

Aide au choix d'un bouquet de travaux pour diminuer les consommations énergétiques d'une maison - Application au quartier de Malartic à Gradignan

Franck Taillandier¹, Laurent Mora¹, Denys Breysse¹, Michel Sarrazin

¹ Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France. (franck.taillandier@u-bordeaux.fr)

² Cabinet Michel Sarrazin, Zone commerciale Eyrialis, Le Barp, France.

RÉSUMÉ. Le projet FOURMINERGIE s'intéresse à l'amélioration thermique des maisons du quartier de Malartic à Gradignan (proche de Bordeaux) et vise notamment à développer une méthode d'aide à la décision pour le choix de solutions de rénovation. L'approche retenue dans le projet consiste à passer par deux étapes successives. La première étape consiste à aider le propriétaire à choisir les bouquets de travaux répondant au mieux à ses attentes. La seconde étape consiste à spécifier les travaux retenus ; cela consiste par exemple à définir le type d'isolant (laine de verre, laine de mouton, etc.). Ces deux étapes sont basées sur une même méthode décisionnelle : ELECTRE III stochastique. L'évaluation des solutions sur les différents critères est réalisée selon des modèles, des valeurs expertes ou des règles fixés par les experts du projet. L'un des enjeux majeurs de l'outil d'aide à la décision est de servir de support permettant de confronter et faire échanger les différents acteurs du projet, depuis les experts jusqu'aux propriétaires des maisons. L'article présente la démarche, la méthode ainsi qu'une application à une maison.

ABSTRACT. The FOURMINERGIE project focuses on improving the thermal performances of the houses into the Malartic's neighborhood in Gradignan (near Bordeaux) and aims to develop a method for decision support for the choice of renovation solutions. The approach used in the project goes through two steps. The first step allows the owner to choose a work package that meets his expectations at best. The second step is to specify the selected works; it consists, for example to define the type of insulation (glass wool, sheep wool, etc.). These two steps are based on the same decision-making method: stochastic ELECTRE III. The solution assessment on the various criteria is performed according to models, expert values or rules set by the experts of the project. One of the major challenges of the decision tool is to enable a merging of the project stakeholder points of view, from experts to the owners. The article presents the approach, the method and an application to a house.

MOTS-CLÉS : Aide à la décision, Energie, Maison, Rénovation, ELECTRE.

KEY WORDS: Decision support, Energy, House, Renovation, ELECTRE.

1. Introduction

Le domaine du bâtiment est un secteur clef en matière d'environnement : il représente en France 44% de la consommation d'énergie et 21% des émissions totales de CO₂ [COM 12] quand le taux de renouvellement du parc immobilier français est inférieur à 1% [PEL 08]. La réduction de la consommation énergétique du parc français passe de fait par la rénovation des bâtiments et ouvrages existants.

C'est dans ce contexte que se place le projet FOURMINERGIE. Le projet s'intéresse à l'amélioration thermique des maisons du quartier de Malartic à Gradignan (proche de Bordeaux). Le quartier est composé de maisons ayant été construites pour un budget très faible dans les années 70 et qui sont particulièrement défaillantes sur le plan thermique. Depuis 2006, une association de quartier (*Des fourmis dans le compteur*) réfléchit à la mutualisation de moyens et d'aides pour la rénovation énergétique des maisons. L'association dénombre plus de 70 adhérents représentant 40 maisons dans le quartier de Malartic. Le projet FOURMINERGIE présente trois enjeux : (1) le développement de méthodes et de modèles pour l'instrumentation et la simulation des maisons existantes, (2) la proposition d'une méthode d'aide à la décision pour le choix de solutions de rénovation et (3) la création d'un système de mutualisation des moyens permettant une action au niveau du quartier. Le projet a associé les usagers (adhérents de l'association), des économistes de la construction, des spécialistes en thermique et énergétique et des chercheurs en aide à la décision. Cet article exposera le travail effectué pour mettre au point une méthode d'aide à la décision.

L'une des questions qui se pose est de savoir comment identifier, pour une maison donnée, la solution de rénovation, c'est à dire le bouquet de travaux, la plus pertinente. Ce problème décisionnel est complexe : il existe un très grand nombre, voire une infinité de solutions de rénovations possibles (selon la façon dont sont définies ces solutions), il y a beaucoup de critères possibles pour le choix d'une solution, il y a de nombreuses incertitudes, des contraintes et des préférences qui peuvent être fortes, etc.

