Bâtiment durable

Projet Réhascope

Bilan à 3 ans

Rapport de synthèse

ANDRIEUX Franck, THOREL Mathieu, ABELE Charlotte, REYNIER Laurent

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment, Direction technologie de l'information et diffusion du savoir, Direction isolations et revêtements, Direction énergie – environnement

Novembre 2013

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | www.cstb.fr
ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229
MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

© 2014 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution 3.0 non transposé **(CC BY 3.0)**
Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante : http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de** :
→ partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
→ remixer, adapter l'œuvre ;
→ d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes** :
→ Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).
Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaitre la référence de ce document sous la forme : **ANDRIEUX F., THOREL M., ABELE C., REYNIER L., Projet Réhascope : bilan à 3 ans, rapport de synthèse, CSTB, novembre 2013, 34 p.**

⇒ **Comprenant bien que**
→ les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :
- Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
- Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.

→ A chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.fr.

Résumé

Le projet Réhascope a pour finalité de concevoir une méthode innovante d'aide au choix et à l'évaluation multicritère d'assemblage de solutions techniques, pour la conception amont d'opérations de rénovation énergétique de bâtiments résidentiels. Les points forts de cette méthode sont : l'intégration des préférences des décideurs, l'intégration de règles expertes régissant la faisabilité technique de certaines solutions, et l'approche systémique (multicritère) menée. Des études préalables ont également été réalisées, telles que des études typologiques sur le parc résidentiels français, des analyses de sensibilité et de propagation d'incertitudes sur les méthodes d'évaluation de la performance énergétique couramment utilisés en France.

Mots clés : méthode d'aide à la décision, logements, rénovation énergétique, approche multicritère, incertitudes épistémiques, connaissance expertes, préconisation de solutions techniques

Abstract

This project aims to design an innovative method to help building professionals in the selection and multicriteria assessement of technical solutions set, in the early-stage design step of residential building renovation projects. The strengths of this method are multiple: integration of decision makers' preferences, integration of expert rules governing the technical feasibility of certain solutions, systemic approach conducted. Preliminary studies have also been carried out, such as typological studies on French building stock, sensitivity and uncertainty analyses on energy performance assessment methods currently used in France.

Keywords: decision support method, residential buildings, energy refurbishment, knowledge uncertainties, expert knowledge, technical solutions recommandations

Table des matières

1. ENJEUX ASSOCIÉS AU PROJET RÉHASCOPE 5

2. RÉSULTATS 10

2.1 Préambule 10

2.1.1 Estimation et propagation des incertitudes 11
2.1.2 Principe et utilisation des Réseaux Bayésiens 12
2.1.3 Principe et utilisation des méthodes ELECTRE 14

2.2 Aspects méthodologiques 15

2.2.1 Etudes préalables 15
2.2.2 Méthodologie déployée 16
2.2.2.1 Actions realisées 16
2.2.2.1.1 Méthodologie générale 16

2.3 Collecte de connaissance 25

2.4 Définition fonctionnelle d'un outil 27

2.4.1 Développements informatiques pour l'aide à la décision 27
2.4.2 Modules développés réutilisables dans d'autres projets 27

3. PERSPECTIVES 28

3.1 Travaux devant être poursuivis 28

3.2 travaux pouvant être valorisés au sein d'autres projets de recherche 29

3.3 travaux pouvant faire l'objet d'une valorisation sous forme de logiciel ou d'expertise 30

3.4 Suites possibles aux travaux engagés 30

3.5 Partenariats engagés et à poursuivre 31

LISTE DES RÉFÉRENCES 33

Livrables 33

Communications (Conference proceeedings) 33

Thèse 33

1. ENJEUX ASSOCIÉS AU PROJET RÉHASCOPE

Avec 43 % de la consommation d'énergie finale totale et 23 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France, le bâtiment est aujourd'hui le secteur le plus énergivore. Plus de 65 % de logements datent d'avant la première réglementation thermique et, compte tenu du taux de renouvellement annuel du parc (~1 %), la rénovation énergétique de l'existant représente un enjeu majeur pour réduire d'un facteur 4 les émissions de GES d'ici 2050, ce qui devrait accélérer le rythme des rénovations énergétiques dans les années à venir. *A contrario*, le secteur du bâtiment est également un des secteurs dans lequel il est possible de mettre en œuvre le plus de solutions techniques pour réduire significativement ces émissions (amélioration des performances énergétiques du bâtiment et des équipements, utilisation d'énergie moins carbonée, etc.).

De façon plus précise, le parc résidentiel français compte 32,2 millions de logements pour une consommation énergétique annuelle de 494 TWh, soit 30 % de la consommation totale d'énergie finale en France (Source : chiffres clés du bâtiment, ADEME, 2009). Alors que le secteur tertiaire présente une grande diversité des usages de l'énergie, la consommation énergétique du secteur du logement est principalement due au chauffage (part représentant 75 % de la consommation en 2003, selon l'Observatoire de l'énergie de la Direction générale de l'énergie et des matières premières). Le chauffage est ainsi un enjeu majeur du secteur résidentiel dont la consommation est directement liée à la qualité thermique de l'enveloppe du bâtiment.

Les acteurs de la rénovation que sont les collectivités, les bailleurs, les copropriétés, les Architectes des bâtiments de France (ABF), etc. portent chacun un regard différent sur les enjeux de la rénovation énergétique du patrimoine, et se retrouvent dans la nécessité de dialoguer et de décider les uns avec les autres, sans pour autant disposer des outils adaptés.

La rénovation d'un bâtiment est un processus complexe qui, s'il n'est pas mené avec une approche globale, peut compromettre le potentiel d'économie d'énergie du site et conduire à la dégradation d'autres qualités intrinsèques ou induites du bâtiment telles que la sécurité, la santé, la performance environnementale ou le confort (thermique, acoustique). Chaque bâtiment doit être traité de manière unique de par ses caractéristiques propres, son implantation, son état général, ses pathologies, ses potentialités et ses occupants.
Il est donc indispensable de mettre en place un cadre méthodologique et des outils permettant d'améliorer le dialogue entre les parties prenantes d'un projet pour :

- aider la maîtrise d'ouvrage à entreprendre des opérations de rénovation énergétique en les informant sur l'état initial de leur bâtiment et les gains performanciels possibles ;

- accompagner les acteurs en charge de projets de rénovation dans une démarche plus globale, en leur permettant d'identifier les impacts potentiels liés à la mise en œuvre des différentes solutions de rénovation.

Par ailleurs la rénovation énergétique n'est que rarement la préoccupation principale de la maîtrise d'ouvrage qui, selon les cas, s'intéresse plus particulièrement à la maintenance de son ou ses bâtiments et à la valorisation de son patrimoine, au changement d'usage, à l'amélioration du confort thermique, etc. Il sera donc pertinent de profiter de tout type de travaux pour accompagner la maîtrise d'ouvrage dans une démarche vertueuse d'amélioration énergétique, et respectueuse du patrimoine architectural.

Le projet Réhascope cible principalement les logements, qu'il s'agisse de logements collectifs (18 millions) ou de maisons individuelles (14 millions) dont environ 60 % ont été construits dans la période précédant la 1ère réglementation thermique (1974). Cette période foisonne de bâtiments dotés de systèmes constructifs majoritairement bien connus, et possédant une efficacité énergétique médiocre.

Ce projet cible la phase amont d'un projet de rénovation[1]. Il vise à accompagner la maîtrise d'ouvrage (MOA) pour :

- Evaluer la situation initiale du bâtiment (typologie, pathologies, performance énergétique) et la prise compte des besoins, enjeux et contraintes du site et de la maîtrise d'ouvrage ;
- Evaluer le potentiel global de l'opération (opportunité, faisabilité) ;
- Analyser les impacts multidomaines associés aux solutions de rénovation (confort, nuisances, entretien, coût global, impact environnemental…) ;
- Aider à la décision dans une stratégie de rénovation (accompagnement de la MOA et de la maîtrise d'œuvre [MOE]).

Cette recherche, réunissant les expertises pluridisciplinaires du CSTB, propose notamment de réaliser :

- une base de connaissances structurée permettant de reproduire des expertises multi-techniques variées ;
- un prototype d'application informatique permettant de mettre en œuvre et d'évaluer la méthodologie d'aide à la décision développée en amont, en la confrontant à des cas de rénovations réels.

L'objectif global de ce projet de recherche est donc l'élaboration d'une méthodologie innovante d'aide à la décision pour la rénovation énergétique ciblant plus particulièrement les logements. Lors de la phase amont de la conception d'une opération de rénovation une approche systémique et proposée, sur tout le cycle de vie du bâtiment, prenant en considération les spécificités de chaque projet (enjeux multiples, typologies architecturales, jeux d'acteurs, contraintes techniques de mise en œuvre).

L'ambition première de ce projet est d'organiser et de modéliser l'expertise et la connaissance métier autour de la « rénovation » sous la forme d'une base de connaissances qui sera utilisée dans l'élaboration des stratégies de rénovation.

[1] C'est-à-dire les phases « d'études préalables » si l'on se replace dans le contexte de la loi MOP par analogie.

On y retrouvera six classes de règles expertes : les contraintes techniques, les contraintes règlementaires, les impacts multicritères, les synergies possibles avec des actions de maintenance, les recommandations de mise en œuvre, les risques induits d'apparition de pathologies ou d'inconfort.

La seconde ambition est d'intégrer l'incertitude liée à la connaissance et sa propagation dans le processus décisionnel (de la caractérisation du bâti aux indicateurs de performance, en passant par les hypothèses des moteurs de calculs utilisés et la pertinence des solutions techniques qui peuvent être mises en œuvre). En phase de diagnostic, ceci se fait par l'élaboration de portefeuilles de typologies de bâtiments de la période considérée, la création de bibliothèques de solutions énergétiques courantes et d'analyses de sensibilités paramétriques des modèles de calcul utilisés, le tout afin d'aider à une caractérisation réaliste de l'existant. Cette étape est indispensable pour : évaluer le potentiel énergétique d'un bâtiment, décider du type d'action à entreprendre (déconstruction, rénovations lourde ou légère) et identifier les procédés de rénovation compatibles et pertinents avec les spécificités du bâti audité.
Le caractère novateur de la démarche est de fournir un cadre (méthodologie et outillage) pour faciliter le dialogue entre les acteurs (collectivités territoriales, propriétaires, bailleurs, syndics, ABF, assistance à la maîtrise d'ouvrage, urbanistes, etc.) autour d'une méthodologie innovante intégrant la gouvernance d'enjeux aussi bien centrés sur les exigences énergétiques, environnementales (atteinte du Facteur 4), sociétales, que sur la protection du patrimoine architectural. Cette approche multi-facette de la rénovation doit ainsi appréhender des enjeux multiples, complémentaires et parfois contradictoires.

