faut moderniser les méthodes de conception et de rénovation des habitats en intégrant une démarche de Qualité Environnementale. L'objectif à l'horizon 2050 est le bâtiment à énergie positive, c'est-à-dire un bâtiment pouvant produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Les bâtiments ont des besoins énergétiques qui se répartissent sur trois postes :

- Chaleur : chauffage, production de l'ECS ;
- Froid : rafraîchissement ou refroidissement des locaux, conservation des aliments ;
- Electricité : utilisations captives de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel et divers auxiliaires tels que brûleurs, pompes, ventilateurs, ...)

Les combustibles fossiles et fissiles (uranium) ont des réserves limitées il est donc impératif et urgent de développer dans le bâtiment des solutions énergétiques fonctionnant directement avec des énergies renouvelables : solaire thermique, solaire photovoltaïque (pour l'électricité), géothermie, biomasse (bois –énergie), micro- ou pico-hydraulique (pour l'électricité). Ces énergies renouvelables se caractérisent par une diffusion spatiale qui est bien adaptée au caractère diffus de l'habitat.

Une autre caractéristique est que l'utilisation de ces énergies renouvelables correspond à une production de chaleur à faible niveau de température qui est tout à fait compatible avec l'application bâtiment. Toutefois, sur le site d'un bâtiment ou à proximité immédiate, il existe d'autres sources énergétiques inutilisées et souvent à faible niveau de température. Ce sont par exemple des rejets thermiques industriels ou résultant d'une autre application énergétique déjà valorisée dans le bâtiment, l'énergie contenue dans le sol adjacent (géothermie de surface), dans l'air ou dans l'eau des nappes phréatiques et des rivières proches.

L'intégration énergétique consiste à utiliser une combinaison de ces sources, pouvant se réduire à au moins une énergie renouvelable, pour couvrir le maximum de besoins énergétiques du bâtiment avec la meilleure efficacité. On trouve quelques études partielles sur le sujet [1, 2, 3]. Les combinaisons envisageables sont nombreuses et constituent un gisement potentiel d'innovations. La cogénération solaire avec des cellules PV / T, mais aussi la cogénération classique permettent de compenser des besoins en chaud et en électricité. L'association solaire thermique et pompe à chaleur géothermale réversible prélevant (ou rejetant) de la chaleur dans le sol (ou d'autres combinaisons avec des pompes à chaleur) permet de compenser la totalité des besoins de chauffage et une grande partie des besoins en ECS ainsi qu'une partie des besoins en rafraîchissement des locaux. La production de froid à partir du solaire, soit avec des machines à absorption, soit avec des réacteurs chimiques à fonctionnement continu ou discontinu, soit en utilisant des cellules à effet Peltier alimentées en électricité photovoltaïque, soit encore avec le procédé DEC (desorption and evaporative cooling appelé aussi dessicant cooling) sont autant d'exemples d'intégration énergétique.

L'objectif est de diminuer les consommations d'énergie primaire et de réduire les impacts environnementaux associés, afin de tendre vers des bâtiments "zéro énergie" ou "négawatts".

Les sources d'énergie renouvelable sont donc, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter sur un même site, cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale. Les développements actuels visent à optimiser la cohabitation de sources de natures différentes pour profiter pleinement de leurs potentiels. C'est-à-dire que leur exploitation doit se faire non seulement en fonction des

besoins mais aussi en fonction de la disponibilité de l'énergie. L'utilisation de cette énergie doit donc se faire de manière plus rationnelle pour ne pas conduire à une approche archaïque du dimensionnement consistant à opter pour la surcapacité.

Le travail qui est présenté dans ce document est la description de la méthodologie envisagée pour mener à bien aux buts que nous nous sommes fixés.

