



HAL
open science

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

Mathieu Thorel

► **To cite this version:**

Mathieu Thorel. Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale. Autre. Université de Grenoble, 2014. Français. NNT : 2014GRENA020 . tel-01136935

HAL Id: tel-01136935

<https://theses.hal.science/tel-01136935>

Submitted on 30 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Mathieu THOREL

Thèse dirigée par **Gérard SAUCE** et
codirigée par **Catherine BUHÉ**

préparée au sein du **LOCIE**
dans l'**École Doctorale SISEO**

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

Thèse soutenue publiquement le **16 octobre 2014**
devant le jury composé de :

M. Etienne WURTZ Directeur de recherche HDR au CEA	Président
M. David BIGAUD Professeur à l'Université d'Angers	Rapporteur
M. Pierre MICHEL Ingénieur divisionnaire HDR de l'ENTPE	Rapporteur
M. Franck ANDRIEUX Chef de Division au CSTB	Examineur
M. Gérard SAUCE Maître de conférences HDR à l'Université de Savoie	Directeur
Mme. Catherine BUHÉ Maître de conférences à l'Université de Savoie	Co-directeur



Avant-propos

Ce travail a été réalisé au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Sophia Antipolis et au Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) de Chambéry.

Je tiens à remercier Monsieur Patrick Morand, directeur d'établissement du CSTB de Sophia Antipolis, pour m'avoir accueilli durant ces trois dernières années dans ses locaux.

Toute ma gratitude va à Monsieur Franck Andrieux, chef de division au CSTB, qui m'a accueilli et intégré dans son équipe, m'a proposé ce travail de thèse et qui m'a suivi au quotidien durant ces années d'études doctorales. Il m'a donné l'opportunité de faire mes preuves sur des projets aussi variés qu'intéressants.

Un grand merci à mes directeurs de thèse, Madame Catherine Buhé et Monsieur Gérard Sauce, tous deux maîtres de conférences à l'Université de Savoie. Leur patience et leurs conseils avisés m'ont permis de m'épanouir pleinement dans ce monde riche qu'est la recherche. Travailler à leur côté a été pour moi un véritable plaisir.

Mes remerciements vont également à Messieurs Pierre Michel et David Bigaud, respectivement ingénieur divisionnaire de l'ENTPE à Lyon et professeur à l'Université d'Angers, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail de thèse. Et à Monsieur Etienne Wurtz, directeur de recherches CNRS à Chambéry pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateur de ces travaux.

J'adresse toute ma reconnaissance à Benoit et Nicolas, ils se reconnaîtront, pour leur écoute et nos discussions passionnées sur des sujets aussi variés que les sciences, le bâtiment ou le 7^{ème} art. Je n'oublie pas mes autres collègues du CSTB avec qui j'ai partagé de nombreux bons moments ces trois années.

Je remercie également Kevin, Rémy, Fabien et Tristan ainsi que les autres doctorants et stagiaires de Sophia avec qui j'ai échangé, travaillé, plaisanté et partagé la pause-café au quotidien dans la bonne humeur.

Enfin, j'adresse un clin d'œil à Cécile et nos familles qui m'ont apporté leur soutien durant toute cette période.

Résumé

Nous passons la majeure partie de notre vie dans des bâtiments. Ces derniers ont été construits, pour la plupart, avant les chocs pétroliers de 1974 et 1979, et offrent une performance énergétique médiocre ainsi que des conditions de confort (thermique, acoustique, éclairage naturel) largement améliorables. En France, avec 32 millions de logements et un taux de renouvellement annuel du parc existant inférieur à 1 %, la rénovation énergétique des logements devient une nécessité. Cela, autant pour des raisons politiques (indépendance énergétique), économiques (relance des emplois de la construction, valorisation du patrimoine), sociales (bien-être des occupants, lutte contre la précarité), qu'environnementales (diminutions des émissions des gaz à effet de serre).

Ce travail de thèse vise à proposer des connaissances ainsi qu'une méthodologie afin de contribuer à l'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique efficaces des maisons individuelles construites durant la période 1945-1974.

Trois problématiques sont mises en avant dans cette recherche. 1) l'intégration de l'approche globale (systémique et multicritère) de la rénovation afin d'éviter des contre-performances collatérales dues à des mauvais choix ; 2) l'aide à la formalisation des préférences des propriétaires-occupants (la maîtrise d'ouvrage) dans un format interprétable par des outils d'analyses multicritères ; 3) l'intégration des incertitudes liées à la caractérisation des bâtiments existants dans le processus d'élaboration des scénarios et d'aide à la décision.

À travers une description systémique des bâtiments et une évaluation multicritère des performances des actions d'amélioration retenues, nous proposons une méthodologie innovante, constituée de 6 sous-modèles techniques modulables et interchangeable, qui vise à automatiser le processus de construction, d'évaluation et de hiérarchisation performantielle de scénarios de rénovation. Le cœur de la méthodologie est basé sur la formalisation de l'expertise métier des spécialistes du bâtiment dans deux des 6 sous-modèles. Le premier est une matrice d'influence permettant de passer des enjeux de rénovation les plus courants (équivalent aux préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage) en profil de poids relatifs et profil de niveaux-cibles de performance sur les indicateurs modélisés. Le second, est un outil d'inférence probabiliste (utilisant la technologie des réseaux bayésiens) permettant à la fois d'optimiser les assemblages d'actions d'amélioration (programmation par contraintes successives) et de réaliser une évaluation multicritère de ces assemblages (par l'usage de fonctions d'agrégation de performances locales). Un sixième et dernier sous-modèle utilise les méthodes de surclassement ELECTRE pour trier et classer par ordre de préférence les alternatives de rénovation préalablement générées. La méthodologie offre enfin la possibilité de laisser l'utilisateur tester ses propres scénarios d'amélioration énergétique afin d'analyser leurs performances multicritères et leur compatibilité avec les caractéristiques de l'existant capitalisées lors du diagnostic technique d'une opération.

La méthodologie développée se veut pédagogique et transposable dans un prototype d'outil informatique fonctionnel. Une première version a été développée et utilisée pour appliquer le processus d'aide à la décision à un cas réel de maison individuelle à rénover. Les premiers résultats obtenus sont cohérents et permettent de valider la démarche. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que, comme n'importe quel modèle utilisant des connaissances expertes, sa robustesse et la limite de validité de son périmètre d'application dépendent de la qualité du savoir métier capitalisé.