L'intégration d'une approche systémique (analyse pluridisciplinaire) et multi-enjeux dans une méthodologie dédiée à la prise de décision pour la rénovation nécessite de dépasser de nombreux verrous scientifiques, outre l'utilisation d'un langage commun facilitant les échanges (enjeux, potentialités, alternatives, impacts) entre les différents acteurs de la chaine de décision.
Le premier verrou provient de l'évolution dans un environnement incertain. L'incertitude est omniprésente dans les projets de rénovation. Dans une opération expérimentale, il est envisageable de doter la construction d'un grand nombre de capteurs, et de réaliser un ensemble significatif de mesures (non-intrusives ou intrusives) qui renseigneront de manière précise sur les caractéristiques et sur le comportement du bâtiment, afin d'en faire le diagnostic et d'évaluer sa performance globale. Cependant, même si scientifiquement, l'on devrait être capable de décrire un bâtiment sous tous ses aspects et d'en déduire sa performance énergétique et globale, on constate sur le terrain une grande difficulté pour recueillir et formaliser ces informations en optimisant le trio "coût des diagnostics, délais pour les réaliser et connaissances obtenues des paramètres du bâtiment". Une des difficultés de cette recherche est de réduire la phase de diagnostic à son strict minimum. La quantification de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments existants reposant, entre autre, sur la précision du diagnostic (du bâtiment et des usages), de celui-ci dépend la détermination de nombreux paramètres décrivant les matériaux, les procédés constructifs, les équipements, la qualité de la mise en œuvre, les habitudes des occupants, etc.

De manière générale, les informations disponibles sur la performance actuelle ou même plus simplement sur l'état de santé d'un bâtiment collectif privatif sont souvent incomplètes et non actualisées. Certaines analyses peuvent exister mais ne couvrent pas l'ensemble des disciplines ou systèmes associés à la construction. Or, ces informations sont capitales pour évaluer la pertinence de solutions de réhabilitation, contrôler leur efficacité énergétique, et quantifier leurs impacts sur l'ensemble du bâtiment. Une autre difficulté est donc d'élaborer une méthode de collecte et de formalisation de l'information pour construire une base de connaissances suffisamment précise pour pallier ces manques. La granularité des connaissances doit permettre l'accompagnement des professionnels dans la réhabilitation énergétique à approche globale. La prise de décision multicritères dans un environnement incertain représente également une troisième difficulté : il faut traiter la problématique de construction d'indicateurs de performance et d'agrégation dans un environnement incertain, à travers des dimensions multiples (échelle du matériau, du procédé ou du bâtiment) et pluridisciplinaires (sociale, technique, économique,…). Il est également nécessaire de faciliter la prise de décisions malgré la manipulation d'informations non homogènes et de natures diverses : informations qualitatives, quantitatives, partielles, adimensionnelles… Il s'agit de doter le preneur de décision d'outils à même de fournir les informations opportunes au bon moment.
Le second verrou est associé aux indicateurs. Il concerne l'exploitation des informations collectées pour la construction d'indicateurs permettant d'appréhender de manière globale la performance énergétique de la construction et les voies d'amélioration. Il parait illusoire, dans un projet de rénovation énergétique, de définir directement des valeurs cibles sur un jeu d'indicateurs tant le processus technique de rénovation est complexe et les diverses actions interdépendantes. Les impacts d'une solution sur le bâti ou sur un autre élément de la rénovation sont très difficiles à identifier de manière exhaustive et nécessitent, dans tous les cas, une expertise pluridisciplinaire importante.
Dans le projet Réhascope il a été jugé préférable de se concentrer sur l'accompagnement de la MOA dans la définition des enjeux du projet (objectifs et contraintes) et au travers de la connaissance experte recueillie et modélisée, de traduire ces enjeux dans un profil global de performance.

Parallèlement, les outils informatiques existants visent soit la conception détaillée de projets de réhabilitation (trop lourds d'utilisation, non transposables), soit une approche simplifiée (outils trop génériques, orientés vers certaines solutions de rénovation spécifiques, imprécis et incomplets). Aucun ne propose aujourd'hui une approche globale.

Les principaux produits finaux visés par la recherche sont un prototype d'outil informatique implémentant la méthodologie d'aide à la décision développée, ainsi qu'une base de données et de connaissances pouvant donner lieu à de multiples exploitations (guide méthodologique, support de formation, etc.).

Les enjeux environnementaux traités dans ce projet au travers de la rénovation énergétique sont multiples.
Tout d'abord, les enjeux globaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergies fossiles sont aujourd'hui primordiaux et

portés par de nombreuses instances aux échelles mondiale, européenne, nationale et locale.
Plus concrètement, en 2009, la loi Grenelle 1 vise à diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 tous secteurs confondus (bâtiment, sidérurgie, industrie, agriculture, transport). Elle confirme les enjeux de la rénovation énergétique de l'existant et l'objectif de réduction des consommations d'énergie du parc existant de 12 % d'ici 2012 et d'au moins 38 % d'ici 2020. Elle s'appuie notamment sur un programme de rénovation des logements sociaux et sur la mise en place d'appareils à « énergie décarbonée ». En 2010, la loi Grenelle 2 est votée avec de nombreuses actions pour faciliter et accélérer la rénovation énergétique du parc ancien (faciliter l'accès aux améliorations énergétiques pour les copropriétés et les logements en location, amélioration du diagnostic de performance énergétique, développement des contrats de performance énergétique, etc.).
Ces enjeux globaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergies fossiles, auxquels la rénovation énergétique semble répondre, ne doivent cependant pas occulter un autre aspect abordé dans le cadre de ce projet : les impacts environnementaux que ce type d'opération peut engendrer. Une rénovation n'est en effet pas neutre et le temps de retour environnemental pourrait s'avérer important. En effet, les gains et les coûts environnementaux ne concernent pas seulement les rejets de GES mais également l'eau, les ressources abiotiques, les déchets radioactifs, etc. Il est important de pouvoir prendre en compte ces différents éléments lors d'une rénovation.

De même, au plan sociétal, la réduction des dépenses des ménages et de la précarité énergétique, l'anticipation des futures hausses des tarifs de l'énergie, la dépendance énergétique, la création d'un marché autour de la rénovation énergétique, etc. sont autant d'enjeux auxquels répondent les différentes actions engagées par l'état, les collectivités et les autres parties prenantes.
Pour les gestionnaires de biens, tels que les bailleurs sociaux, il est nécessaire aujourd'hui de penser la rénovation énergétique dans le cadre d'une rénovation plus générale du bâtiment. En effet, les projets lourds de rénovation de leur patrimoine ne sont qu'une partie des travaux engagés pour entretenir leur parc de logements. A ceci s'ajoute l'intérêt, la nécessité et parfois l'obligation pour les gestionnaires de biens de penser la rénovation énergétique concomitamment à d'autres problématiques telles que la sécurité incendie, l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite, la gestion des « fluides » (eaux usées, gaz, etc.), etc.
Cette approche plus large permet d'identifier des opportunités conduisant à des factorisations de coûts et donc à la réduction du temps de retour sur investissement (du seul point de la rénovation énergétique).

A l'origine, le projet de recherche *Réhascope* visait la caractérisation de l'existant. Le côté « scope » s'entendait par « Montrez-nous votre bâtiment, nous vous dirons comment il est construit ».
Depuis 3 ans, au sein de la priorité scientifique et technique « Bâtiment durable » du programme de recherche du CSTB, ce projet de recherche a élargi son périmètre de la caractérisation au diagnostic et à l'aide à la décision pour une approche systémique de la réhabilitation énergétique.

Il s'agit principalement d'aider les professionnels en charge de la conception de projets de rénovation à identifier les meilleures stratégies tenant compte :

- des besoins et des enjeux exprimés par la maîtrise d'ouvrage (préférences) ;
- du contexte, des contraintes, de l'état spécifique du bâtiment, et en particulier des pathologies existantes ou des inconforts ressentis ;
- des potentialités offertes par le regroupement de certains travaux (principalement de maintenance), visant à réduire le temps de retour sur investissement.

Le projet *Réhascope* considère que la connaissance cumulée des experts des divers domaines, techniques ou autres, utile dans un projet de rénovation énergétique est la condition indispensable à la mise en œuvre d'une approche globale réussie.

2. RÉSULTATS

Les principaux résultats du projet *Réhascope* portent sur :

- la définition d'une méthodologie d'aide à la décision pour la rénovation énergétique ;
- la collecte d'information, de connaissance et de règles expertes pouvant aider au choix des alternatives de réhabilitation et à sa modélisation ;
- la définition fonctionnelle d'un prototype d'outil pouvant implémenter une telle méthodologie.

2.1 PRÉAMBULE

Indépendamment de la méthodologie qui sera détaillée par la suite, nous nous sommes intéressés, dans le cadre de ces travaux de recherche, à un ensemble de techniques qui permet de gérer l'incertain qui caractérise tout projet de rénovation.
En effet, la plupart des méthodes et outils de calcul permettant d'estimer la performance d'un bâtiment sur un ensemble d'indicateurs, requièrent des données d'entrées précises et pour la plupart numériques. Or, dans le contexte de la rénovation de bâtiments, de nombreuses caractéristiques sur les éléments du bâti et les équipements techniques sont indisponibles (documents techniques perdus, mesures *in situ* longues ou intrusives impossibles, incapacité à évaluer le degré de vieillissement des matériaux et systèmes). Un autre constat porte sur le manque de préconisations d'amélioration énergétique des outils actuels qui se concentrent uniquement sur l'évaluation avant/après rénovation, sans intégrer les dimensions « faisabilités techniques et financières » ni « l'approche systémique » d'un projet.

Fort de ce constat, les travaux menés se sont intéressés à :

- l'estimation des incertitudes sur les données d'entrée et leur propagation dans les méthodes de calcul jusqu'aux indicateurs de performance ;

- la technologie des réseaux bayésiens, s'apparentant à de l'intelligence artificielle, qui permet de modéliser la connaissance métier et de déduire des informations ou des valeurs de performance par inférence probabiliste dans un environnement incertain ;
- les techniques de surclassement ELECTRE[2] Tri et ELECTRE III qui permettent la catégorisation et l'ordonnancement de résultats d'évaluation multicritère dans un environnement incertain.