Pour répondre à cet enjeu, différentes approches sont proposées dans la littérature : système expert [TAI 13], optimisation [XU 15], analyse coût-bénéfice [FRI 14], etc. Ces approches, bien qu'intéressantes, ne permettent pas de répondre totalement au besoin. Les défauts partagés par beaucoup de ces méthodes sont : (a) la limitation aux bâtiments neufs, (b) la prise en compte d'un seul critère (énergie du bâtiment, critère financier, etc.), (c) la non prise en compte du point de vue du décideur et de ses contraintes ou (d) la non prise en compte des incertitudes. Le projet FOURMINERGIE vise à proposer une approche intégrant les différentes dimensions du développement durable d'une part, et permettant d'autre part d'intégrer les points de vue, les préférences et les contraintes des différents acteurs pour choisir des solutions de rénovation.

2. Approche

2.1. Principe et démarche

L'approche retenue dans le projet consiste à passer par deux étapes successives (Figure 1), toutes deux basées sur une aide à la décision multicritère prenant en compte les incertitudes, tant sur les données et modèles que sur les paramètres d'aide à la décision ; cela permet *in fine* d'obtenir des résultats robustes. La première étape consiste à aider le propriétaire à choisir la ou les solutions dites « *macro* » répondant au mieux à ses attentes. Une solution *macro* est un bouquet de travaux décrit de façon générique. Ces solutions décrivent les parois à isoler, la nécessité de changer les menuiseries, etc. L'outil propose 27 solutions *macros* différentes, qui ont été établies par les experts du projet et correspondent à des logiques de cohérence et d'efficacité. Le recours à des bouquets de travaux en tant que solution, permet de s'affranchir d'une explosion combinatoire quant au nombre d'alternatives possibles. Par exemple, on pourrait au lieu d'isoler tous les murs d'une maison, décider de n'isoler que trois murs sur quatre, faire varier l'épaisseur d'isolant, et cela différemment pour chaque paroi, etc. Cela conduirait à une très grande variété de solutions, mais dont finalement peu se révéleraient finalement intéressantes sur les plans énergétique, économique ou technique. Ainsi, le recours à une construction experte, non plus de travaux isolés, mais de bouquets de travaux, permet de concevoir des solutions pertinentes et cohérentes. Ces solutions sont bâties sur une démarche classique consistant à traiter en priorité les points faibles ou facilement traitables avant d'incrémenter la solution en lui adjoignant des travaux plus secondaires.

La seconde étape consiste à spécifier les solutions *macro* retenues pour aboutir à des solutions affinées dites « *micro* ». Dans un premier temps, la variation des solutions ne se fait que sur le choix de l'isolant. Dans un futur développement de l'outil, les spécifications pourront aussi toucher les menuiseries ou la ventilation par exemple. Ainsi, pour chacune de ces solutions sera détaillé le type d'isolant, et cela pour chacune des parois (il peut être préconisé de choisir des isolants différents en façade et au niveau du plancher haut par exemple). Il existe dans

l'outil actuel, 15 types d'isolants différents. Ces deux étapes sont basées sur une même méthode décisionnelle : ELECTRE III stochastique [ROY 91 ; TAI 12].