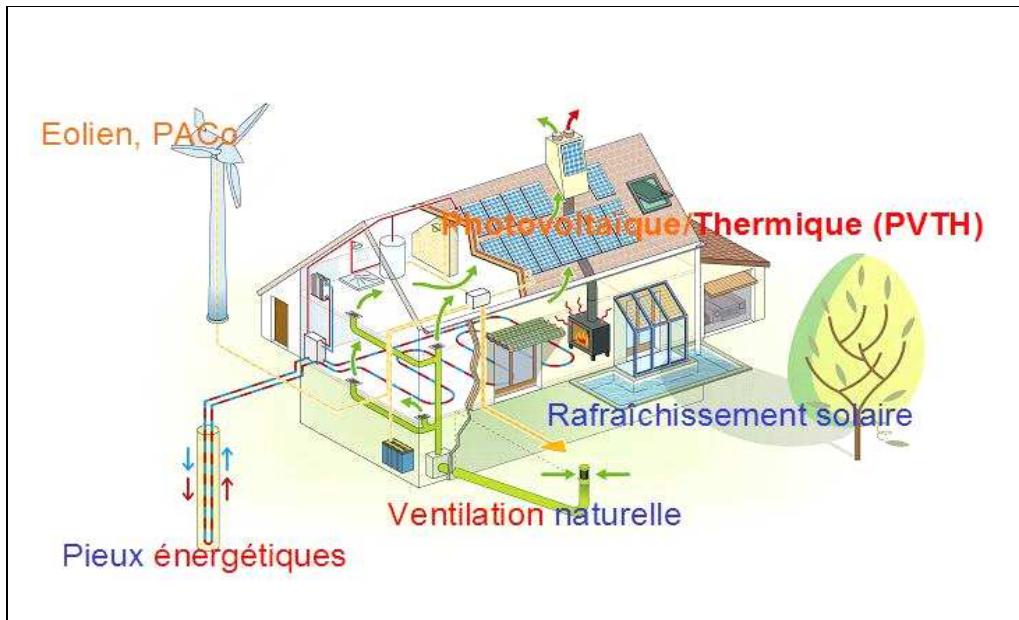


Figure 1 : Maison équipée de systèmes multi-énergies

## 2. POSITION DU PROBLEME : LA MODELISATION D'UN BATIMENT MULTI-ENERGIE

La première question à laquelle nous devons savoir répondre concerne la modélisation d'un bâtiment équipé de systèmes multi-énergies. Comment-peut-on effectuer cette modélisation ? Y-a-t-il des différences entre cette modélisation et celle d'un bâtiment traditionnel ? La première considération qui ressort est que, les sources d'énergie renouvelable ayant un caractère fortement dynamique, il est nécessaire de conduire une modélisation avec un pas de temps de calcul au moins horaire, si non le long de l'année, au moins le long de la durée du projet (en été et en hiver) et des jours moyens mensuels. Comme les décisions qui concernent l'exploitation des différentes énergies renouvelables doivent être prises au moment de la conception du bâtiment et de la définition des budgets, et comme il est long et difficile de conduire cette modélisation dynamique dans une phase, celle de conception, où on n'a pas de données suffisantes pour mettre en place un modèle type EnergyPlus ou TRNSYS, nous proposons donc l'idée d'adopter une modélisation paramétrable vis à vis de tous les flux énergétiques qui traversent le système bâtiment et qui peuvent être décomposés en flux thermiques, frigorifiques et électriques. En outre, dans un bâtiment multi-énergies les interactions entre différentes formes d'énergies sont encore plus complexes que dans un bâtiment traditionnel (on ne peut pas

dans un bâtiment multi-énergies conduire l'analyse de la partie électrique indépendamment de la partie thermique). Le modèle doit reproduire tous les flux mis en jeu et doit aussi être suffisamment détaillé et sensible pour reproduire les interactions entre les flux énergétiques qui très variables, changent de signe et ont une valeur moyenne généralement plus faible par rapport à celle d'un bâtiment traditionnel. Le schéma de modélisation en offre et en demande donné dans la figure suivante permet aussi d'envisager les meilleures stratégies de gestion de la charge (*load management*) soit au niveau de la demande d'énergie du bâtiment (isolation thermique de l'enveloppe, adoption d'appareils à haute efficacité énergétique,...) soit au niveau de l'offre d'énergie pour le bâtiment.