2.1.1 ESTIMATION ET PROPAGATION DES INCERTITUDES

Un ensemble d'analyses de sensibilité ont été réalisées, visant, pour une typologie de bâtiment donnée, à identifier quels sont les paramètres sensibles sur lesquels il existe un besoin de précision, et les paramètres peu sensibles sur lesquels un effort moindre peut être fait durant la phase de diagnostic. Trois méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitudes complémentaires ont été menées sur le comportement énergétique annuel (avec le moteur Th-C-E ex faisabilité) de quatre maisons types[3]:

- Analyses paramétriques : la variation des consommations énergétiques annuelles lors de variations homothétiques de l'enveloppe déperditive ;

- Analyses de sensibilité : la méthode de criblage de Morris a été testée sur l'une des maisons types afin d'identifier, parmi un nombre variables d'entrée préalablement sélectionnées, le degré de corrélation entre ces variables et l'amplitude de leur influence relative sur les sorties du moteur de calcul utilisé (Cep, Tic, Ubat) ;

- Propagation d'incertitude : la méthode de tirage aléatoire de Monte-Carlo a servi à propager les incertitudes quantifiée sur les variables d'entrées – jugées influentes par les résultats de la méthode de criblage de Morris – jusqu'au sorties du moteur. Différentes codification de l'incertitude sur les variables d'entrée ont été testées (valeurs min et max, profil-3-points, profil de distribution probabiliste triangulaire).

Les analyses de sensibilités ont portées sur le moteur de calcul énergétique *Th-C-E Ex faisabilité*, seul outil actuellement disponible dédié exclusivement à la réhabilitation, et possédant un compromis « niveau de description / temps de simulation » compatible avec une modèle d'aide à la décision. Il s'agissait de déterminer l'influence et la dépendance des variables d'entrées sur les résultats afin d'identifier les données d'entrées sur lesquelles nous avons besoin de précision[4]. Il s'agissait également d'évaluer la propagation des incertitudes dans les modèles de calcul en utilisant des distributions de possibilité pour pallier l'absence de données précises (méthodes de propagation : min-max, tirage Monte-Carlo).

[2] ELECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité
[3] Extraites d'études typologiques antérieures
[4] Ainsi qu'une marge de manœuvre.

2.1.2 PRINCIPE ET UTILISATION DES RÉSEAUX BAYÉSIENS

L'objectif ici est de réunir dans un modèle d'inférence probabiliste, les éléments permettant la prise de décision dans la conception d'une opération de rénovation de bâtiment (indicateurs de performance, solutions techniques de rénovation, caractéristiques potentielles de l'existant, et préférences du décideur). Avant de présenter la technologie des réseaux bayésiens, il convient de rappeler brièvement ce qu'est l'inférence (exacte ou probabiliste) et les différents modes de propagation de la connaissance.

L'inférence désigne le principe de mise en relation de certaines connaissances (ensemble d'assertions ou de propositions) pour en déduire de nouvelles par le biais de différents mécanismes d'intelligence artificielle, calqués sur le fonctionnement cognitif de notre cerveau. Ces méthodes de propagation de la connaissance peuvent être exactes (fonctions booléennes, fonctions causales) ou gérer l'incertain (fonctions statistiques ou probabilistes). Enfin trois grands types d'utilisation du principe d'inférence existent :

- Inférence déductive : appelée également chaînage avant. Ce type d'utilisation des technologies d'inférence consiste à déduire des effets à partir de causes observées :

cause(s) → effet(s)

- Inférence inductive : appelée également chaînage arrière. Ce type d'utilisation des technologies d'inférence consiste à partir d'un effet observé pour remonter aux combinaisons d'effets les plus probables :

effet → cause(s)

- Inférence mixte : appelée également chaînage hybride. Elle utilise les deux types d'inférence précédemment décrits selon les informations disponibles, de manière synchrone ou asynchrone :

cause(s) ↔ effet(s)

Les réseaux bayésiens (RBs) sont une technique d'inférence probabiliste mixte raisonnant de manière probabiliste en fonction de la précision des connaissances injectées (sous la forme de distribution de probabilité). Les RBs sont composés d'une structure graphique composée de nœuds (entités modélisées : indicateurs, solutions techniques…), de flèches reliant ces nœuds (relations causales) et de table de probabilités conditionnelles (quantifiant les relations entre nœuds). Un algorithme d'inférence permet par la suite d'interroger la structure bayésienne en injectant des connaissances spécifiques à chaque projet sur les nœuds modélisés, puis en récupérant les informations nouvelles sur les autres nœuds modélisés[5]. Dans le cadre d'une problématique d'aide à la décision pour la rénovation de bâtiment, quatre manières d'utiliser cette technologie sont possibles (cf. Figure 1) :

[5] Pour plus d'informations, consulter l'ouvrage de Patrick Naïm, et al., *Réseaux Bayésiens*, Eyrolles, Algorithmes,. 2007:

1. **Aide au diagnostic [inférence inductive]** : les informations disponibles sur le terrain sont collectées pour approximer aux mieux les informations non connues ou incomplètes ;
2. **Évaluation des performances de l'existant [inférence déductive] :** en fonction des connaissances techniques sur l'existant de chaque projet, on quantifie sous forme de distribution de probabilité la performance de chaque indicateur de performance (modélisé dans la structure bayésienne) ;
3. **Recherche d'alternatives[6] de rénovation [inférence inductive] :** en fonction des préférences des décideurs (valeurs-cibles attendues sur les indicateurs), et les caractéristiques techniques du bâti existant (contraintes techniques et réglementaires), on recherche les assemblages de solutions techniques de rénovation les plus pertinentes (en utilisant un algorithme d'optimisation multicritère avec contraintes successives) ;
4. **Évaluation des performances des alternatives de rénovation [inférence déductive] :** mécanisme inverse au point 3, cette fois chaque assemblage de solutions techniques de rénovation dans le modèle est imposé et les valeurs obtenues sur les indicateurs de performance modélisés sont récupérées (sous la forme de distributions de probabilité).

[6] Sont dites « alternatives », les combinaisons d'amélioration énergétique pour un projet de rénovation

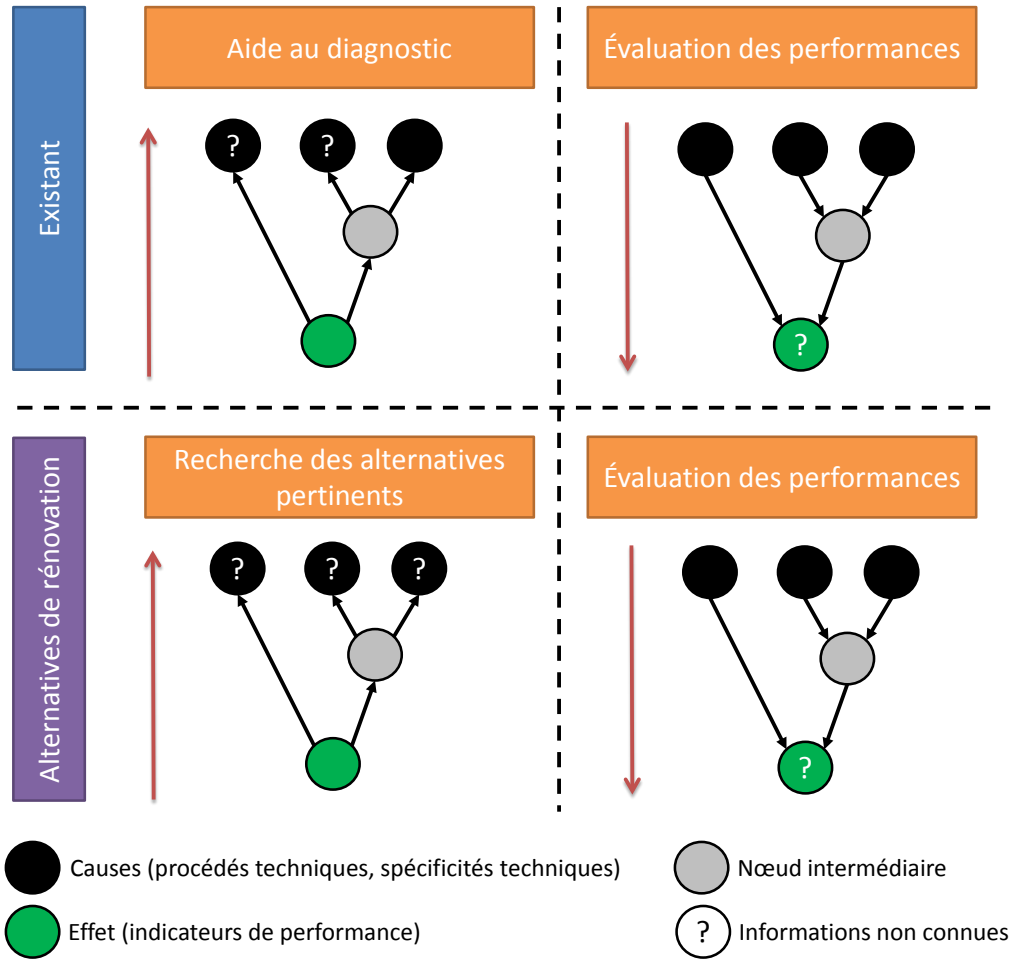


Figure 1 - Les 4 modes d'utilisation possibles des Réseaux Bayésiens

2.1.3 PRINCIPE ET UTILISATION DES MÉTHODES ELECTRE

L'approche systémique de la rénovation de bâtiment est traduite sur le plan opérationnel, par une analyse multicritère manipulant de nombreux indicateurs de performance[7]. La méthodologie d'aide à la constitution d'alternatives de rénovation (voir §2.1.2) déployée fournit de nombreuses alternatives potentielles, chacune évaluées par une distribution de probabilité sur chaque indicateur de performance modélisé. Cela correspond à la première attente qui était d'intégrer les incertitudes liées à la connaissance technique de l'existant jusqu'à l'évaluation de la performance, puis à la prise de décision. Cependant réaliser un choix parmi un panel d'alternatives évaluées chacune de manière probabiliste n'est pas une tâche aisée. Le recours aux méthodes de surclassement ELECTRE est une solution. Ces méthodes permettent d'effectuer les tris et classements d'alternatives, tous en intégrant les incertitudes associées aux critères d'évaluation (i.e., les indicateurs définis).

[7] Le choix des indicateurs de performance correspond à la formalisation de besoins communs entre les projets de recherches *Réhascope*, *Intégrabilité*, et *Elodie 2.0* de la priorité scientifique « Bâtiment durable » du programme de recherche 2010-2013 du CSTB.

2.2 ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES

2.2.1 ETUDES PRÉALABLES

Le projet *Réhascope*, initialement centré sur l'aide à la caractérisation des bâtiments existants, requiert de bonnes connaissances technique et thermique sur les familles de bâtiments les plus représentatives de la période étudiée (1945-1974). Dans cette perspective, des études typologiques sur le parc de bâtiment résidentiel ont été menées en reprenant les travaux les livrables produits dans le cadre du programme « Modernisation durable de l'existant » (2007-2010). La valorisation envisagée de ces études est de pouvoir alimenter une base de connaissance informatisable de procédés techniques (éléments d'enveloppe, équipements énergétiques) décrivant les caractéristiques thermiques (et autres si possible) permettant de simuler leur comportement énergétique[8].