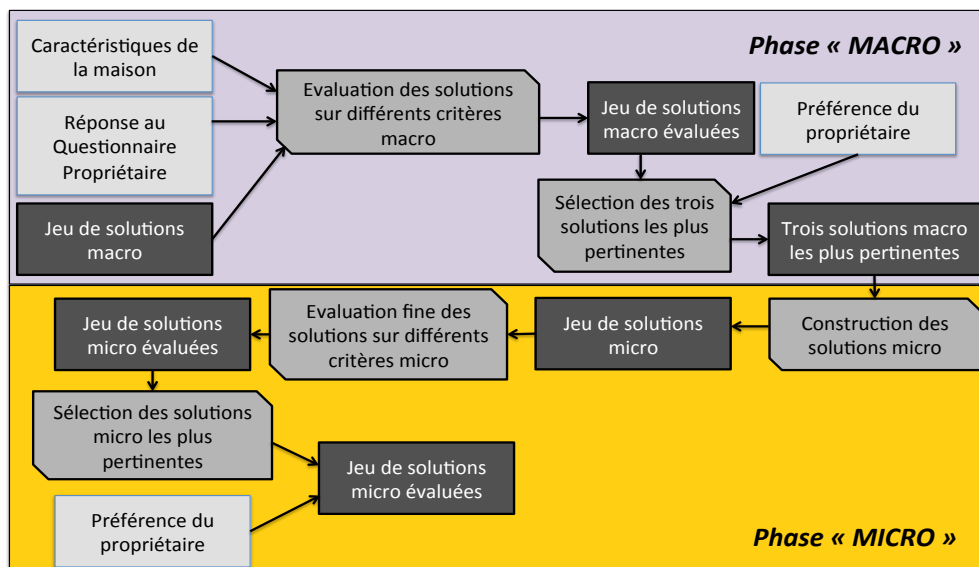


Figure 1. Déroulement du processus d'aide à la décision

L'une des spécificités du projet est de rassembler des experts de différentes disciplines (thermique, économie du bâtiment, architecture, structure, etc.) et les habitants du quartier de Malartic (les coopérateurs de l'association) ayant leurs attentes, leurs contraintes et fortement impliqués dans le projet, etc. Il est en particulier attendu que l'outil d'aide à la décision soit apte à (a) fournir des évaluations pertinentes des solutions, (b) ne demeure pas un outil technique, et intègre explicitement les préférences des maîtres d'ouvrage. Cela s'est traduit par une démarche très itérative dans la construction de la stratégie décisionnelle permettant de nombreux échanges avec les différents acteurs (Figure 2). Par exemple, le jeu de critères est fondé sur de nombreux aller-retours entre acteurs permettant de confronter les avis, les préférences et les objectifs des coopérateurs avec la capacité des experts à fournir des données.

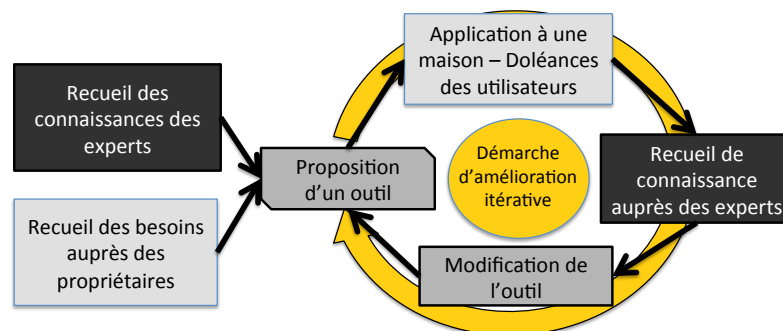


Figure 2. Démarche de conception de l'outil

L'outil se devait aussi d'avoir une dimension explicative et pédagogique ; il devait permettre aux utilisateurs de suivre le raisonnement et de comparer facilement les différentes solutions possibles. Le choix de l'approche en deux phases et du recours à l'évaluation multicritère a été en partie influencé par cette dimension. Il permet de fixer par améliorations successives les éléments de la solution et de comprendre les différents enjeux. Pour aller dans ce sens, l'outil permet de trouver les solutions les plus pertinentes mais permet aussi à l'utilisateur de tester toutes les autres solutions et de les comparer à celles retenues par l'outil. Cela permet aux propriétaires de se rendre compte des forces et faiblesses de chaque solution.

2.2. Evaluation en phase « Macro »

L'aide à la décision dans le projet, est vue dans une logique de développement durable. Les critères retenus appartiennent ainsi aux trois piliers du développement durable : l'environnement, l'économie et le social. Les critères retenus sont issus des premiers entretiens et des discussions avec les différents partenaires du projet.

2.2.1. Critères environnementaux

L'enjeu de l'outil est de comparer des solutions permettant de réduire les consommations énergétiques. Toutes les solutions n'étant pas équivalentes en terme de potentiel de gain d'énergie, le gain escompté est donc un critère de choix majeur. L'évaluation de ce critère peut se révéler complexe. Les modèles de simulation thermique performants sont complexes et nécessitent un grand nombre de données sur les maisons (nature et état des matériaux, perméabilité à l'air de l'enveloppe, etc.). Il n'était dès lors pas possible de simuler l'ensemble des maisons du quartier pour évaluer sur chacune le gain de chaque solution possible. La solution proposée passe par une analyse typologique du parc de maisons. Les maisons du quartier de Malartic sont réparties en quatre familles (Alicante, Bermudes, Castille, Cérac), avec pour chacune d'elles quelques variantes constructives possibles. De plus des différences significatives existent du fait : (a) de l'orientation par rapport aux flux radiatifs, (b) des mitoyennetés, (c) des travaux effectués depuis plus de 40 ans dans ces maisons, (d) des comportements et attentes des propriétaires. Six maisons jugées constituant un échantillon représentatif de cette variabilité ont été sélectionnées et ont fait l'objet d'une analyse et d'une campagne de mesures approfondies. Les simulations thermiques ont été réalisées avec PLEIADES+COMFIE [PEU 90]. La comparaison des performances simulées avant et après rénovation a permis de quantifier un gain relatif, même en l'absence d'une calibration parfaite, impossible par manque de données. Les gains énergétiques simulés vont de 6% (ventilation hygro-réglable) à 70% (solution globale intégrant isolation par l'extérieur des murs et plafond, ventilation et changement des menuiseries). Etant donné les caractéristiques des maisons, il est difficile techniquement et peu réaliste économiquement de proposer des solutions permettant d'atteindre le facteur 4. En revanche, les différentes solutions proposées sont évolutive et n'entame pas le gisement ; ainsi, si un propriétaire pour des raisons de budget limité se contente dans un premier temps d'une solution à faible coût, il pourra dans quelques années faire évoluer cette une solution pour une rénovation plus performante. Afin de prendre en compte les incertitudes, tant sur les simulations elles-mêmes que relative au modèle de simulation, un coefficient d'incertitude a été introduit. L'évaluation se fait ainsi par un intervalle de valeurs défini à partir de la valeur simulée et du coefficient d'incertitude.