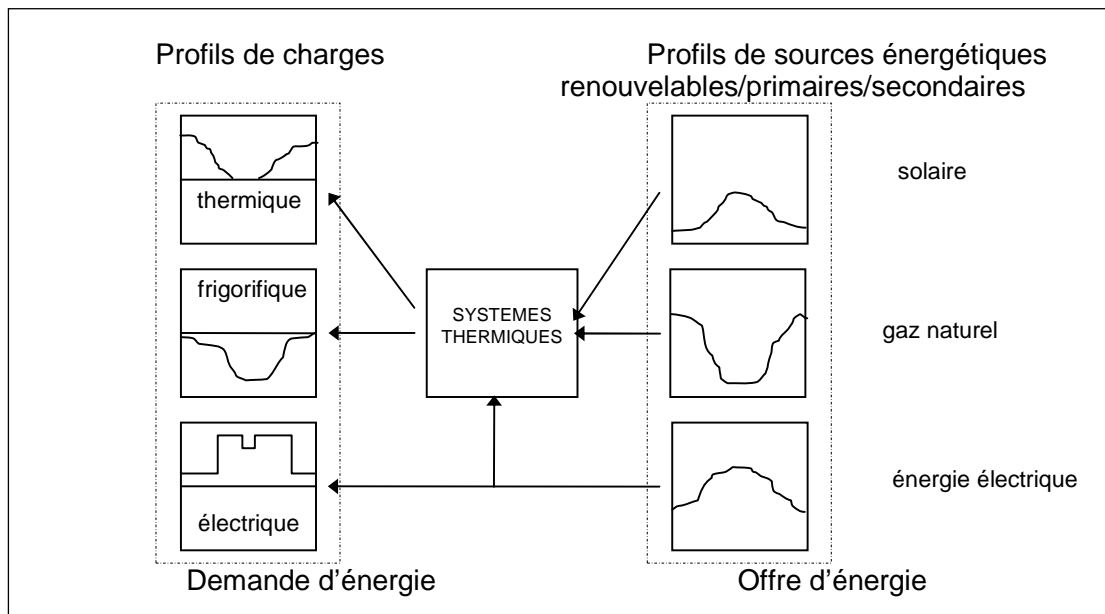


Figure 2 : Schéma de classement entre les flux énergétiques mis en jeu

Du point de vue méthodologique d'ailleurs, la différence entre une modélisation de bâtiment traditionnel et celle d'un bâtiment multi-énergies est importante : dans le premier cas on soumet des besoins aux sources énergétiques, dans l'autre la disponibilité et le coût des sources (particulièrement celle des sources renouvelables) interagissent avec les besoins.

### 3. CHOIX D'UNE ENERGIE ET VARIABILITE DES SOURCES RENEUVABLES ET DES BESOINS DE L'HABITAT

L'optimisation, dans le système envisagé dans le paragraphe précédent, ne se fonde plus sur la minimisation de la fonction coût du chauffage et de l'ECS, comme d'habitude, mais sur la minimisation de la facture énergétique totale payée par l'utilisateur. Celle-ci comprend [4] :

- l'ensemble des abonnements,
- les consommations observées pour toutes les énergies auxquelles le logement a accès (électricité, gaz, propane, fioul, etc.), ce qui inclut tous les postes utilisateurs sans

distinction : chauffage, ECS, cuisine, électroménager, éclairage, VMC, etc.

- les locations (cuve, compteurs, etc.)
  - les frais de maintenance ordinaires (mais pas les frais de grosses réparations qui sont directement prélevés à travers le loyer),
  - la quote-part du coût des services généraux ayant trait au chauffage, à l'ECS, à la VMC.
- La détermination du choix est liée à l'association d'énergies qui minimisera la facture annuelle de l'occupant et présentera sur ses concurrentes moins chères à l'investissement un temps de retour inférieur à une durée déterminée (10 ans par exemple).