Mots-clés : rénovation énergétique des bâtiments, aide à la décision, optimisation multicritère, réseaux bayésiens, règles expertes, conception, incertitudes, évaluations de performances, méthodologie.

Abstract

We spend most of our lives in buildings. These were built mostly before the oil shocks of 1974 and 1979 and offer both poor energy performances and improvable comfort conditions (thermal, acoustic, natural lighting). In France, with 32 million units and an annual turnover of less than 1% of the existing building stock, the energy renovation of housing becomes a necessity. This, as much for political ends (energy dependence), economic reasons (revival of construction jobs, real-estate valorisation), social reasons (wellbeing of occupants), as environmental reasons (reduction of greenhouse gas emissions).

This thesis aims to provide knowledge and a methodology to contribute to the decision support for prescribing efficient energy renovation scenarios of houses built during the 1945-1974 period.

Three issues are highlighted in this research work: 1) the integration of an holistic approach of renovation process (systemic and multi-criteria) to avoid not foreseen collateral effects due to bad choices; 2) help formalize the preferences of decision-takers (homeowners) in a format interpretable by multi-criteria analysis tools; 3) integration of uncertainties related to the characterization of existing buildings in the process of scenarios generation and decision support.

Through a systemic description of buildings and a multi-criteria performance assessment of formerly identified renovation actions, we propose an innovative methodology, consisted of 6 modular and interchangeable technical sub-models, which aims to automate the generation, assessment, optimization and performance-based ranking of renovation scenarios.

The heart of the methodology is based on the formalization of renovation knowledge from construction specialists in two of the six sub-models. The first one is an influence matrix that we use to translate most common renovation goals (equivalent to the wishes expressed by homeowners) into a profile of relative weights and a profile of targeted-levels of performance on indicators modelled. The second one is a probabilistic inference tool (using the technology of bayesian networks) to both optimize assemblies of renovation actions (programming by successive constraints) and achieve multi-criteria evaluation of these assemblies (by the use of aggregation functions of local performances).

A sixth and final sub-model uses the ELECTRE outranking methods to sort and classify, by preference order, renovation scenarios previously generated. At last, our methodology provides the ability to let users test their own energy renovation scenarios in order to analyse their multi-criteria performances and compatibility with the characteristics of the existing capitalized during the technical diagnosis of their building.

The methodology proposed is intended to be educational and transposable into a functional computer system prototype. A first version was developed and used to apply our decision process to a real case of individual house to renovate. First results obtained are consistent and allow validating the approach. However, keep in mind that like any model using expert knowledge, robustness and validity limit of its scope of application depend on the quality of knowledge work capitalized.

Key-words: energy renovation of buildings, decision support, multicriteria optimization, bayesian networks, expert rules, uncertainties, performance evaluations, methodologies.

Table de des matières

Avant-propos	3
Résumé	4
Abstract	5
Introduction	7
Première Partie : Contexte de la réhabilitation énergétique des logements	10
I. La rénovation énergétique, ses enjeux, ses contraintes.....	10
II. La nécessité d'entreprendre une approche globale.....	18
III. Périmètre d'étude et positionnement des travaux de recherche.....	20
IV. Enjeux soulevés.....	22
Deuxième Partie : Traversée de l'état de l'art	24
I. Études typologiques du parc de logements en France.....	26
II. Bases de données et de connaissances existantes.....	33
III. Analyse des méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique.....	38
IV. Approche globale : terminologie et modélisation des performances.....	46
V. L'incertitude dans les systèmes de modélisation de l'information.....	55
VI. Représentations et utilisations de connaissances.....	67
VII. L'analyse multicritère.....	80
VIII. La naissance d'une problématique.....	93
Troisième partie : Méthode proposée	97
I. Cahier des charges.....	98
II. Présentation générale de la méthodologie d'aide à la décision développée.....	99
III. Description détaillée des sous-modèles.....	107
IV. Conclusion sur la méthode complète proposée.....	196
Quatrième partie : Mise en application de la méthode développée	198
I. Objectifs de la mise en œuvre.....	198
II. Application de la méthodologie.....	198
III. Retours des professionnels du bâtiment.....	216
Conclusion Générale	219
Perspectives	224
Bibliographie	227
Annexes	233

Introduction

Améliorer la performance énergétique des bâtiments est un des enjeux-clés des politiques européennes. Ce secteur représente en France 44 % de la consommation énergétique nationale et ¼ des émissions annuelles de gaz à effet de serre [1, 2]. Ces ratios se retrouvent au niveau planétaire avec 40 % d'énergie consommée et 36 % des émissions de carbone. L'objectif fixé par les institutions européennes est, d'ici 2020, de réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre et de réaliser simultanément 20 % d'économie d'énergie en France. Pour encadrer et guider les institutions nationales, des directives européennes se succèdent [3-5] et fixent les modalités énergétiques à imposer sur le neuf et la rénovation de bâtiment pour atteindre ces objectifs.

En France, comme en Europe, le taux de renouvellement des bâtiments est de l'ordre de 1 % par an [6]. Ce chiffre quasi nul s'explique pour deux raisons principales : en France, le taux de destruction est très faible, de l'ordre de 20 000 à 30 000 unités chaque année ; en parallèle la construction neuve, qui contribue essentiellement à la croissance du parc, demeure assez stable dans les dernières décennies (taux annuel de 1 à 1,5 % du stock [7]).

Afin de réduire le recours aux énergies fossiles et de prévenir l'augmentation du recours à l'énergie nucléaire, en attendant l'émergence d'énergies renouvelables en quantités suffisantes, la réduction de nos consommations énergétiques doit se faire en améliorant le bilan énergétique des bâtiments existants. Pour y parvenir, les actions à privilégier sont connues ; elles ciblent principalement l'isolation de l'enveloppe ainsi que le remplacement des équipements énergétiques peu efficaces. Des mesures incitatives (crédits d'impôts, TVA réduites) ont été engagées au niveau national en ce sens pour soutenir la rénovation énergétique des logements.