Ces études ont montrées que l'on a été capable, à moindre coût (temps de calcul) :

- d'utiliser les études typologiques sur les procédés caractérisant les performances énergétiques du bâti ancien pour codifier les incertitudes associées aux variables d'entrées des moteurs de calcul, difficilement identifiables sans sondage intrusif ou expérimentation *in situ* (diagnostic incertain) ;

- d'identifier les données d'entrées les plus sensibles par typologie de bâtiments testés (par l'automatisation d'études de sensibilité) ;

- de quantifier les incertitudes associées aux sorties des moteurs de calcul.

Ces travaux préalables ont permis de montrer comment on peut modéliser les incertitudes associées à la connaissance technique d'un bâti existant. Cependant l'analyse d'incertitudes n'a de sens que pour comparer un résultat par rapport à une référence (cadre réglementaire ou d'attribution d'un label de performance ou de qualité) ou pour comparer des scénarios d'amélioration énergétiques entre eux et identifier ceux qui sont les plus rentables, économiquement parlant, au regard des incertitudes sur les performances. Tout naturellement l'on passe d'une problématique d'aide à la caractérisation de l'existant en milieu incertain, à celle d'une aide à la décision pour la rénovation énergétique du parc de bâtiments résidentiels.

[8] Des travaux similaire ont été réalisé par le projet européen TABULA (www.building-typology.eu)

2.2.2 MÉTHODOLOGIE DÉPLOYÉE

2.2.2.1 Actions realisées

2.2.2.1.1 Méthodologie générale

L'objectif de ces travaux est de proposer une méthodologie d'aide à la décision multicritère innovante de rénovation[9]. Elle cible la phase « études préalables » d'un projet de rénovation, et s'adresse aux professionnels soucieux d'intégrer une approche globale d'un projet de rénovation énergétique. En effet, les impacts de solutions d'amélioration énergétique sur la pérennité du bâti et le bien-être de ces occupants dépassent souvent la seule dimension énergie-économie. On cherche donc, à travers cette méthode :

- à intégrer les enjeux multiples de la maîtrise d'ouvrage ;
- à tenir compte des spécificités techniques du bâti existant ;
- à intégrer les incertitudes associées à la caractérisation de l'existant jusqu'à l'évaluation de la performance multicritère des bouquets de solutions techniques proposés.

La méthodologie déployée peut-être décrite par 4 phases du point de vue de l'utilisateur final, mais nécessite la mise en œuvre préalable de 7 modules techniques interconnectés, indispensables au bon fonctionnement du prototype (cf. Figure 3). Après une brève description des quatre phases utilisateurs, cette synthèse du projet *Réhascope* se concentrera sur les modules techniques de la méthodologie. **Il est important de préciser que cette méthodologie d'aide à la décision est modulaire et transposable à d'autres cibles : chaque module est composé de méthodes ou formalisation de connaissances expertes pouvant être reprises par d'autres projet et outils**.

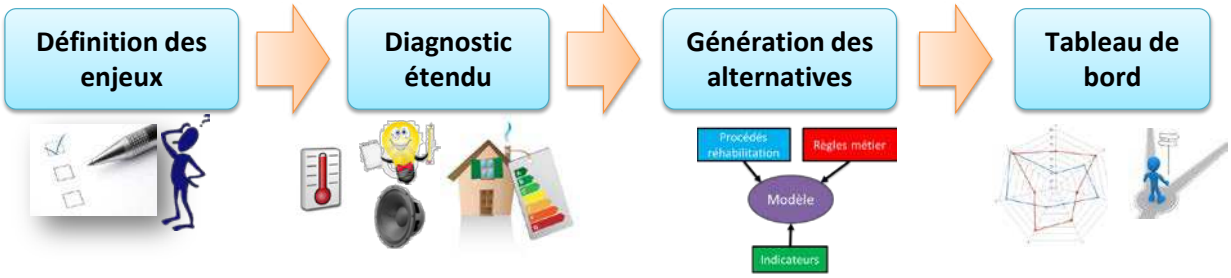


Figure 2 – Processus d'aide à la décision, vu du côté utilisateur

Les 4 phases utilisateurs sont les suivantes :

1/ ENJEUX DU PROJET : Cette phase consiste à comprendre les attentes de la maîtrise d'ouvrage (= le ou les décideurs) pour permettre par la suite de proposer les alternatives de rénovation (= bouquets de solutions d'amélioration énergétique) pertinentes aux regards des préférences exprimées.

[9] Voir le découpage des phases d'une opération de construction ou de rénovation de la loi MOP : Debaveye H. , Haxaire P., 170 séquences pour mener une opération_de construction, 8e éd., Le Moniteur, 2012

DEFINITION DES ENJEUX



Motivations du décideur
- ❑ *Améliorations souhaitées*
- ❑ *Résolution de pathologies*
- ❑ *Maintenance programmée*

Contraintes externes
- ❑ *Budget*
- ❑ *Délais*
- ❑ *Site classé…*

2/ DIAGNOSTIC ETENDU : Mené intégralement par le professionnel en charge du projet de rénovation, il consiste à collecter toutes les entrées de la méthodologie. Ces informations serviront entre autres à : (1) évaluer la performance multicritère avant rénovation ; (2) alimenter les règles expertes permettant de trier les solutions d'amélioration énergétiques compatibles avec les spécificités du bâti.

DIAGNOSTIC ETENDU

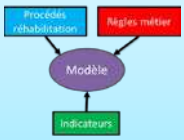


Diagnostic énergétique
- ❑ *Évaluation des consommations énergétiques (outil Th-C-E Ex Faisabilité)*

Diagnostic étendu
- ❑ *Évaluation du confort global*
- ❑ *Description des pathologies et dysfonctionnements*
- ❑ *Check-list technique du bâti*

3/ GENERATION DES ALTERNATIVES : Ici la procédure est automatisée et semi-transparente pour l'utilisateur. Les informations collectées dans les deux phases précédentes sont injectées dans un outil d'inférence probabiliste (réseaux bayésiens), et permettent de générer des alternatives de rénovation répondant aux spécificités de l'existant et approchant aux mieux les préférences exprimées par la maitrise d'ouvrage. Ensuite des algorithmes de classement sont utilisés pour ordonner les alternatives générées.

GENERATION DES ALTERNATIVES

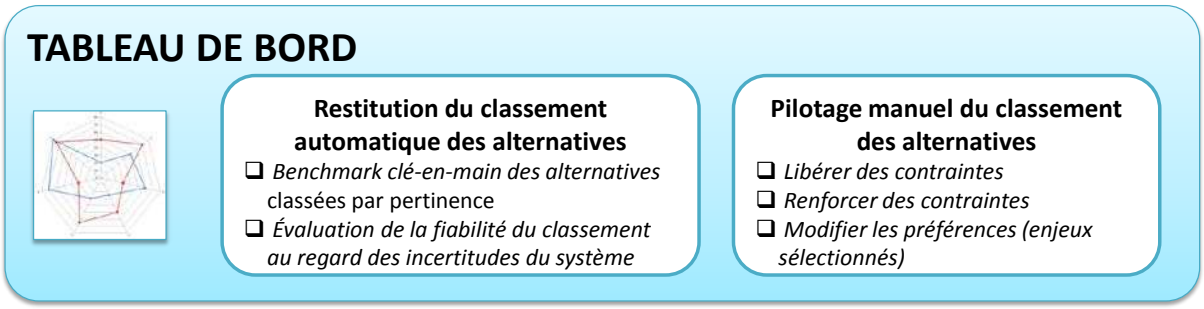


Pré-classement automatique des procédés techniques
- ❑ *Couplage de procédés à préconiser*
- ❑ *Couplage de procédés à éviter*
- ❑ *Explication pédagogique*

Élaboration des alternatives de réhabilitation
- ❑ *Génération automatique des alternatives de réhabilitation*
- ❑ *Classement automatique des alternatives*

4/ ASSISTANT D'AIDE AU CHOIX / TABLEAU DE BORD : le professionnel arrive sur un tableau de bord affichant un classement ordinal d'alternatives générées automatiquement aux regards des informations collectées. Il peut « ouvrir »

chaque alternative pour voir les solutions techniques qui la compose, mais aussi accéder à leurs performances multicritères intrinsèques, leurs contraintes de mise en œuvre et les recommandations techniques qui leurs sont associées. Il peut également constituer ses propres alternatives en sélectionnant manuellement les solutions techniques et génériques disponibles, et voir leur compatibilité avec l'existant, ainsi que leur performance multicritère au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage.



Le schéma de la Figure 3 expose les connaissances métiers (fond bleu), les méthodes (fond rouge) et les actions de l'utilisateur (fond violet) permettant de faire fonctionner la méthodologie d'aide à la décision. Certains points – encadrés en vert et numérotés de 1 à 7 – constituent les modules techniques présentés brièvement ci-après.