Les critères liés à l'impact environnemental des matériaux, dans une logique d'analyse de cycle de vie (énergie grise, potentiel de changement climatique, etc.) ne sont pas utilisés à ce niveau. En effet, les solutions macros ne précisent pas les matériaux utilisés ; elles se réfèrent simplement à une résistance thermique visée. En revanche ces critères apparaîtront dans la phase *micro* (spécification des solutions).

2.2.2. Critères économiques

Trois critères économiques ont été retenus : le coût d'investissement, l'économie annuelle relative à l'énergie et le gain de valeur patrimoniale. Le coût d'investissement correspond à la valeur monétaire nécessaire à la mise en œuvre des solutions. Il est évalué à partir du mètre de la maison et de prix unitaires. Ce sont des prix moyens qui permettent d'estimer un ordre de grandeur pour le coût moyen des opérations. Afin de prendre en compte l'incertitude pesant sur ces prix, le modèle introduit un paramètre d'incertitude permettant de construire deux valeurs pour le coût d'investissement dites valeurs maximales et valeurs minimales.

L'économie annuelle relative à l'énergie est calculée à partir de deux éléments : la quantité d'énergie économisée (celle utilisée par le critère environnemental) et le scénario d'évolution du prix de l'énergie. Etant donné l'incertitude pesant sur cette évolution deux scénarios sont considérés (optimiste vs pessimiste). Le modèle prend aussi en compte le taux d'actualisation pour évaluer en euro constants le gain économique. Le gain annuel est calculé sur un horizon temporel (entre 1 et 100 ans) défini par l'utilisateur ; l'horizon temporel sera différent selon que l'utilisateur privilégie le court ou le long terme (nous nous plaçons ici dans une vision micro-économique, centrée sur la vision de l'utilisateur, et non dans une vision globalisée qui considérerait des objectifs de gains « globaux » pour la population). La valeur retenue pour le critère correspond à la moyenne du gain sur l'horizon temporel (moyenne annualisée). On garde les valeurs correspondant au scénario optimiste (valeur minimale) et au scénario pessimiste (valeur maximale).

La réalisation de travaux va permettre d'augmenter a priori la valeur de la maison (valeur de revente plus élevée pour une maison plus économe en énergie). On compare la valeur de la maison initiale sur un horizon donné avec celle de la maison avec la réalisation des travaux. On suppose un amortissement linéaire de la valeur en fonction de la durée de vie de la maison ou du bien considéré. Lorsque l'on réalise des travaux, on ajoute simplement la valeur résiduelle des travaux, et on retranche la valeur résiduelle du bien remplacé, si elle n'était pas nulle. Le modèle prend aussi en compte la perte de surface habitable résultant par exemple d'une isolation par l'intérieur. Comme pour les autres critères, un coefficient d'incertitude est défini afin d'évaluer les valeurs minimales et maximales escomptées.

Il est à noter qu'il a été choisi en concertation entre les experts en thermique, l'économiste de la construction et les propriétaires du quartier de ne pas retenir comme critère le temps de retour. En effet, pour les maisons concernées, celui-ci est relativement élevé (de 10 à 50 ans) et n'est donc pas incitatif pour les propriétaires.