La France compte 32 millions de logements, dont 8.5 millions de bâtiments¹ construits durant la période 1945-1974 ; période de forte croissance et de prix bas de l'énergie. Ces logements, dotés de systèmes constructifs et principes architecturaux bien connus, sont un segment à très fort gisement d'économie d'énergie (la consommation énergétique annuelle moyenne en énergie primaire y est souvent supérieure à $350 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}_{\text{SHON}}\cdot\text{K}^{-1}$). La maîtrise d'ouvrage, souvent le propriétaire occupant dans le cadre des logements privés, ne voit pas la rénovation énergétique comme une finalité, mais plutôt comme une manière de réaliser une diminution de la facture énergétique. Aujourd'hui le prix de l'énergie n'est pas un levier suffisant pour déclencher l'acte de rénover – cela risque de changer dans les années à venir avec diminution de la disponibilité des énergies fossiles – il faut intégrer des arguments permettant de les convaincre des bénéfices non énergétiques associées à une amélioration thermique du bâti. Pour cela, nous proposons une méthodologie d'aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale. À la base, cette méthode cible particulièrement les maîtres d'ouvrage de maisons individuelles souhaitant réaliser des opérations légères ou moyennes et dont les acteurs professionnels sont de petites entreprises et artisans soucieux d'intégrer une approche globale aux projets de rénovation énergétique dont ils ont la charge. Mais nous verrons que son champ d'application couvre en fait tous types de bâtiment.

Ce mémoire est découpé en quatre parties traitant successivement du *contexte de la rénovation énergétique de logement*, de *l'état de l'art* sur différentes thématiques utiles à notre cause, de *la méthodologie d'aide à la décision* proposée, et de *sa mise en application à travers une étude de cas*.

¹ Soit environ 589 millions de m² de surface habitable d'après la base de données TABULA.

La première partie commence par présenter quelques définitions utiles au lecteur (Qu'est-ce que la réhabilitation ? Qui en sont les acteurs ? Comment se déroule-t-elle ? Quels sont les enjeux associés à ce type d'opération ? ...), puis sont abordées certaines limites des stratégies actuelles de rénovation. Le périmètre de l'étude est ensuite précisé (rénovations légères et moyennes de maisons individuelles construites entre 1945 et 1974) ainsi que le positionnement de ce travail de recherche. Enfin, trois enjeux majeurs liés au processus d'aide à la prescription de travaux de rénovation sont mis en évidence : la formalisation des préférences de la maîtrise d'ouvrage, l'aide à la constitution de scénarios de rénovation compatibles et efficaces, l'intégration des incertitudes omniprésentes dans les processus d'évaluation des performances et de prise de décision.

La seconde partie, correspondant à la traversée de l'état de l'art, nous permet de faire un tour d'horizon sur les connaissances existantes et travaux réalisés dans différents domaines gravitant autour de la notion d'aide à la prescription de travaux de rénovation pour les logements. Nous commençons par confirmer l'intérêt de la période de construction 1945-1974 – *la plus énergivore et la plus adaptée à la mise en œuvre de méthodes d'aide à la rénovation* – par une étude des différentes typologies de bâtiments du parc français métropolitain. Il s'ensuit une analyse des bases de données et bases de connaissances actuellement disponibles dans le domaine du bâtiment et de la rénovation énergétique. Bien que les informations disponibles soient nombreuses, aucune base n'agrège l'ensemble des connaissances nécessaires à l'alimentation d'un éventuel outil d'aide à la décision multicritère. Il faudra alors s'orienter vers une collecte de l'expertise à la source, auprès des spécialistes de la rénovation. L'état de l'art continue par une revue des différentes méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique de bâtiments. Cet examen met en lumière la faible quantité d'outils innovants spécialisés dans les opérations de rénovation énergétique, surtout dans le domaine de la prescription de solutions. Ensuite la recherche effectuée nous mène à discuter la notion d'*approche globale* de la rénovation et de sa transposition en évaluation multicritère et systémique. Dans ce cadre, la question de la modélisation des performances est débattue, et diverses approches sont confrontées.

La notion d'*aide à la décision* allant de pair avec celle d'*incertitudes*, nous nous intéressons ensuite à la modélisation de l'incertain. Dans cette optique, une revue des méthodes de codification, de propagation et d'analyse des incertitudes est présentée. Cet examen nous montre que la plupart des méthodes actuelles appliquées au domaine du bâtiment sont dédiées à la fiabilisation des codes de calcul numériques. Peu de travaux ciblent sciemment l'aide à la décision et la manipulation de données expertes (souvent qualitatives). Ce constat nous pousse à orienter la traversée de l'état de l'art vers les sciences de l'information et plus précisément les méthodes de modélisation des connaissances expertes. Différentes technologies sont pesées, et le besoin de modéliser une importante quantité de connaissances hétérogènes incertaines en un modèle unique pour optimiser et évaluer des scénarios de réhabilitation nous oriente vers celle des réseaux bayésiens. Enfin, le parcours des travaux actuels sur le domaine de l'aide à la décision pour la rénovation se termine avec un volet traitant de l'optimisation et l'aide à la décision multicritère. Bien que cette sphère regorge de méthodes diverses et variées, l'analyse montre un manque notable, celui de l'aide à la formalisation des préférences, un prérequis essentiel à l'utilisation de ces outils.

Après avoir analysé les avancées actuelles sur chacune des thématiques traitées dans ce chapitre, la problématique scientifique de ce travail de thèse est formulée puis décomposée en trois axes : 1) le besoin de formaliser d'une expertise diffuse et hétérogène dans un modèle unique d'inférence, 2) l'intégration des incertitudes liées à la connaissance de l'existant dans le processus décisionnel, 3) la définition et l'intégration des préférences de la maîtrise d'ouvrage dans le processus d'élaboration des scénarios de rénovation.

La troisième partie, cœur de ce mémoire, propose une méthodologie d'aide à la décision multicritère pour tenter de répondre à la problématique exprimée. Après avoir communiqué un cahier des charges, une présentation générale de la méthodologie est exposée. Cette dernière, d'un point de vue opérationnel, est illustrée sous la forme d'un processus en quatre

phases successives à répéter pour chaque projet de rénovation traité : la définition des enjeux de la réhabilitation, le diagnostic étendu de l'opération, le mécanisme de constitution et d'évaluation des scénarios de rénovation, le pilotage des scénarios via un tableau de bord. D'un point de vue plus technique, l'architecture fonctionnelle est présentée à travers ses 6 sous-modèles interconnectés : (1) décomposition fonctionnelle d'un bâtiment et structuration des alternatives ; (2) capitalisation et formalisation de connaissances métiers ; (3) système d'évaluation des performances ; (4) système d'aide à la formalisation des préférences du décideur ; (5) évaluation multicritère et optimisation sous contraintes des alternatives ; (6) classement multicritère automatisé. Chaque sous-modèle assure une ou plusieurs fonctions qui lui sont propres et qui participent au processus global d'aide à la décision de la méthodologie développée. La suite de cette partie consiste à décrire le contenu de chacun de ces sous-modèle puis d'en dégager, point par point, une analyse critique au regard du cahier des charges initialement fixé. Enfin, la fin de la partie synthétise le travail réalisé autour de cette méthodologie et vérifie dans quelles proportions le cahier des charges a été tenu.