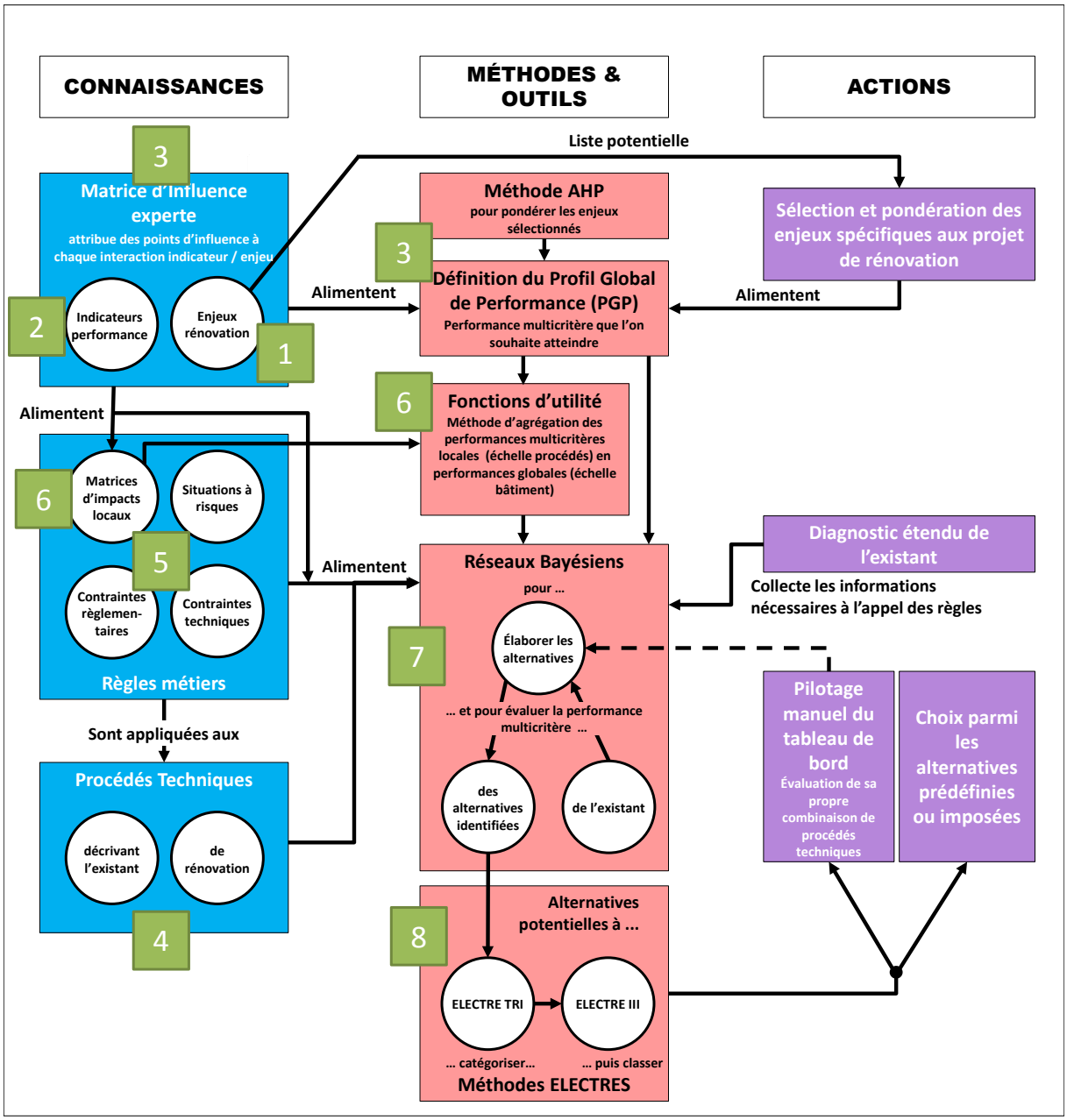


Figure 3 - Découpage en trois vues (connaissances, méthodes & outils, actions) de la méthodologie déployée

Les 7 modules techniques sont les suivants :

1. Définition des principaux enjeux de rénovation

Lorsqu'un projet de réhabilitation est porté par un propriétaire ou un gestionnaire de parc, l'amélioration de la performance énergétique du bâti n'est pas forcément la seule finalité recherchée. Les motivations des décideurs sont généralement multiples et relèvent autant des thématiques de l'énergie et du confort, que de la facilité d'usage ou de la santé. Sur la base de ce constat, il apparaît donc nécessaire d'évaluer à la fois la situation initiale (avant

réhabilitation) et les alternatives de réhabilitation (qui seront formulées par la suite), au travers d'un panel d'indicateurs traduisant les différentes facettes que peut revêtir l'idée de performance pour un individu.

Dans l'approche adoptée, les motivations potentielles des décideurs, appelées par la suite objectifs de réhabilitation, sont associées aux contraintes externes (coûts, délais…) pour former les enjeux de réhabilitation. 40 de ces enjeux ont été mis en évidence dans la méthodologie.

Pour de nombreuses personnes, la relation permettant le passage des enjeux, exprimés en langage naturel, à des niveaux de performance chiffrée sur des indicateurs métiers, reste une étape difficile et parfois non intuitive. Par exemple, la volonté de remplacer un équipement énergétique défectueux peut être motivée directement par des raisons de confort thermique ou par des coûts de fonctionnement (causalités intuitives). Cependant, d'autres aspects de la performance peuvent être impactés par le changement de cet équipement, comme le confort acoustique (lié aux bruits d'équipements) ou la facilité de maintenance ou d'utilisation du nouvel équipement qui pourrait être mis en œuvre. Cet exemple illustre le savoir expert nécessaire à la transposition d'un enjeu en « niveaux d'influence » sur les indicateurs de performance utilisés.

Dans les modules suivants, sont définis les indicateurs de performance, puis la méthode d'explicitation des préférences de la maîtrise d'ouvrage (pondération subjective des enjeux de rénovation codifiés) en valeurs-cibles pour les indicateurs de performance.

2. Définition des indicateurs de performance

Dans l'approche *Réhascope*, 32 indicateurs (qualitatifs et quantitatifs), répartis en 8 cibles, sont modélisées pour évaluer chaque facette de la performance globale d'une situation (avant et après rénovation). Bien que définis à l'échelle bâtiment, ces mêmes indicateurs servent à évaluer de manière qualitative les performances intrinsèques des solutions techniques et génériques définies dans la méthodologie.

Pour chaque projet de rénovation, seuls certains indicateurs sont utilisés – selon les préférences des décideurs - comme critères d'évaluation des alternatives de réhabilitation.

Tableau 1 - Indicateurs de performance

Efficacité énergétique		Empreinte environnementale					Confort global				coût global		Impacts sociaux					Santé		Sécurité		Qualité d'usage			Risques induits				
Δ conso.d'énergie non renouvelable	Taux d'énergie renouvelable	Δ GES liés aux conso. énergétiques	Energie primaire totale	Déchets totaux	Epuisement des ressources	Gestion durable de l'eau	Confort thermique	Confort acoustique	Confort olfactif	Accès à l'éclairage naturel	Coût initial	Coût de fonctionnement	Temps de mise en œuvre	Travaux en site occupé	Embellissement du bâti	Gêne potentielle pour le voisinage	Modification de la surface habitable	Taux de renouvellement d'air	Radon, Plomb, Amiante	Sécurité incendie	Stabilité mécanique	Accessibilité	Sécurité contre l'intrusion	Adéquation du bâti aux besoins	Pathologies liées à l'humidité	Risques liés à la combustion	Risques électriques	Risques d'inconforts acoustiques

Le Tableau 1 présente, par cible, les indicateurs retenus à ce jour dans la méthodologie. Ces indicateurs sont choisis en cohérence avec les projets *Elodie 2.0* et *Intégrabilité* de la priorité scientifique « Bâtiment durable ».

3. Définition des préférences

Le CSTB a mis en œuvre une méthode de génération de Profil Global de Performance (PGP), permettant de construire, pour chaque projet de rénovation, un profil de valeurs-cibles attendues sur les indicateurs de performance à partir de la sélection d'enjeux (via un formulaire) puis la pondération de ces derniers (utilisation de la méthode Analytic Hierarchy Process). Cette étape, correspondant à la première phase d'utilisation de la méthodologie d'aide à la décision, permet à une maîtrise d'ouvrage non experte sur les multiples thématiques du bâtiment, d'exprimer ses attentes à travers des notions qui lui parlent, plutôt que de renseigner directement des performances sur des indicateurs.

Le cœur de la méthode repose sur une matrice qui croise enjeux de rénovation et indicateurs de performance. Pour chaque couple « enjeu/indicateur » un nombre de points d'influence (allant de 0, pour une influence nulle, à 3 pour une influence de première importance) est attribué une fois pour toute par un panel d'experts afin d'exprimer et de quantifier la relation entre ces deux notions. Les étapes complémentaires permettant d'obtenir le PGP seront présentées dans le manuscrit de thèse[10] de Mathieu THOREL publié d'ici octobre 2014.

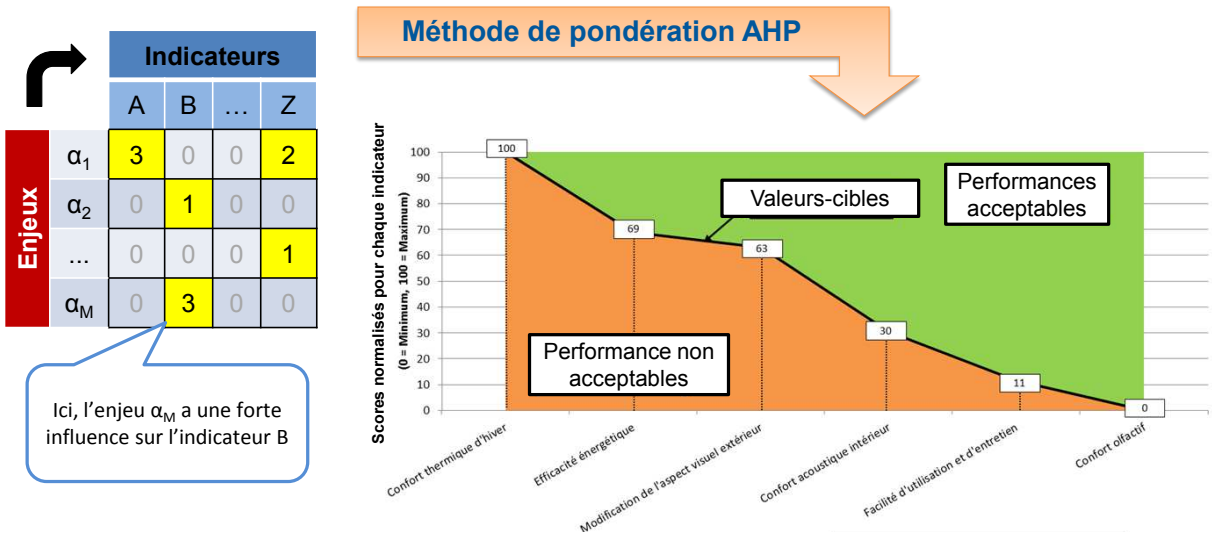


Figure 4 - Vue simplifiée de la matrice d'influence experte (à gauche) et d'un PGP (à droite)

[10] M.Thorel, *Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale*, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2014

4. Solutions techniques et génériques de rénovation

Que ce soit pour caractériser la performance initiale de l'existant ou pour définir des alternatives de réhabilitation, le bâti est décrit conceptuellement comme un assemblage de briques technologiques assurant chaque fonctionnalité première du bâtiment (isolation, ventilation, chauffage…). Ces briques sont appelées par la suite « procédés techniques génériques ». Ce module décrit la structuration de la base de procédés (voir Figure 5), sur laquelle vont se greffer par la suite certaines de nos règles expertes (fonctions d'utilité, contraintes techniques et réglementaire…)[11].