2.2.3. Critères sociaux

Le modèle considère cinq critères sociaux : l'inconfort d'été, l'inconfort d'hiver, la mitoyenneté, l'opportunité, la complexité administrative et la gêne des travaux. L'inconfort d'été correspond au nombre de jours durant lesquels la température à l'intérieur de la maison dépasse une valeur seuil. Ce critère est évalué de la même façon que le gain énergétique, à partir de la simulation thermique couplée à l'analyse typologique. Le confort d'hiver est évalué qualitativement et non quantitativement : le modèle thermique considérant que le confort hivernal est assuré, il n'était pas possible de l'utiliser pour en obtenir une évaluation numérique. Ainsi, pour l'évaluer, les propriétaires doivent répondre à un questionnaire pour analyser les problèmes d'inconfort actuel (paroi froide, hétérogénéité de température, etc.). A partir de cet état des lieux, les solutions ont été évaluées qualitativement en termes de gain par rapport à ces différents problèmes.

Les critères suivants sont évalués à partir des réponses à un questionnaire, établi avec un architecte et destiné au propriétaire. Les problèmes de mitoyenneté vont traduire les problèmes que peuvent causer les travaux vis-à-vis des maisons mitoyennes. Ils concernent principalement les travaux portant sur l'extérieur de la maison (isolation par l'extérieur). Le critère d'opportunité permet de considérer l'opportunité de faire des travaux en relation avec l'état de la maison. Par exemple, si l'électricité n'est plus aux normes, faire une isolation par l'intérieur peut fournir l'occasion de la rénover ; à l'inverse, si les parements intérieurs sont neufs, il serait très peu opportun de refaire une rénovation. La complexité administrative rend compte des démarches qui accompagnent les travaux. Pour certains bouquets de travaux, il peut être nécessaire de faire de nombreuses demandes administratives induisant la constitution d'un ou plusieurs dossiers (par exemple, si l'on touche à la toiture). La constitution de ces dossiers peut être complexe et/ou chronophage. De plus elle peut entraîner dans certains cas un risque de refus de la part de l'administration. Les travaux peuvent par ailleurs induire une certaine gêne. Elle dépend du type de travaux, de leur durée et des propriétaires. L'évaluation de la gêne des travaux consiste à croiser l'impact des travaux et la capacité des propriétaires à accepter cet impact. La possibilité de déménager ou de se retrancher peut réduire la gêne des travaux et modifier la valeur de ce critère.

2.3. Evaluation en phase « Micro »

Les critères employés dans cette seconde phase sont différents, comme les éléments sur lesquels reposent les choix. En effet, on dispose dans cette phase de plus d'informations sur les solutions (notamment en ce qui concerne les matériaux). En revanche certains critères ne sont plus utiles car ils ne permettent pas de départager les isolants entre eux. Par exemple, l'opportunité de travaux est considérée comme identique pour tous les isolants, ce ne peut donc plus être un critère de décision.

2.3.1. Critères environnementaux

Les critères environnementaux en phase *micro* peuvent se décliner en deux familles, ceux liés au cycle de vie du matériau : l'énergie grise et le potentiel de changement climatique, et ceux liés à la toxicité des matériaux employés : toxicité lors de la phase de travaux et toxicité à long terme, lors de la vie de la maison. Même si tous les matériaux employés sont conformes à des agréments techniques, l'association partenaire de cette étude souhaitait expliciter de tels critères du fait de l'importance que leur attache une part de ses adhérents.

Les deux premiers critères, l'énergie grise et le potentiel de changement climatique, entrent dans une logique d'ACV [ERL 03 ; ISO 06]. Ils sont évalués à partir de bases de données INIES [CST 15] et KBOB [KBO 15] indiquant la valeur de ces critères ramenée à un m³ de matériau pour chacun des isolants, en considérant la quantité réelle du matériau considéré mis en œuvre dans la maison (d'après le métré établi, ce qui suppose que l'on soit dans une phase avancée de définition de la solution technique). Les valeurs extrêmes pour ces deux critères correspondent aux minimums et maximums des valeurs trouvées dans les bases de données.

Les critères liés à la toxicité ont été évalués par les experts du projet, à l'aide d'une échelle qualitative en 5 points allant de « Aucun impact » à « Risque très fort de toxicité ». La toxicité lors de la phase de travaux traduit les risques encourus par les personnes en charge de la mise en œuvre des isolants. Cela a un double enjeu : pour les propriétaires souhaitant réaliser eux-mêmes les travaux, qui peuvent être directement soumis au risque, et pour la santé des ouvriers travaillant sur leur maison (ce critère est alors placé entre l'aspect environnemental et l'aspect social). La toxicité durant la vie de la maison indique les risques encourus à long terme, notamment lorsque le matériau se dégrade et peut être en suspension dans l'air. La toxicité des isolants est sujette à débat; aucune étude scientifique n'ayant, à la hauteur de nos connaissances, pu trancher de façon définitive sur la

dangerosité durant la phase travaux ou lors de la dégradation des matériaux. Le critère est donc évalué ici en termes de risque, c'est à dire en rapport avec l'incertitude (ou la présomption) pesant sur la toxicité des isolants.