Enfin, la quatrième partie de ce travail s'attache à tester et analyser la méthodologie développée sur un cas d'application réel. Après avoir décrit les intérêts multiples de la mise en œuvre de la méthodologie proposée, le cas d'application retenu est présenté. Chaque phase opérationnelle de la méthodologie est décrite en profondeur, puis les résultats obtenus analysés. Cette mise en application contribue à démontrer la faisabilité et la pertinence de la démarche.

Première Partie : Contexte de la réhabilitation énergétique des logements en France

I. La rénovation énergétique, ses enjeux, ses contraintes	10
I.1 Quelques définitions	10
I.2 Les acteurs de la rénovation	13
I.3 Déclenchement de l'acte de rénovation	16
I.4 Travaux d'amélioration énergétique les plus courants	18
II. La nécessité d'entreprendre une approche globale	18
II.1 Limites de l'approche classique	18
II.2 Critères de décision	19
II.3 La nécessité d'explicitier les préférences du décideur	19
III. Périmètre d'étude et positionnement des travaux de recherche	20
III.1 La maison individuelle, indépendante ou mitoyenne	20
III.2 Les artisans et auto-entrepreneurs	20
III.3 La phase la plus amont des études de conception.....	21
IV. Enjeux soulevés	22

I. La rénovation énergétique, ses enjeux, ses contraintes

I.1 Quelques définitions

I.1.1 Rénovation, un concept flou

Le terme *rénovation* est un concept flou, il peut signifier différentes orientations conceptuelles concernant la mise à niveau d'un bâtiment. La restauration, la reconversion et la réhabilitation sont les principaux axes possibles de l'acte de rénover pour Joffroy dans [8]. Avant de se concentrer sur le troisième terme, il est intéressant de définir brièvement ces notions, qui parfois, se confondent sur un même projet :

- La **restauration** correspond à la réfection à l'identique ou la sauvegarde d'une partie ou de l'ensemble d'un bâtiment en vertu de sa valeur patrimoniale. On associe souvent cette notion à la rénovation d'édifices religieux ou historiques.
- La **reconversion** signifie le changement de fonction d'un bâtiment pour en éviter la désaffectation. Il donne souvent lieu à des travaux lourds pour atteindre les standards de sécurité et la conformité réglementaire. Par exemple, d'anciennes écoles primaires reconverties en mairies dans les milieux ruraux.
- La **réhabilitation** vise à améliorer un édifice en conservant sa fonction principale. Souvent, elle répond à des objectifs de mise en conformité avec les réglementations en vigueur (réglementation anti-incendie, thermique, acoustique...).

La réhabilitation, est une notion étendue touchant à des thématiques variées (cadre juridique, cadre patrimonial, cadre énergétique) et ne se limitant pas à la sphère du bâtiment. Cependant, dans cette étude, ce terme ciblera uniquement les actions de remise en état, de mise à niveau selon les exigences actuelles d'un bâtiment.

L'acte de rénover peut également se traduire par différents niveaux d'intensité de modification d'un bâti existant, sur différentes échelles de temps. Orselli [9] propose une échelle qualitative décrivant quatre degrés croissant d'intervention sur un bâtiment :



Travaux d'entretien : notions difficiles à définir, ils s'inscrivent dans la maintenance annuelle d'un patrimoine (entretien d'un réseau hydraulique, peinture, etc.). Ils se distinguent parfois mal des travaux de rénovation diffuse.

Rénovation diffuse : constituée de toutes les interventions partielles étalées dans le temps : changement de chaudière, changement de fenêtres ou d'huissières, interventions sur les toitures, réfection de façade, etc.

Rénovation (globale) : terme pouvant consister à la remise en état d'un logement individuel ou situé dans un immeuble collectif, sans intervention majeure sur le gros œuvre.

Réhabilitation : terme supposant des travaux extrêmement lourds, notamment de gros œuvre, sur l'ensemble d'un immeuble, généralement collectif, et dont l'application au secteur pavillonnaire est peu pertinente.

La maintenance est pourtant une opération complexe. Elle peut être courante ou programmée pour Bonetto et Sauce dans [10]. Elle peut correspondre à des opérations correctives en cas de dysfonctionnement d'un système, à des opérations préventives pour que la fonction initiale du bâtiment réponde continuellement aux besoins des usagers, ou d'améliorations incrémentales du bâtiment et des systèmes qui le composent. Elle contribue autant à la conservation qu'à la mise à niveau des exigences réglementaires du patrimoine. En ce sens, ces actes de maintenance ou de gros entretien sont intégrés à la notion de rénovation d'un ouvrage.

La rénovation ou réhabilitation au sens large intervient lorsque la qualité du bâtiment dans son état actuel ne permet plus de satisfaire correctement sa fonction principale ou si l'on opte pour une amélioration sensible des performances de ce dernier. Elle est souvent associée à un changement de propriétaire, à la mise à niveau avec les réglementations en vigueur, à la maintenance pluriannuelle d'un patrimoine immobilier² et à un besoin significatif d'amélioration du confort des occupants.

Dans la Figure 1, le mécanisme de conception d'une opération de réhabilitation est replacé dans le cycle de vie d'un bâtiment vu par la maîtrise d'ouvrage pour Delaveye et Haxaire dans [11]. L'action de réhabiliter change les phases d'exploitation et de fin de vie initiale du bâti ; c'est un cercle vertueux, pouvant être répété autant de fois que nécessaire, permettant de prolonger la vie d'un bâtiment. Toujours dans la Figure 1, nous voyons que le souhait de réhabiliter ne se concrétise pas forcément par la décision effective de réhabiliter. En effet, des études préalables (définition du besoin, audits techniques, études d'opportunité et de faisabilité) permettent de vérifier la pertinence et la faisabilité d'entreprendre une opération d'amélioration de l'existant. À l'issue de ces études, trois choix s'offrent à la maîtrise d'ouvrage : réhabiliter (avec son nouveau cycle de conception, réalisation, exploitation...), déconstruire le bâtiment pour en construire un nouveau (fin de vie à court terme), laisser vivre le bâtiment en l'état jusqu'à sa fin de vie programmée (fin de vie à moyen ou long terme).