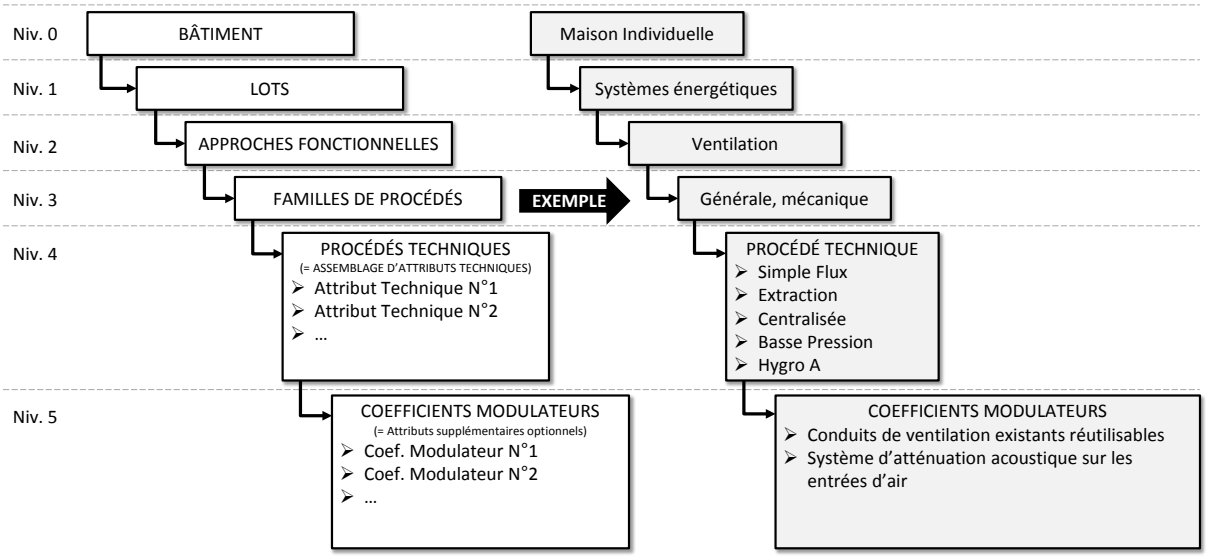


Figure 5 - Décomposition fonctionnelle d'un bâtiment en une somme de procédés techniques

5. Collecte et formalisation de la connaissance experte

La connaissance experte utile à la prise de décision dans une opération de rénovation a été formalisée sous la forme de « règles expertes », pouvant pour la plupart être modélisée dans notre outil d'inférence de la connaissance (voir §2.1.2). Six catégories de règles ont été mis en évidence lors des travaux d'investigation : les **contraintes techniques**, les **contraintes réglementaires**, les **opportunités de couplage avec des opérations de maintenance programmée**, les **fonctions d'utilité**, les **situations à risques**, et les **recommandations de mise en œuvre**). Chacune de ces règles s'applique *a minima* à un procédé technique, et influent soit sur la possibilité de le mettre en œuvre dans un projet de rénovation (modélisation sous la forme de fonctions logiques), soit sur la performance multicritère du projet de rénovation (modélisation sous la forme de fonction d'utilité).

[11] En novembre 2013, la décomposition fonctionnelle d'un bâtiment résidentiel (initiée mais non complète) recense : 2 lots, 11 approches fonctionnelles, 38 familles de procédés et 153 procédés techniques.

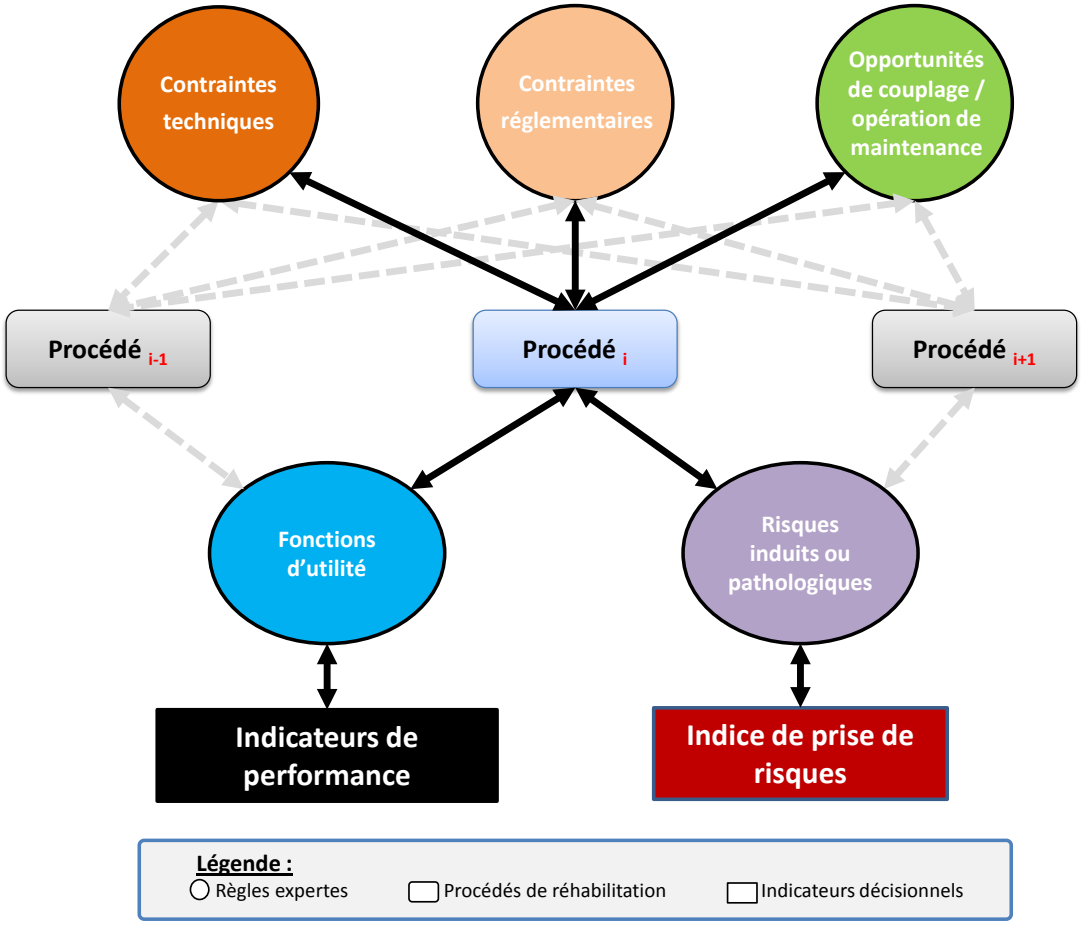


Figure 6 - Architecture et dépendances des différents types de règles expertes avec les procédés de réhabilitation et les indicateurs de performance globale

6. Évaluation des performances multicritères (à l'échelle procédé puis bâtiment)

Afin de pouvoir alimenter les fonctions d'utilité (un des types de règles expertes codées dans la méthodologie), il est nécessaire d'évaluer au préalable sur chaque indicateur modélisé les performances intrinsèques de chaque procédé technique répertorié. Ainsi un travail de collecte et de formalisation de ces « impacts performanciels » a été engagé et permet d'enrichir continuellement la méthodologie d'aide à la décision à travers des matrices d'impacts.

Ensuite, les performances intrinsèques de chaque procédé ayant une influence sur un indicateur de performance sont agrégées[12] pour obtenir une fonction d'utilité. Cette dernière permet, in fine, d'obtenir un niveau de performance sur

[12] Le passage des performances intrinsèques définies à « l'échelle procédé » à la performance globale définies à « l'échelle bâtiment », se fait par une méthode d'agrégation de type « somme pondérée + attribution de la somme obtenue à un niveau de performance défini à l'échelle bâtiment » par un panel d'experts.

un indicateur à l'échelle du bâtiment, pour chaque combinaison possible de procédés techniques (Figure 7).

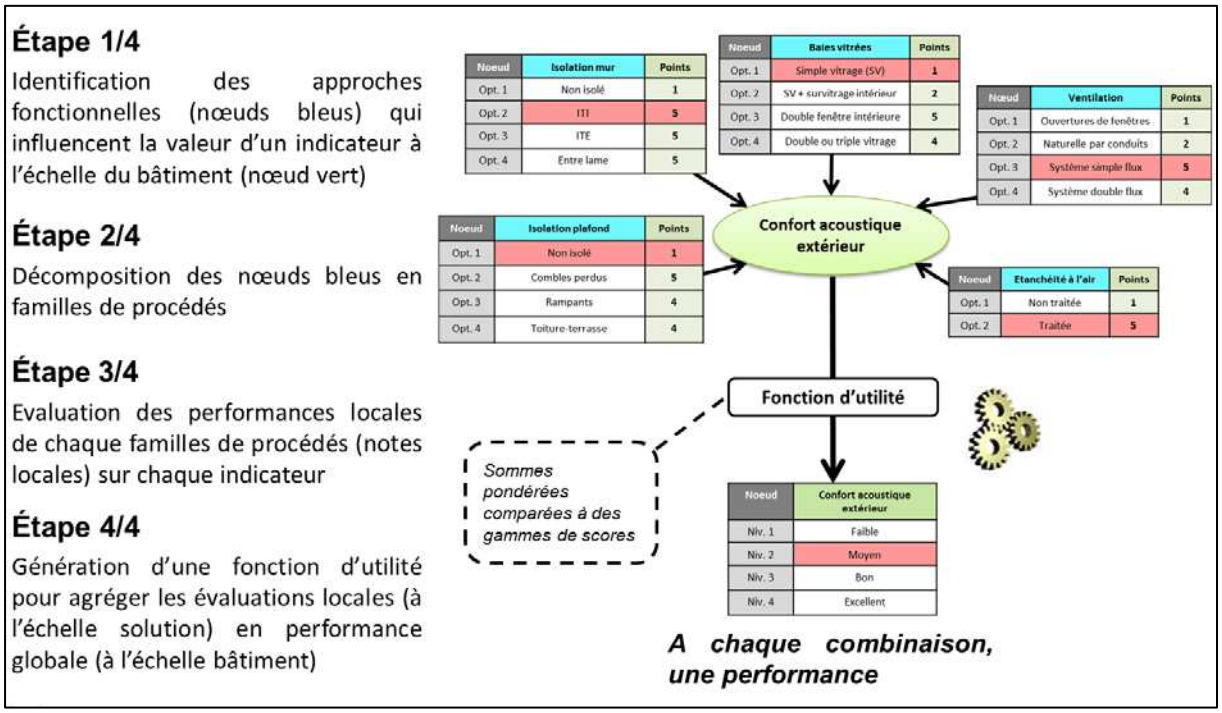


Figure 7- Illustration de la méthode de construction des indicateurs de performance à l'échelle du bâtiment

7. Mise en œuvre d'un modèle d'inférence probabiliste en milieu incertain (réseaux bayésiens)

La technologie des réseaux bayésiens est utilisée pour rassembler dans un même modèle d'inférence de la connaissance : indicateurs (codés sous forme de fonctions d'utilité), procédés techniques, règles expertes (codées sous forme de fonctions booléennes) et spécificités techniques permettant de décrire l'existant (et d'appeler les règles expertes à appliquer en fonction du contexte). Comme présenté dans le paragraphe §2.1.2, le modèle de réseau bayésien construit une fois pour toute, permet de réaliser pour chaque projet de rénovation (en injectant les connaissances spécifiques à chaque cas[13]) les quatre types d'actions suivantes : aide au diagnostic, évaluation des performances de l'existant, recherche d'alternatives de rénovation (Figure 8) et évaluation des performances des alternatives de rénovation.