2.3.2. Critères économiques

Dans la phase *micro*, le seul critère économique considéré est le surcoût des différentes solutions par rapport à une solution de référence consistant à choisir, pour toutes les parois à isoler, de la laine de verre. Ce surcoût est évalué à partir du mètre de la maison et d'un coût unitaire moyen donné par un économiste de la construction.

2.3.3. Critères sociaux

Trois critères sociaux sont considérés dans cette phase : la surface perdue, le classement au feu et la durabilité du matériau. La surface perdue correspond, en cas d'isolation des parois par l'intérieur, à la surface prise par l'isolant ; elle varie selon l'épaisseur d'isolant qui est fonction de sa résistance thermique. Pour les isolants au niveau du plancher haut, elle correspond à la hauteur sous plafond perdue. Le classement au feu correspond à l'Euroclasse de la norme EN 13501-1 [EN 13] du matériau. La durabilité traduit la capacité du matériau à pouvoir assurer longtemps sa fonction d'isolation. Le critère considère donc non seulement la durée de vie du matériau mais aussi sa capacité à maintenir son isolation dans le temps. Ce critère est évalué qualitativement sur une échelle à 5 échelons (de « très peu durable » à « très durable ») par les experts du projet.

2.4. Aide à la décision

L'outil d'aide à la décision est basé sur la méthode ELECTRE III. Elle permet de comparer les différentes solutions et de les hiérarchiser afin de ne retenir que les solutions les plus intéressantes. Pour élaborer la hiérarchie des solutions, ELECTRE III repose sur la construction de relations de surclassement entre ces différentes solutions. Pour cela, la méthode passe par quatre étapes successives : (1) Calcul des concordances et discordances : indice traduisant la préférence ou le veto d'une solution par rapport à une autre sur un critère, (2) Calcul des indices de concordances globales : agrégation des préférences sur l'ensemble des critères à partir d'un jeu de pondération, (3) Calcul des degrés de crédibilité : intégration des effets de veto à la concordance globale et (4) Etablissement des relations de surclassement et classement : à partir des degrés de crédibilité, définition des relations de surclassement permettant ensuite de hiérarchiser les solutions.

Un des aspects importants des méthodes d'aide à la décision concerne la robustesse de la méthode, c'est à dire la capacité de la méthode à restituer un résultat peu sensible aux variations des données ou des paramètres [ROY 10]. Afin d'assurer la robustesse des résultats, la méthode ELECTRE est couplée à des simulations Monte-Carlo ; l'outil passe ainsi par la version stochastique d'ELECTRE III. Il s'agit de reproduire un grand nombre de fois la même procédure (ici le classement par ELECTRE) en faisant un tirage sur les variables d'entrée et les paramètres de manière à préciser la sensibilité aux incertitudes. Les critères (variables d'entrée) sont évalués à partir d'une borne inférieure et supérieure. On attache pour le tirage une loi de probabilité uniforme sur l'espace des variables d'entrée. Pour les paramètres (par exemple les poids), on utilise une loi de tirage gaussienne pour le tirage. L'analyse s'appuie sur l'étude de la répartition statistique des résultats.

3. Application

3.1. Présentation du cas étudié

Pour illustrer la démarche, nous présentons l'application de la méthode à l'une des maisons du quartier de Malartic. Dans un premier temps, le propriétaire doit renseigner des informations relatives à sa maison : type, surface habitable, année de construction, travaux déjà réalisés, etc. Cette maison de type Castille T5 (Figure 3), datant de 1975 et d'une surface habitable de 118m² avait une consommation initiale de 169 kWh/m²/an. Elle a fait l'objet de travaux de rénovation en 2010, et les fenêtres d'origine ont été remplacées par des fenêtres à double vitrage sur la façade Nord de la maison.