² Gros travaux d'entretien et de maintenance.

Dans la suite de cette étude, les termes « rénovation » et « réhabilitation » seront utilisés indifféremment pour décrire l'action de mettre à niveau un bâtiment existant pour qu'il puisse répondre aux exigences des réglementations en vigueur et aux souhaits de la maîtrise d'ouvrage.

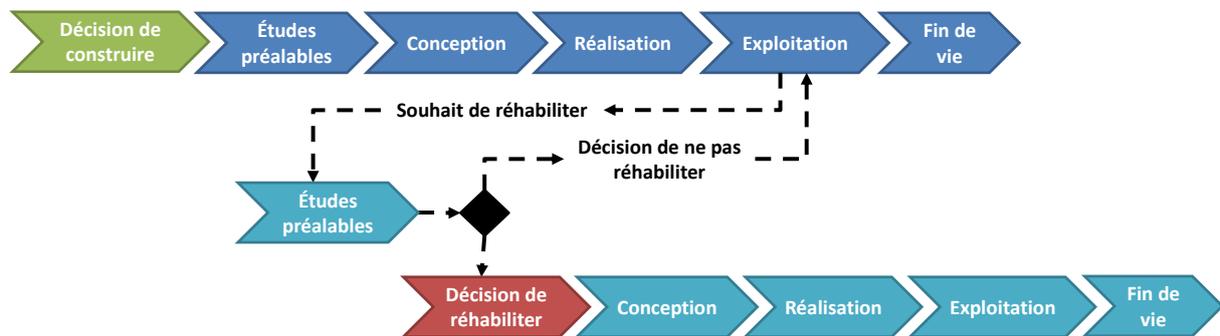


Figure 1 – Place de la réhabilitation dans le cycle de vie d'un bâtiment

1.1.2 Rénovation énergétique

La rénovation énergétique (ou réhabilitation énergétique) est définie comme la mise en œuvre de solutions techniques contribuant à l'amélioration globale de la performance énergétique d'un ouvrage par rapport à sa performance initiale. Cette performance traduit souvent la consommation ou la facture énergétique annuelle prenant en compte différents postes comme le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire ou encore l'éclairage artificiel. De manière générale, le cheminement idéal de rénovation énergétique se fait en quatre étapes successives :

- (1) la réduction des besoins énergétiques par l'isolation de l'enveloppe chauffée et la gestion du renouvellement d'air,
- (2) le remplacement (et le redimensionnement) des installations de production d'énergie peu performantes,
- (3) le contrôle ou la régulation fine des consommations énergétiques (programmation, régulation terminale...),
- (4) l'intégration des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydrolienne...).

La Figure 2, présentant le parcours idéalisé de la rénovation énergétique d'après Perera [12], illustre bien ce cheminement qui permet de maximiser les gains énergétique d'un projet. Il faut cependant garder à l'esprit que ce phasage idéal n'est malheureusement que peu respecté. En effet il n'est pas rare de voir commencer une opération par un remplacement des installations de production d'énergie, qui permet à court et moyen terme d'obtenir un meilleur temps de retour sur investissement que l'isolation du bâti qui reste, quant à lui, un poste onéreux, chronophage et nécessitant des compétences techniques élevées.

Il faut également mentionner le fait que l'intégration des renouvelables (solaire, éolienne, hydrolienne...) peut se faire simultanément lors des deux premières étapes de ce cycle vertueux. Par exemple, l'installation d'un puits canadien (appelé également puits provençal) et autres systèmes de ventilation mécanique double-flux permettent de réduire les besoins en chaud et froid, et les systèmes solaires ou thermodynamiques sur sources renouvelables (géothermie) permettent de produire l'énergie restante, nécessaire à la couverture des besoins estimés.