Pour cela, il faut :

- inventorier les fournitures d'énergie présentes sur le site, ainsi que les techniques de chauffage/distribution/émission associées,
- déterminer pour chaque solution le montant de la facture énergétique du logement type, ramené à la surface habitable,
- évaluer le montant des travaux correspondant à chaque solution,
- classer les solutions par coût d'exploitation croissant, en indiquant pour les meilleures le temps de retour de l'investissement par rapport à leurs concurrentes moins chères.

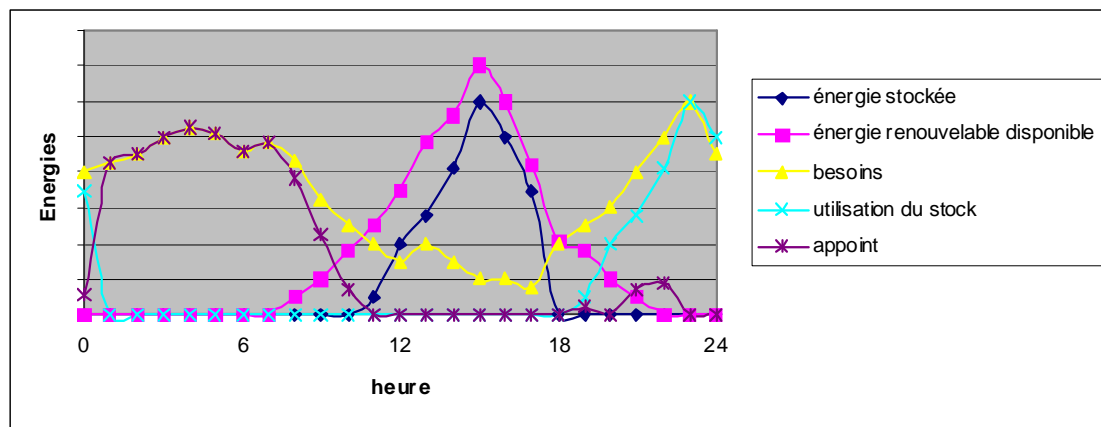


Figure 3 : Exemple de variations des flux d'énergies

#### 4. LES SYSTEMES DE CONTROLE-COMMANDE

Dans le contexte de l'autonomie énergétique des bâtiments, les efforts de recherche du Politecnico de Turin, du CEGELY et du CETHIL portent sur de nombreux domaines convergeants sur une combinaison entre : l'isolation, la ventilation, les systèmes (producteurs) passifs, actifs ou adaptatifs, le stockage (du chaud et/ou du froid). Cette évolution plus ou moins facile à atteindre sur chacun des domaines engendre une complexité évidente de la gestion de ces systèmes à deux niveaux : d'une part à l'échelle des composants qui s'enrichissent en fonctionnalités (multi-flux, isolation, stockage intégré ...) et d'autre part à l'échelle du bâtiment qui intègre le chaînage production, distribution, émission, stockage de multi-énergies produites à partir de multi-systèmes.

##### 4.1 Le bâtiment domotique

Un système domotique peut être vu comme un système de pilotage réparti spatialement visant à maîtriser différentes variables caractéristiques d'environnements (thermique-air, thermique-eau, lumineux, ventilation) et de services (cuisson, lavage,...). La commande est réalisée au moyen d'équipements qui peuvent être qualifiés, par analogie avec la notion de capteur intelligent, d'actionneurs intelligents : les équipements embarquent une intelligence qui comprend généralement capteurs et mécanisme de commande locale. En guise d'exemple, un radiateur, actionneur agissant sur l'environnement thermique-air, dispose d'un capteur de température et d'un mécanisme de régulation. Il en va de même du réfrigérateur qui participe au service réfrigération. Les commandes de ces différents équipements sont indépendantes les unes des autres et peuvent parfois conduire à des situations difficile à gérer d'un point de vue énergétique.