Figure 3. Modèle d'une maison de type Castille

Une interface sous Excel permet au propriétaire de rentrer les données liées à sa maison. L'outil propose des valeurs par défaut pour la plupart des valeurs liées à la maison (métré, consommation énergétique...) à partir de la typologie de la maison. Le propriétaire de la maison doit aussi répondre à un questionnaire permettant d'évaluer certains critères sociaux (gêne des travaux, opportunité, etc.). Pour ce propriétaire par exemple, la réalisation de travaux à l'intérieur de la maison posait souci, bien qu'il ne jugeait pas cette alternative impossible. En revanche, il a pu indiquer qu'il n'avait pas de mitoyenneté, ni de souci particulier avec le voisinage. Enfin, le propriétaire doit fixer les poids liés à chaque critère. Pour notre cas, le propriétaire voulait mettre en avant les aspects environnementaux, mais il accordait aussi de l'importance au confort et à la qualité d'usage. L'outil propose des jeux de pondérations pré-remplis correspondant à des profils-type (« promotion de l'environnement », « limitation du risque financier », etc.). Le propriétaire peut, s'il le souhaite, tester aisément ces autres jeux de pondération et voir l'influence des pondérations sur le résultat final.

3.2. Résultats

A partir des données sur la maison, sur le propriétaire et sur l'expression de ses préférences, le logiciel peut calculer le résultat, c'est à dire décrire les solutions les plus pertinentes pour l'utilisateur. A chaque phase, 10000 simulations sont faites, dont on analyse les résultats statistiques. Les trois solutions macro préconisées par l'outil sont : (a) isolation de la toiture par l'extérieur + isolation des murs par l'extérieur + remplacement de toutes les menuiseries + installation d'une ventilation simple-flux hygro-réglable, (b) isolation des murs par l'extérieur + remplacement de toutes les menuiseries non rénovées + installation d'une ventilation simple-flux hygro-réglable, et (c) isolation des murs par l'extérieur + installation d'une ventilation simple-flux hygro-réglable. A partir de ces trois solutions, la phase *micro* a permis de définir l'isolant préconisé pour chaque paroi. Pour les murs, et en considérant les préférences du propriétaires, l'outil préconise l'usage de panneaux de fibres de bois et pour la toiture, de panneaux en liège.

4. Discussion et conclusion

Les résultats de la phase *macro* ont permis de conduire à trois solutions assez proches en terme de classement moyen : (a) 5,2 (b) 6,2 et (c) 6,7. Pour cette application, aucune des solutions ne s'est vraiment distinguée des autres puisque les trois solutions préconisées, qui présentaient pourtant les meilleurs classements parmi les 27 solutions proposées, sont assez éloignées du meilleur classement théorique qui serait de 1. On ne trouve pas en effet de solutions dominant largement les autres mais plutôt plusieurs proposant des compromis considérés comme ayant un même intérêt vis-à-vis des préférences du décideur. Il est intéressant de noter, toutefois, que les trois solutions proposées sont très différentes en termes de coût financier : (a) 42 192 €, (b) 28 170 € et (c) 15 920 €. Elles peuvent se concevoir comme trois niveaux de complétude d'une même action : l'action (c) propose un premier niveau d'intervention avec la ventilation et l'isolation des murs ; l'action (b) propose d'ajouter le changement des menuiseries et l'action (c) ajoutant encore l'isolation de la toiture. La phase *micro* a conduit à la préconisation de deux isolants assez proches : pour la toiture, du liège et pour les murs, des fibres de bois. Le choix de ces matériaux provient en grande partie des préférences du propriétaire qui souhaitait privilégier la dimension environnementale et limiter le risque de toxicité par rapport aux aspects liés au coût. Le choix entre les différents isolants naturels s'est fait sur plusieurs aspects, d'une part, la possibilité de les utiliser en isolation par l'extérieur et d'autre part, la durabilité de ces deux matériaux supérieurs à certains autres isolants naturels.

Les résultats de l'outil ne se limitent pas à un classement ou à la préconisation d'un matériau. L'intérêt de l'outil est aussi pédagogique : il peut permettre au propriétaire de se poser des questions auxquelles il n'aurait pas forcément pensé de prime abord. L'outil propose ainsi d'enrichir sa réflexion, comme nous l'avons expérimenté au cours des nombreux ateliers de travail avec l'association des fourmis dans le compteur, qui ont permis d'adapter l'outil et son ergonomie aux besoins des usagers. En cela il s'inscrit comme un vrai outil d'aide à la décision. Il n'a pas l'ambition de fournir au propriétaire des réponses toute faites, mais plutôt de l'aider à construire la sienne et à faire mûrir son projet de rénovation.