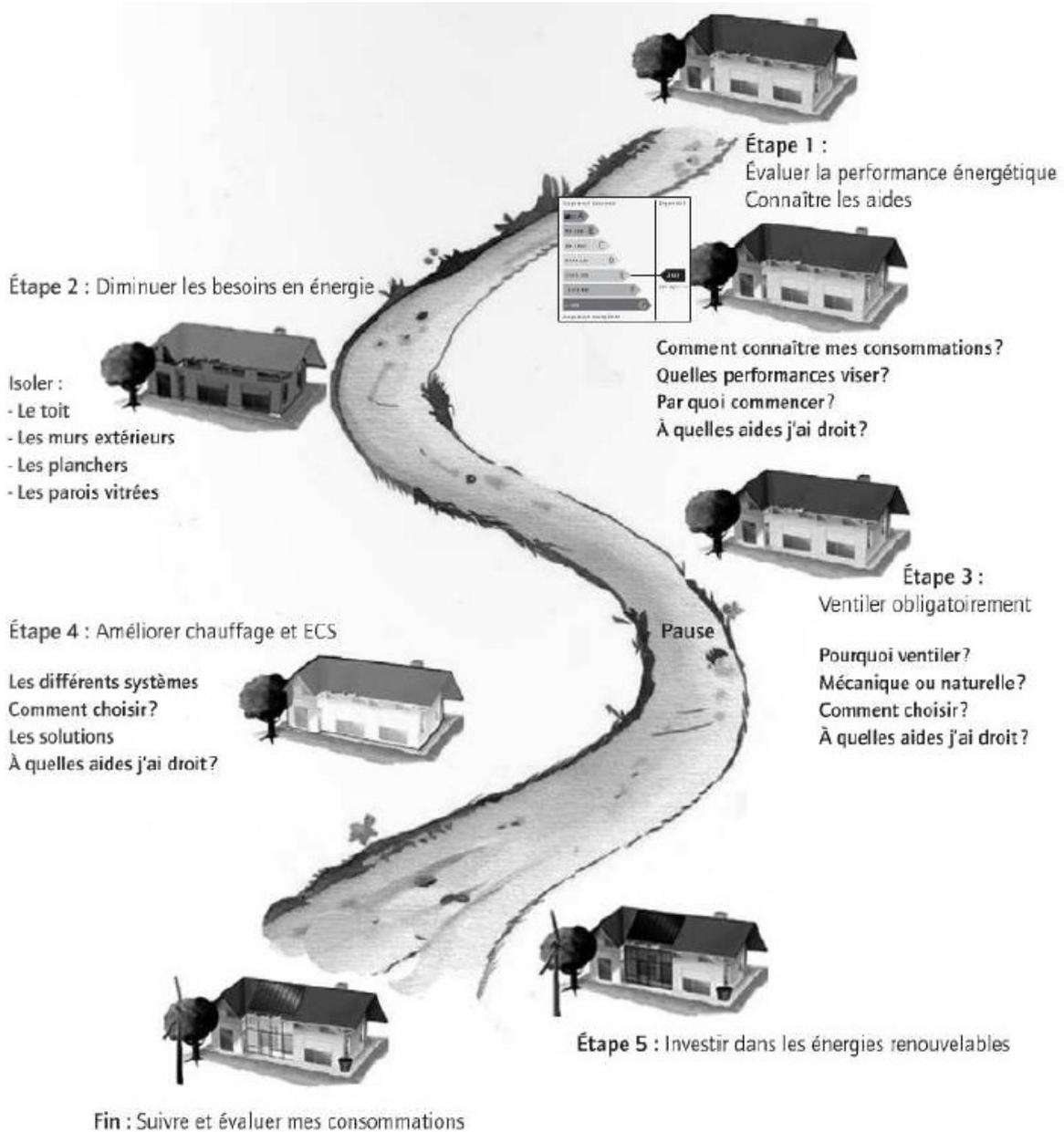


Figure 2 – Parcours vertueux de la rénovation énergétique d'après Perera [12]

I.2 Les acteurs de la rénovation

I.2.1 Le cadre général

Le processus de rénovation d'un bâtiment, comme pour le neuf, rassemble à minima et de manière théorique, trois acteurs aux rôles et responsabilités distincts qui sont : la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, et les entreprises. La loi MOP, régissant les droits et devoirs de la maîtrise d'ouvrage publique et de ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée pour des opérations de construction et de réhabilitation, définit chacun de ces rôles et les responsabilités qui leurs sont associées [11, 13, 14]. D'autres acteurs peuvent intervenir sur les grosses opérations pour remplir des rôles spécifiques. Voici une présentation synthétique de ces rôles et de leurs interactions.

- **Maîtrise d'Ouvrage (MOA)** : personne pour laquelle l'ouvrage est construit, elle est le responsable principal de l'ouvrage. Elle fixe le programme et l'enveloppe budgétaire du projet, sélectionne une maîtrise d'œuvre et contracte avec les entreprises. La maîtrise d'ouvrage peut être soit directe, soit mandatée : on parle alors de maîtrise d'ouvrage déléguée (MOD). Cette personne, physique ou morale, peut désigner :
 - le propriétaire de l'ouvrage ;
 - le gestionnaire de patrimoine ;
 - le syndic pour les copropriétés.
- **Maître d'Œuvre (MOE)** : personne devant apporter une réponse architecturale, technique et économique au programme. Il dirige et contrôle l'exécution des travaux. Ce rôle peut être attribué à différents corps de métiers :
 - Architectes ;
 - Bureaux d'Études Techniques (BET) & Ingénierie-Conseil ;
 - Entreprises générales ;
 - Économistes.
- **Entreprises** : les différents corps d'état réalisant l'ouvrage en suivant les instructions du maître d'œuvre. Elles sont, selon les missions et lots contractés :
 - des entreprises générales ;
 - des entrepreneurs / artisans / éco-artisans.

Mais aussi, lorsque cela devient nécessaire ou obligatoire selon la loi, d'autres acteurs jouent un rôle déterminant dans la conception ou/et la réalisation de l'ouvrage.

- **Conducteur d'Opération (COp) / Assistant à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO)** : Assistant ou mandataire de la maîtrise d'ouvrage sur différentes missions : planification générale, définition des acteurs, rédaction des pré-programme et programme, pilotage de la maîtrise d'œuvre. Pour le pilotage de la maîtrise d'œuvre nous parlerons plutôt de « conducteur d'opération », pour les autres types de mission l'appellation « assistant à la maîtrise d'ouvrage » est la plus courante.
- **Coordonnateur SPS (Sécurité et Protection de la Santé)** : Contrôle et veille à l'application des principes de prévention et des règles de sécurité lors de la réalisation de l'ouvrage. *Cette profession est réglementée.*
- **Contrôleur Technique (CT)** : personne chargée d'instruire les différents dossiers en phase étude et de réaliser des contrôles réglementaires au cours de la construction. Lorsque sa présence n'est pas obligatoire, elle est souvent mandatée par les maîtres d'ouvrage souhaitant s'assurer d'un contrôle supplémentaire permettant de limiter les risques de sinistres ou à la demande des assureurs. Elle officie dans un Bureau de Contrôle (BC) agréé par l'État. Son intervention est obligatoire pour certains ouvrages, dont :
 - les Établissements Recevant du Public (ERP) de 1^{ère} à 4^{ième} catégorie ;
 - les Immeubles à Grande Hauteur (IGH).
- **Programmiste** : La maîtrise d'ouvrage peut déléguer l'élaboration du programme et la définition de l'enveloppe prévisionnelle à un prestataire spécialisé, appelé « programmiste ».
- **Coordonnateur OPC (Ordonnancement, Coordination et Pilotage du Chantier)** : ce coordonnateur veille principalement à l'analyse des tâches élémentaires portant sur les études d'exécution et les travaux, de déterminer leurs enchaînements ainsi que leur

chemin critique par des documents graphiques (diagrammes de Gantt, Pert). Ces missions sont normalement rattachées à la fonction de la maîtrise d'œuvre.

Voire, les futurs utilisateurs et gestionnaires de l'ouvrage construit ou réhabilité :

- **Utilisateurs du patrimoine** : Parfois distincts de la maîtrise d'ouvrage, les utilisateurs finaux s'approprient au quotidien le bâti neuf ou rénové. Afin de bien comprendre leurs besoins, de nombreux échanges sont nécessaires avec la maîtrise d'ouvrage pour trouver le meilleur compromis coûts / qualité d'usage et de vie lors des études préalables et de conception d'un projet.
- **Gestionnaires du patrimoine** : leurs rôles consistent à prévoir, adapter et fournir les moyens immobiliers dont ont besoin des activités, les mettre à disposition dans les meilleures conditions de sécurité, d'usage, de coût global et de confort. Ils contrôlent et maîtrisent les risques sur les personnes, les biens, financiers et technologiques, pour le patrimoine immobilier dont ils ont la charge [10].