Les systèmes de Gestion Technique des Bâtiments (GTB) sont aujourd'hui des solutions disponibles pour l'automatisation du fonctionnement des installations de chauffage et climatisation. A travers des stratégies de contrôles de défaillances des équipements, ces plateformes permettent d'alerter l'exploitant des maintenances à effectuer, mais ne sont aujourd'hui pas adaptées à l'arrivée des énergies renouvelables intégrées dans le Bâtiment.

#### **4.2 Une domotique pour les énergies renouvelables**

Par ailleurs, ces solutions classiques de contrôle commande (associées au chauffage, climatisation, etc) n'intègrent pas des concepts relatifs au caractère intermittent des sources renouvelables d'énergie. Cette particularité rend complètement inadaptées (voir inefficaces) les solutions classiques dans des configurations faisant appel aux sources renouvelables. Aussi, il est nécessaire aujourd'hui de travailler au développement d'un système de contrôle commande permettant d'exploiter au mieux le potentiel des différentes sources renouvelables, en gérant de manière globale les besoins en énergie et la capacité de production d'un habitat.

Bien entendu, cela suppose également une gestion des consommations en fonction de moyens de production disponibles. Cependant la consommation en énergie est fortement liée au mode de vie des habitants dont, malheureusement, le comportement peut être en complet désaccord avec une logique économique. La réduction des consommations passe donc par l'information des populations et par le développement d'habitat « intelligent ».

En effet, il n'est pas illusoire, compte tenu des avancées dans les domaines du contrôle commande et de l'intelligence artificielle, d'imaginer un système autonome capable de gérer les consommations d'un habitat en fonction de stratégies et de priorités définies par défaut (utilisation de décalage de services), et adaptables en fonction des utilisateurs. Il devra être également capable de gérer la production et répondre, autant que possible, à des pics ponctuels de consommation (accumulation-restitution). Cela suppose alors dans les habitats, une utilisation accrue de la domotique qui peut être vu comme un moyen de pilotage réparti visant à maîtriser différentes variables d'environnement et de service. La réalisation de cette « intelligence » nécessitera de formaliser un mécanisme de coopération entre les sources et les charges domestiques, coopération nécessaire dans le cas d'une production locale dont la capacité est limitée et variable dans le temps. Enfin, Il sera nécessaire d'opter pour une interface homme-machine suffisamment simple et

conviviale pour que la complexité réelle du système reste masquée et ne représente pas un frein à son développement.

Nous sommes encore loin de cet habitat « intelligent », mais il est important de poser dès aujourd'hui les premières pierres pour satisfaire au plus tôt les impératifs environnementaux. Ce chantier doit débiter par un contrôle le plus efficace possible de la production en fonction des besoins et de la disponibilité des énergies. C'est pourquoi, le CEGELY a débuté en 2004 des travaux sur la modélisation des flux énergétiques dans un habitat. Un premier modèle de consommation électrique a été validé et différents modèles de sources de production énergie renouvelable (électrique) ont été réalisés. En collaboration avec le CETHIL, l'aspect thermique est en cours d'intégration et offrira sous peu un modèle complet des flux énergétiques, c'est-à-dire un outil de simulation complètement paramétrable (situation géographique, type et surface de l'habitation, nombre et habitudes des occupants, niveau de vie, appareillages...). De plus, le CEGELY a organisé en mars 2005 une rencontre baptisée « Journée Maison Autonome » à laquelle ont participé le CETHIL et le CSTB. A l'issue de cette rencontre, le CEGELY s'est vu conforté dans son approche de gestion globale des énergies dans l'habitat.

## **5. DEMARCHE**

Outre les recherches bibliographiques sur la gestion des systèmes multi-sources, la première partie du projet consiste à définir un ensemble de situations, ou plutôt d'habitats, présentant des caractéristiques suffisamment différentes au niveau architectural, équipement et situation géographique pour permettre de tester la pertinence de l'outil qui sera développé. Il sera nécessaire d'avoir des échantillons d'habitats en cours de conception et bien entendu d'habitats existants pouvant déjà présenter des sources d'énergie renouvelable.