[13] PGP pour la rechercher d'alternatives pertinentes ; informations issues du diagnostic de l'existant pour appliquer les règles expertes de types « contraintes » qui agissent comme des filtres sur la mise en œuvre possible de certains procédés techniques.

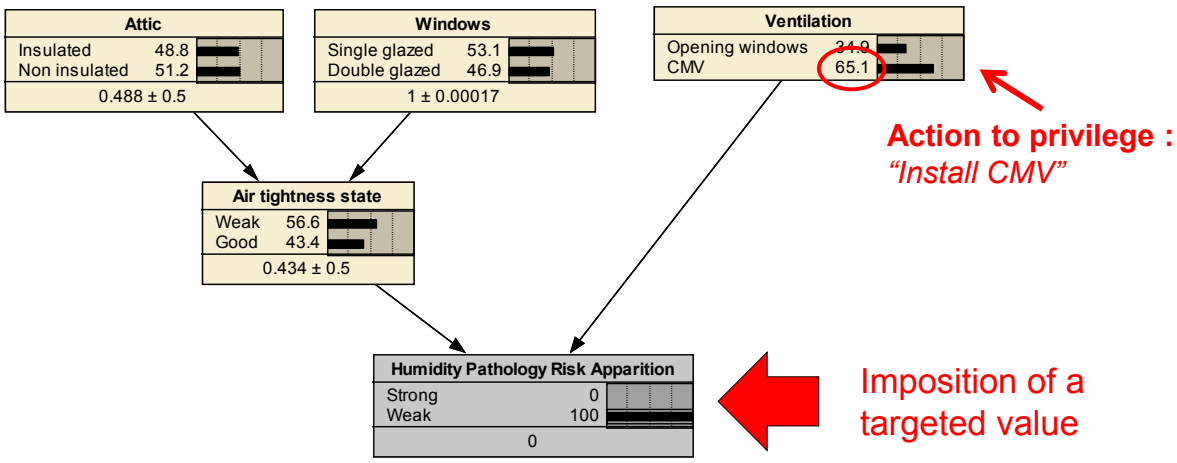


Figure 8 - Exemple d'imposition d'une valeur-cible sur un indicateur, et propagation de l'information jusqu'aux procédés techniques à mettre en œuvre (structure bayésienne simplifiée pour l'exemple)

8. Algorithmes de tri et classement en milieu incertain (méthode ELECTRE)

Les algorithmes des méthodes de surclassement ELECTRE [14] de tri et de classement sont opérationnels (respectivement ELECTRE Tri et ELECTRE III), mais ils ne sont pas pour le moment connectés au module 7 permettant de générer puis d'évaluer automatiquement les alternatives de rénovation. De plus, ces méthodes ELECTRE doivent être associées à des analyses de sensibilité pour évaluer la robustesse des classements ordinaux obtenus (utilisation des méthodes de tirage de type Monte-Carlo). Cette partie a été décrite de manière succincte au paragraphe §2.1.3.

2.3 COLLECTE DE CONNAISSANCE

La connaissance recueillie, l'a été en partie au travers de l'exploitation de documentation et d'études antérieures et en partie au travers d'un travail spécifique sur les procédés techniques de rénovation de l'enveloppe et des systèmes.
Six classes de règles expertes ont été identifiées : les contraintes techniques, les contraintes règlementaires, les impacts multicritères, les synergies possibles avec des actions de maintenance, les recommandations de mise en œuvre, et les risques induits d'apparition de pathologies ou d'inconfort.
A ce jour, le CSTB dispose ainsi :

[14] pour plus d'informations, se référer aux livrables *Réhacope* ou à l'ouvrage suivant de Maystre, L.Y. et al., Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994

- de matrices d'analyse multicritère et qualitative ;
- d'une description détaillée de familles de procédés d'isolation de l'enveloppe (matrices de compatibilité entre procédés et éléments d'enveloppe, matrices impacts) ;
- d'une description détaillée de familles de procédés de ventilation (matrices impacts) ;
- ***d'une centaine de règles (de type « logique » ou « fonction d'utilité »)*** s'appliquant à différentes échelles granulométriques de l'information (échelle *bâtiment*, échelle *procédé*, échelle *composant*), nécessitant pour la plupart une validation par un expert référent sur chaque thématique impactée ;
- ***d'une ébauche de base de données d'aide*** à la caractérisation de l'existant

Aide au choix	– typologies de maisons individuelles = f(année, département, densité urbaine) ; – procédés constructifs possibles = f(année, département, densité urbaine) ; – équipements énergétiques possibles = f(année, densité urbaine) ;
Évaluation de la performance initiale	– évaluation possibiliste (valeurs minimale, maximale, la plus probable) des caractéristiques énergétiques les plus sensibles, aux niveaux des procédés et des équipements.

- d'une ébauche de base de données de procédés de rénovation (arborescence en 11 approches fonctionnelles – au sens de la Figure 5 – de procédés techniques génériques démocratisés ces dernières années) permettant de proposer et d'évaluer des bouquets de solutions de réhabilitation à travers une analyse multicritère :
  - 3 thématiques sur l'isolation : murs, plafonds, planchers bas,
  - 4 autres thématiques sur l'enveloppe : baies vitrées, étanchéité à l'air, protections solaires, portes extérieurs
  - 3 thématiques sur les équipements énergétiques : chauffage, ECS, ventilation,
  - 1 thématique sur des actions transverses : énergies renouvelables, économies d'énergie, maintenances non énergétiques.

Développements informatiques pour la collecte de la connaissance

Les prototypes développés permettent :

- De recueillir et d'analyser l'expertise pluridisciplinaire sur :
  - les enjeux vs. indicateurs (matrice d'influence),
  - les procédés vs. indicateurs (matrices d'impacts),
  - les procédés et des règles associées aux procédés
- De générer le réseau bayésien rassemblant : indicateurs de performance, procédés techniques, et règles expertes.

2.4 DÉFINITION FONCTIONNELLE D'UN OUTIL

Cette partie, qui se situe en aval des autres, reste pour l'instant la moins aboutie. Des scénarios de recueil et de présentation d'information dans les différentes parties de l'outil ont été définis et traduits sous forme de maquette. Il convient maintenant d'avancer sur un prototype mettant en œuvre la méthodologie retenue.

2.4.1 DÉVELOPPEMENTS INFORMATIQUES POUR L'AIDE À LA DÉCISION

Les prototypes développés permettent :

- De saisir et de pondérer les enjeux spécifiques à chaque projet de rénovation ;
- De générer le PGP sur la base des enjeux saisis et pondérés ;
- De réaliser un diagnostic étendu de l'existant ;
- D'évaluer les performances multicritères avant rénovation ;
- De renseigner une *check-list* des contraintes techniques et règlementaires applicables au projet en cours ;
- De rechercher des alternatives satisfaisant au mieux le PGP
- D'évaluer chacune des alternatives grâce au réseau bayésien (indicateurs sous forme de distributions de probabilités) ;
- D'établir un classement multicritère (méthodes ELECTRE)

2.4.2 MODULES DÉVELOPPÉS RÉUTILISABLES DANS D'AUTRES PROJETS

Certains modules développés (dédiés à la formalisation de connaissances métiers ou prenant la forme de méthodes de calcul ou d'inférence) sont très facilement transposables à d'autres cibles (types de bâtiments ou changement d''échelle d'analyse) ou réutilisable dans d'autres projets :

- Matrice d'influence + méthode AHP
- Technique de génération de la fonction d'utilité
- Technologie des réseaux bayésiens
- Algorithmes de classement ELECTRE Tri & ELECTRE III

3. PERSPECTIVES

Les perspectives faisant suite aux travaux réalisés depuis 3 ans, dans le cadre du projet *Réhascope*, sont présentés dans cette partie selon les axes suivants :

- Les travaux devant être poursuivis ;
- Les travaux pouvant être valorisés dans d'autres actions de recherche ;
- Les travaux pouvant faire l'objet de valorisation sous forme de logiciel ou d'expertise ;
- Les suites possibles aux travaux engagés ;

3.1 TRAVAUX DEVANT ÊTRE POURSUIVIS

En l'état, un certain nombre de chantiers sont engagés mais ne seront pas terminés d'ici la fin de l'année. Ils portent sur :

- La collecte et la modélisation des connaissances ;
- Les outils d'alimentation et de gestion des réseaux bayésiens ;
- Les outils de mise en œuvre des méthodes ELECTRE ;
- Le développement d'un prototype d'interface d'application de la méthodologie.

La collecte et la modélisation des connaissances concerne principalement la complétion de la matrice d'influence (enjeux / indicateurs) et des matrices d'impacts (procédés / indicateurs).
Cette collecte peut être vue comme un travail indépendant du projet *Réhascope* tant les exploitations possibles sont nombreuses. Le travail fait n'est que partiel, il permet la mise en œuvre de la méthodologie, mais pas de garantir la fiabilité de l'exploitation de cette base. En effet, à ce jour un ensemble trop restreint d'experts est intervenu sur cette base, et il paraît difficile d'avoir une approche statistique robuste permettant de valider le contenu de ces différentes matrices. Pour cela une approche consensuelle a été choisie, permettant aux différents experts d'avoir accès aux connaissances produites par les autres experts et à leurs justifications. Ceci est *a fortiori* indispensable lorsque les notes produites par les experts font l'objet d'un écart important. Néanmoins, il conviendrait pour accroitre la robustesse de cette base de connaissance qu'un ensemble plus important d'experts du CSTB, dans leurs domaines respectifs, remplissent et valident le contenu de ces deux types de matrices. Deux outils collaboratifs accessibles en lignes permettent de collecter les connaissances de ce type.
Pour une approche plus exhaustive, il pourrait être pertinent de proposer un projet de recherche collaboratif visant la mise en place d'une communauté autour de la problématique de la connaissance experte relative à la rénovation. Il conviendrait de proposer à un large panel d'experts :

- de valider et/ou de compléter les entrées retenues pour les matrices (enjeux, indicateurs, procédés de rénovation) ;
- de renseigner les informations relatives aux 2 matrices en tenant compte des avis déjà émis.

En échange, et dans l'esprit d'une stratégie gagnant/gagnant, chaque expert aurait un accès à la base de connaissance, couplé à d'autres outils pour l'exploiter.