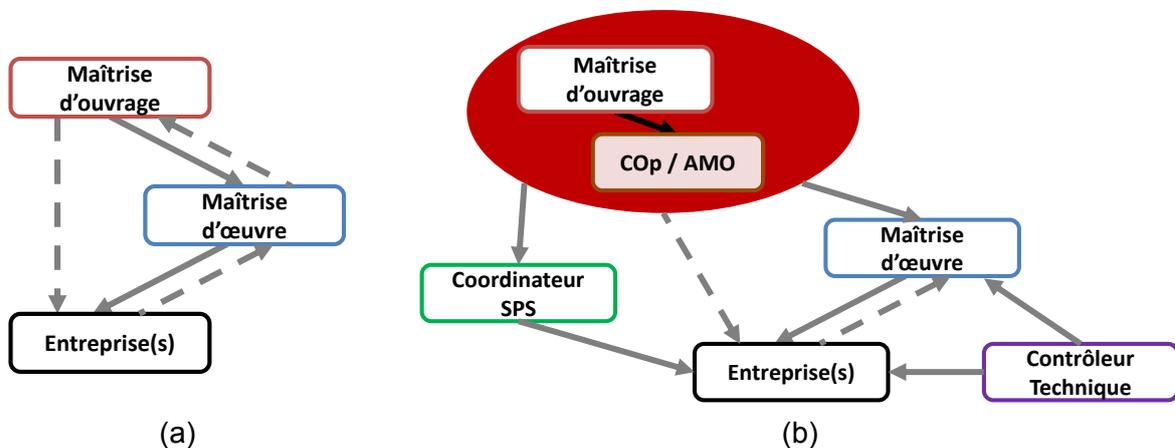


Figure 3 – Organisation des acteurs principaux d'un projet de construction (approche de principe à gauche (a) et plus complète à droite (b) inspirée de [14])

La Figure 3 propose deux visions des principales relations et rôles endossés par les acteurs d'un projet de construction. Ces mêmes schémas se retrouvent pour les grandes opérations de rénovation (logements collectifs, bâtiments publics et tertiaires).

1.2.2 Le cas du logement individuel et des petits chantiers

Les opérations de rénovation, énergétique ou autres, pour les petits chantiers (maisons individuelles essentiellement), ne peuvent être traitées par des approches structurées telles que la loi MOP [13]. La maîtrise d'ouvrage, non-sachante et disposant d'une enveloppe financière limitée, préférera généralement contourner la présence d'un éventuel maître d'œuvre (le plus souvent un architecte ou un BET pour ce type de chantier) pour démarcher directement une ou plusieurs entreprises (ou artisans) afin d'obtenir des devis chiffrant différentes propositions techniques répondant aux besoins préalablement exprimés (de manière plus ou moins floue). Une fois un devis accepté, l'entreprise sélectionnée effectuera les opérations de conception-réalisation.

La Figure 4 explicite le rôle des principaux acteurs intervenant dans la conception et la mise en œuvre de travaux de rénovation pour ce type de « petits chantiers ». L'entreprise, souvent qualifiée pour un, voire deux corps de métiers (plaquistes, maçons...), possède rarement les compétences nécessaires à la conception d'une stratégie de rénovation globale, intégrant les différents aspects de la performance (énergie, acoustique, ergonomie,

éclairage...). Ce type de fonctionnement qui shunte l'accompagnement d'un « expert global » peut, parfois, donner lieu malheureusement à des insatisfactions de la maîtrise d'ouvrage, à posteriori, par l'apparition de contre-performances ou de nuisances non anticipées par méconnaissance de l'entreprise sur certaines interactions bâti-solutions ou solutions-solutions. En outre, peu d'outils pédagogiques simples privilégiant l'approche globale sont actuellement disponibles sur le marché pour les assister.