Plusieurs perspectives sont possibles autour de l'outil. D'une part, il serait souhaitable d'enrichir les solutions, que ce soit dans la première ou la seconde phase, en intégrant de nouvelles solutions. En phase *macro*, cela pourrait être des solutions liées au mode de chauffage (installation d'un poêle à bois par exemple), et en phase *micro*, on pourrait intégrer la spécification des menuiseries et du type d'installation pour la ventilation. D'autre part, il serait possible d'enrichir le jeu de critère en en proposant de nouveaux et de revoir aussi le mode d'évaluation des critères. Par ailleurs, le choix de la méthode d'aide à la décision pourrait être discuté. Dans une volonté de robustesse, la méthode retenue ELECTRE III pourrait être confrontée à d'autres méthodes multicritères telles que AHP [SAA 90] ou MACBETH [COS 94]. De la même façon, les incertitudes traitées selon un modèle probabiliste pourraient être aussi formalisées selon une démarche possibiliste [TOR 10]. Enfin,

il serait évidemment envisageable de faire une version de l'outil qui ne se limite plus aux maisons du quartier de Malartic. Mais cela pose la question du calcul des valeurs de simulations thermiques. Autant, dans le quartier, l'analyse typologique des maisons permettait d'avoir une évaluation approchée des consommations escomptées après travaux, autant cela ne peut se faire pour des maisons très différentes. Se pose alors nécessairement la question du couplage de l'outil d'aide à la décision avec des outils de simulation thermique.

Il reste ainsi beaucoup de points de discussion et de réflexion autour de cet outil d'aide à la décision. Mais il a déjà permis dans le cadre du projet FOURMINERGIE d'aider des propriétaires à formaliser leurs réflexions autour de la rénovation thermique et ainsi de les aider à prendre des décisions pertinentes.

5. Remerciements

L'outil proposé dans cet article est le résultat du travail de l'équipe du projet FOURMINERGIE. Les auteurs remercient tous ceux qui ont participé au projet, notamment Nobatek et Alexandra Georgeoliani, les coopérateurs de l'association des fourmis dans le compteur qui ont activement participé à la création et à l'amélioration de l'outil, la région Aquitaine qui a financé le projet ainsi que le Pôle Creahd.

6. Références

- [COM 12] COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE, *Repère – Chiffres clefs de l'énergie - Edition 2012*, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>, 2012.
- [COS 94] COSTA C. A. B., VANSNICK J.-C., « MACBETH — An Interactive Path Towards the Construction of Cardinal Value Functions », *International Transactions in Operational Research*, vol.1, n°4, 1994, p. 489-500.
- [CST 15] CSTB, *Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages*, 2015. <http://www.inies.fr/>
- [EN 13] NF EN 13501-1, *Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu -*, Février 2013.
- [ERL 03] ERLANDSSON M., BORG M., « Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practiced and development needs », *Building and Environment*, vol. 38, 2003, p. 918-938.
- [FRI 14] FRIEDMAN C., BECKER N., ERELL E., « Energy retrofit of residential building envelopes in Israel: A cost-benefit analysis », *Energy*, vol. 77, 2014, p. 183-193.
- [ISO 06] ISO 14040, *Environmental management. Life cycle assessment - Principles and framework*. 2006.
- [KBO 14] KBOB, *Données des écobilans dans la construction*. 2014. http://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Oekobilanzdaten/Flyer_Oekobilanzdaten_Oktober_2014.pdf,
- [PEL 08] PELLETIER P., *Comité opérationnel « rénovation des bâtiments existants » : rapport d'étape, ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables*, Ministère de l'écologie, du développement durable, 2008.
- [PEU 90] PEUPORTIER B., BLANC-SOMMEREUX I., « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings », *Int. Journal of Solar Energy*, vol. 8, 1990, p. 109-120.
- [ROY 91] ROY B., « The outranking approach and the foundations of Electre methods », *Theory and Decision*, vol. 31, 1991.
- [ROY 10] ROY B., « Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue », *European Journal of Operational Research*, vol. 200, 2010, p. 629-638.
- [SAA 90] SAATY T. L., « How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process », *European Journal of Operational Research*, vol. 48, 1990, p. 9-26.
- [TAI 12] TAILLANDIER P., TAILLANDIER F., « Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalisation », *European Journal of Operational Research*, vol. 217, no. 3, 2012, p. 633-642.
- [TAI 13] TAILLANDIER F., ARIES S., NDIAYE A., LEBLANC B., FERNANDEZ C., LABAT F., « Comment améliorer les performances thermiques de ma maison ? Une affaire d'expert ! », *31èmes Rencontre de l'AUGC*, Cachan, France, 2013.
- [TOR 10] TORFI F., FARAHANI R. Z., REZAPOUR S., « Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives », *Applied Soft Computing*, vol. 10, 2010, p. 520-528.
- [XU 15] XU J., KIM J.H., HONG H., KOO J., « A systematic approach for energy efficient building design factors optimization », *Energy and Buildings*, vol. 89, 2015, p. 87-96.