Par ailleurs, la connaissance recueillie porte également sur les procédés de rénovation (en lien avec le projet *Intégrabilité*) et sur les différents types de règles expertes citées précédemment. Dans ce cas également, il convient de compléter et de valider les informations contenues dans ces bases de connaissances et d'être à même de les enrichir au fur et à mesure que de nouveaux procédés de rénovation arrivent sur le marché.

Les outils d'alimentation et de gestion des réseaux bayésiens sont véritablement la colonne vertébrale de ces travaux de recherche et de la méthodologie. Ils permettent d'en démontrer l'intérêt. A ce jour, le CSTB a fait l'acquisition du logiciel *Netica* qui se présente sous la forme d'une API et d'une interface d'alimentation et de requêtes. Ces éléments vont permettre de renseigner le réseau bayésien sur la base des connaissances formalisées et de « faire tourner » des cas test pour valider la méthodologie. Compte tenu de l'incertitude de la poursuite de ces travaux au sein du nouveau projet *Rénovation & gestion* du programme de recherche 2014-2017, le parti a été pris de développer autant que possible ces outils d'ici la fin de l'année, et ce au détriment du développement d'une maquette fonctionnelle, dans l'objectif de fournir des résultats concrets à Mathieu Thorel, doctorant travaillant sur le sujet de « l'aide à la décision multicritère pour la rénovation énergétique de logements », dans le cadre de la finalisation de ces travaux de thèse.

Il en est de même pour les **outils de mise en œuvre des méthodes ELECTRE** permettant le regroupement et le classement des solutions. A ce jour, aucune API permettant d'implémenter ces méthodes n'a été identifié et l'on s'oriente vers un développement complet des méthodes. Cependant leur complexité est nettement moindre que celle des réseaux bayésiens.

Le développement d'un prototype d'interface d'application de la méthodologie n'a que très peu été abordé. Les principaux écrans sont définis dans les grandes lignes, ainsi que la scénarisation qui permet de les enchaîner. Pour autant, ce prototype ne pourra être développé que dans le cadre de projets ultérieurs.

3.2 TRAVAUX POUVANT ÊTRE VALORISÉS AU SEIN D'AUTRES PROJETS DE RECHERCHE

Une partie significative des travaux engagés dans le cadre de ce projet peuvent de toute évidence être ré-exploités dans d'autres cadres, et en particulier dans d'autres projets de recherche. Il devra dans ce cas y avoir un minimum d'adaptation, en particulier en ce qui concerne les développements informatiques, mais cela devrait se situer à la marge par rapport à un investissement partant de zéro.

Les bases de connaissances (enjeux, indicateurs, procédés de rénovation) peuvent être fournies dans un format numérique (fichier Excel, base de données, fichier XML). La transformation de ces bases de connaissance vers les réseaux bayésiens reste quant à elle spécifique et n'a pas vocation à être réutilisée.

Toute la chaîne mise en œuvre pour l'aide à la décision, que ce soit les réseaux bayésiens ou les méthodes ELECTRE, peut être appliquée à tout autre projet d'aide à la décision. Le savoir-faire et les outils acquis, ainsi que l'interfaçage de ces outils dans un code informatique pourront en grande partie être réutilisés.

3.3 TRAVAUX POUVANT FAIRE L'OBJET D'UNE VALORISATION SOUS FORME DE LOGICIEL OU D'EXPERTISE

Le concept développé dans le cadre de ce projet peut bien évidemment être valorisé dans son intégralité dans un outil informatique d'aide à la décision pour la rénovation énergétique selon une approche globale.

Pour autant, il reste encore un long chemin à parcourir qui est remis en cause par les moyens financiers prévisibles sur ce sujet, tant en interne au CSTB qu'au niveau de la recherche cofinancée, qu'elle soit nationale ou européenne. Par pragmatisme, c'est une valorisation par morceau, à chaque fois que cela sera possible, qui est visée. Cela peut concerner des outils de diagnostic, des outils d'aide à la décision ou des outils à caractère pédagogique.

Dans cet esprit, un outil interactif de présentation de solutions de rénovation devrait être élaboré dans le cadre d'un contrat en négociation avec la société Phénix Evolution (filiale rénovation de *Géoxia*).

3.4 SUITES POSSIBLES AUX TRAVAUX ENGAGÉS

En dehors des suites citées ci-dessus, visant à finaliser *a minima* les travaux précédemment engagés dans un outil complet, il pourrait être pertinent d'évoluer vers une plateforme, plus large, multi-acteurs, d'aide à la décision pour la réhabilitation incluant :

- le choix des bâtiments à rénover au sein d'un parc ;
- des outils d'arbitrage entre rénovation légère, rénovation lourde, déconstruction reconstruction ;
- l'aide au choix des solutions de réhabilitation pour un bâtiment donné.

Dans cet esprit, l'élargissement du périmètre du projet actuel pourrait apporter des réponses à la lutte contre la précarité énergétique.

Par ailleurs, le concept développé dans le cadre du projet *Réhascope* pourrait être étendu dans 2 directions :

- L'utilisation de la maquette numérique dans la caractérisation du bâtiment initial et pour la restitution des alternatives possibles de réhabilitation. La mise en œuvre d'une maquette numérique à partir de photos ou de relevés simplifiés utilisant un smartphone ou une tablette, constitue une piste intéressante.
- Le couplage avec des outils de conception détaillés tels que ceux visés dans le projet Simbio pourrait être envisagé. Plus précisément la recherche d'optimums au travers d'outils de simulation pourrait être grandement facilitée par l'outil Réhascope dans la mesure où ce dernier permet de réduire le champ des possibles et donc les temps de collecte d'informations inutiles et de simulation.

3.5 PARTENARIATS ENGAGÉS ET À POURSUIVRE

Les partenariats établis dans le cadre du projet *Réhascope*, le sont principalement dans le montage de propositions de recherche collaborative européennes (call NMP 2012 et 2013) ou nationales (ANR Villes et Bâtiments Durables 2012 et 2013).

Parmi les organisations concernées par ces partenariats, citons :

- Le LOCIE (Université de Chambéry) avec lequel est engagée une thèse sur l'aide à la décision en milieu incertain appliquée à la rénovation énergétique.
- L'ENTPE et l'EIVP, avec lesquels le CSTB a répondu à plusieurs appels à projets de recherche de l'ANR.
- Le CEA LIST avec lequel ont été portées plusieurs propositions et avec lequel le CSTB souhaite, dans le cadre de l'accord de coopération « Alliance bâtiments numériques Grenelle », définir et de mettre en œuvre des axes de co-programmation. En l'occurrence, le LIST pourrait accompagner le CSTB sur la dimension modélisation et gestion de la connaissance au travers de technologies telles que les réseaux bayésiens, proches de l'intelligence artificielle.

Citons aussi les villes de Strasbourg et de Paris, EGIS, POUGET consultants, Stern, l'université de Cardiff, St Gobain (Habitat France), R2M, Calcon, l'université de Tübingen…

Le CSTB collabore également avec la société Phénix Evolution (filiale rénovation du groupe Géoxia), partenaire du projet ODMIR 4 de la fondation Bâtiment énergie. Phénix suit de près les travaux que nous menons afin de pouvoir, à terme, les intégrer dans des outils qu'ils pourraient développer pour leur propre compte. En parallèle, Phénix Évolution fournit des informations typologiques sur les maisons construites par le groupe Géoxia et intègre le CSTB dans le comité de suivi d'un projet de rénovation énergétique exemplaire sur une de leurs maisons.

D'autre part, dans le cadre de son programme REHA, le PUCA a confié au CSTB un projet visant à les accompagner pour le montage d'un atelier "Performance énergétique / environnementale d'opérations de requalification" où il s'agira en

premier lieu d'établir un *benchmark* entre plusieurs opérations de réhabilitation afin, entre autre d'identifier les arbitrages faits en terme de performance énergétique, environnementale ou économique. Ce projet a fait l'objet d'une demande de prorogation à l'initiative du PUCA mais devrait démarrer courant novembre et se poursuivre dans le 1er trimestre 2014.

Des échanges ont également eu lieu, lors du montage d'un projet européen, avec la société Calcon qui développe et distribue le logiciel EPIQR en Allemagne. Ce logiciel est issu d'un projet du 4ème PCRD dans lequel le CSTB était partie prenante. A l'époque, la valorisation de ce logiciel en France avait été portée par un autre acteur que le CSTB et, force est de constater que celui-ci n'a pas eu la réussite de nos collègues allemands, suisses ou autrichiens. À ce jour Calcon souhaite mettre en place un accord commercial avec le CSTB pour que celui-ci puisse reprendre la diffusion d'EPIQR en France. Si tel était le cas, ce logiciel pourrait servir de plateforme d'accueil aux outils développés dans le cadre de *Réhascope*.

Enfin, de récents échanges avec l'Anha amènent à envisager des collaborations autour du projet *Réhascope*. L'Anha pourrait contribuer en fournissant des informations sur des projets de réhabilitation ciblés, permettant de tester la méthodologie du CSTB. L'Anha pourrait également, au travers des experts qu'elle sollicite régulièrement, nous aider à compléter et à valider la base de connaissances. Enfin elle pourrait contribuer à la définition fonctionnelle de l'outil visé afin que celui-ci puisse répondre à ses besoins. Les pistes envisagées sont la mise en œuvre d'une convention de recherche commune et/ou le montage d'un projet de recherche collaboratif.

LISTE DES RÉFÉRENCES

LIVRABLES

ANDRIEUX F., THOREL M., ABELÉ C., REYNIER L., FARKH S., Réhascope : méthodologie d'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique de bâtiments résidentiels. Livrable 2012, CSTB, décembre 2012, 120 p.

COMMUNICATIONS (CONFERENCE PROCEEEDINGS)

ANDRIEUX F., THOREL M., BUHÉ C., Decision making for an optimized renovation process, ECPPM 2012, Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling "eWork and eBusiness in architecture, engineering and construction", July 25-27, 2012, Reykjavik, ISL, CRC Press, 2012, p. 67-74 [doi:10.1201/b12516-13]

ANDRIEUX F., MAÏSSA S., THOREL M., Knowledge management for decision making in holistic building renovation design, CIB W78 29th International conference on the Applications of IT in the AEC Industry, October 17-19, 2012, Beyrouth, LBN, 9 p.

THOREL M., ANDRIEUX F., BUHE C., Aide à la décision multicritère pour la réhabilitation énergétique : application aux bâtiments résidentiels, AUGC 2013, 31e Rencontres universitaires de l'AUGC, "De l'expérimentation à la modélisation en génie civil", 29-31 mai 2013, Cachan, FRA, 10 p.

THÈSE

THOREL M., *Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale*, Thèse de doctorat de l'université de Grenoble ⇒ Soutenance prévue fin 2014

SIÈGE SOCIAL
84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | www.cstb.fr