La deuxième étape consistera dans un premier temps à rechercher des modèles de sources de production d'énergie renouvelable (solaire thermique, solaire photovoltaïque...). Dans un deuxième temps, la phase de dimensionnement des installations (production) sera réalisée pour chaque habitat en phase de conception défini dans l'étape 1. Pour les habitats existants, un bilan consommation-production devra être établi.

Du point de vue méthodologique ce travail demande la mise en place de procédures d'analyse de la charge journalière, mensuelle et annuelle de la demande et de l'offre des différentes formes d'énergies et l'évaluation des systèmes traditionnels de chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire, production d'électricité, pour répondre à la demande d'énergie.

S'appuyant sur un modèle paramétrable des flux énergétiques dans un habitat, et sur les modèles des sources d'énergie renouvelable, différentes configurations existantes ou en cours de conception seront modélisées. Elles serviront de base d'étude au choix et au bon dimensionnement des systèmes de production d'énergie en fonction des besoins en étant capable, autant que possible, de répondre à des pics de consommation (problème de la disponibilité de l'énergie et du stockage).

Cette phase nous conduira à la constitution de règles expertes permettant d'évaluer l'influence d'un paramètre de dimensionnement (surface de captation, puissance d'installation, volume de stockage ...) sur la consommation énergétique, le coût de l'installation ou l'impact environnemental.

Dans la troisième étape les méthodes de couplage entre profils de demande et d'offre d'énergie seront étudiées selon les techniques de *demand management* et *supply-side management* dérivées du secteur électrique. Ce couplage dépend de la technologie des systèmes, et du stockage d'énergie ou déphasage des charges.

La quatrième et dernière étape consistera à mettre en œuvre un outil d'aide à la conception basé sur une analyse multicritères (méthodes ELECTRE et PROMETHEE) permettant d'optimiser les choix fondamentaux au moment de la conception du bâtiment. Les critères décisionnels pourront être de type exclusivement économiques ou énergétiques, thermo-économiques ou liés à l'environnement.

Du côté de l'analyse multicritère, plusieurs travaux ont été réalisés au CETHIL: en particulier la mise en œuvre d'un outil informatique d'aide à la décision « CONCEPT » [5] pour optimiser dans la phase de conception du bâtiment, outre l'orientation du bâtiment, la surface des fenêtres, les protections solaires, la stratégie de ventilation. Un ensemble de 2304 simulations numériques ont permis de définir des règles expertes utilisées par une méthode d'aide à la décision multicritère de type ELECTRE III. L'utilisateur peut modifier les poids, voire les seuils de préférence, indifférence et veto utilisées dans la comparaison par couples des différentes solutions architecturales.

Un tel outil; et d'autres similaires qui viendront tenant compte de l'intégration des énergies renouvelables représentera notre contribution pour atteindre le stade évolué de la conception d'un bâtiment à énergie positive.

## 6. CONCLUSION

Le travail décrit envisage donc deux objectifs finaux : l'un est de trouver les solutions de commande des systèmes sur une installation existante qui réduisent les consommations en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre est de proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleurs du couplage entre demande et offre d'énergie et pour estimer les consommations qui en découlent.

## REFERENCES :

- [1] **N.J. Kelly**, Towards a design environment for building-integrated energy systems: the integration of electrical power flow modelling with building simulation,. *A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde*, Glasgow, UK. October 1998.
- [2] **J.A. Clarke, J. Cockroft, S. Conner, J.W. Hand, N.J. Kelly, R. Moore, T. O'Brien and P. Strachan**, Control in building energy management systems: the role of simulation, , *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001.
- [3] **Y Zhang and V I Hanby**, Model-based control of renewable energy systems in buildings, , *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, Canada, August 15-18, 2005.
- [4] **O. Sidler**, L'habitat social economie en charges, intervention au séminaire construction climatique de Saint-Etienne, 21 juin 2000, <http://perso.club-internet.fr/sidler>.
- [5] **E.B.P. de Castro, J. Virgone, L.E.G. Bastos**, *A computer program to aid architectural conception based on multicriteria analysis and on simulated building data*, CISBAT; septembre 2005, Lausanne.