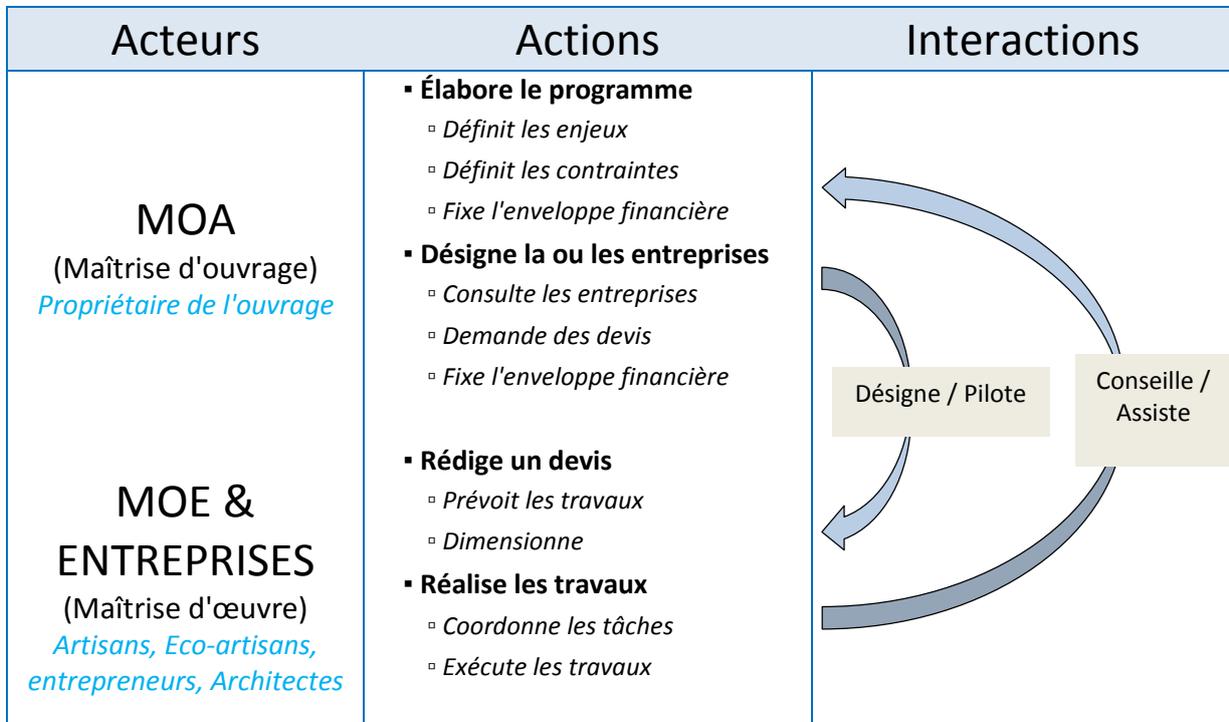


Figure 4 – Cadre classique d'une opération de rénovation pour des petits privés

I.3 Déclenchement de l'acte de rénovation

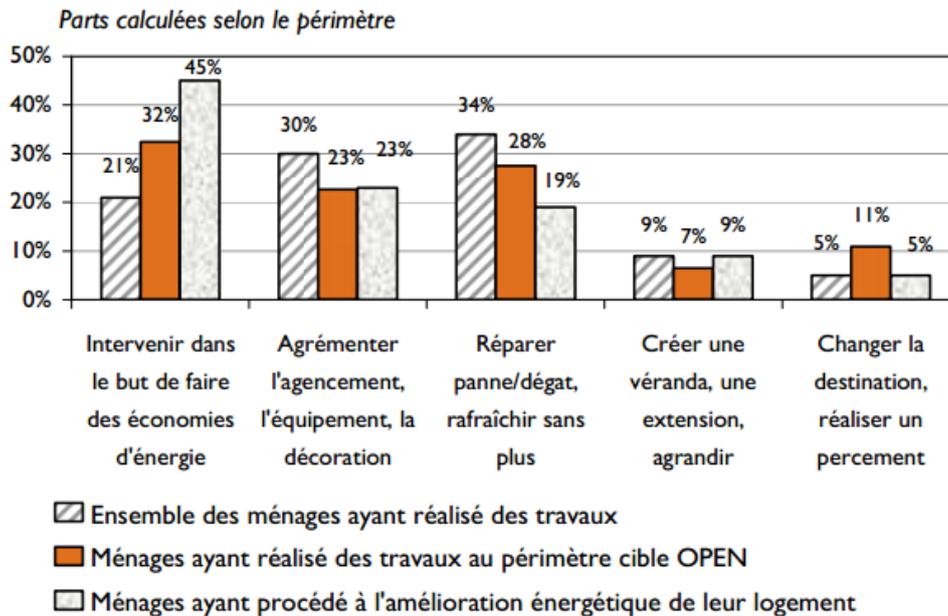
I.3.1 La conformité réglementaire, la continuité d'une activité

Les réglementations dans le secteur du bâtiment sont de plus en plus nombreuses, complexes, et exigent des niveaux de sécurité et de performance de plus en plus élevés. Pour les bâtiments autres que les logements, les éléments déclencheurs de l'acte de rénovation sont rarement des préoccupations énergétiques. La décision de rénover se limite généralement au respect des nouveaux textes réglementaires en vigueur (l'accessibilité, l'énergie, la santé, l'acoustique, le parasismique...) ainsi qu'à l'assurance que l'activité pour laquelle le bâtiment est occupé puisse durer dans le temps pour Kolokotsa dans [15]. La continuité de service et l'anticipation des nouvelles réglementations est une des fonctions premières des gestionnaires de patrimoines pour Bonetto et Sauce [10].

I.3.2 Des enjeux variés et hétérogènes : le cas spécifique des logements

Dans le cas des logements (maisons et appartements confondus), les éléments déclencheurs de l'acte de rénover sont souvent multiples et varient énormément en fonction des préoccupations des propriétaires. La motivation purement énergétique n'est pas majoritaire, mais de nombreux facteurs déclencheurs – ou raisons motrices – débouchant sur la décision d'entreprendre des travaux de rénovation ont une incidence plus ou moins directe sur le comportement énergétique du bâti. La recherche du confort, le remplacement d'équipements défectueux, le besoin d'agrandissement de la surface habitable sont aussi bien des motivations majeures que des raisons plus pécuniaires comme la réduction de la facture énergétique ou la valorisation patrimoniale [16-20].

La Figure 5 montre qu'en 2007 en France, sur une base de 9 millions de logements ayant entrepris des travaux d'entretien et de rénovation, la raison motrice « Intervention dans le but de faire des économies d'énergie » ne couvre que 1/5 des opérations. Ce qui signifie que pour une part prépondérante des travaux pouvant entraîner une amélioration énergétique de ce segment du parc, l'objectif prioritaire n'a pas été la réalisation des économies d'énergie. Cela montre, qu'en l'état actuel, il faut s'intéresser aux opportunités de couplage d'actions sur le bâti (agrandissement, entretien, modernisation) avec les solutions d'amélioration énergétique pour convaincre la maîtrise d'ouvrage d'entreprendre des travaux d'amélioration de la performance énergétique.



Source : BISS – résultats OPEN, campagne 2007

Figure 5 – Motivations principales déclenchant l'acte de rénovation chez les ménages (campagne 2007 de l'OPEN)

De par l'analyse des études citées précédemment, les motivations d'intervention sur le bâti ayant une influence plus ou moins marquée sur l'aspect « performance énergétique » peuvent être classées en familles d'objectifs (Tableau 1) pouvant s'additionner lorsque les enjeux sont multiples.

La définition précise des attentes de la maîtrise d'ouvrage est une étape-clé dans la conception d'une opération de rénovation : c'est un outil de conviction. Cette étape peut-être encadrée en questionnant la maîtrise d'ouvrage pour que cette dernière exprime le plus clairement possible ses attentes, et les axes à prioriser si plusieurs objectifs sont identifiés. Cette explicitation de ses préférences permet de répondre à un besoin parfois non ou mal formulé, de se poser les bonnes questions lors du diagnostic de l'existant, et par conséquent de mieux définir les actions de rénovation à mener. Pour résumer, si les objectifs sont connus et compris, la satisfaction de la maîtrise d'ouvrage ne pourra qu'être meilleure.

Principales orientations des objectifs de réhabilitation en milieu résidentiel	
1	Résoudre des pathologies
2	Remplacement d'un équipement ou composant d'enveloppe défectueux ou peu efficace
3	Amélioration du confort (confort, acoustique, visuel...)
4	Réduction des charges d'exploitation, notamment liées aux postes énergétiques
5	Augmentation de la surface habitable (agrandissement/surélévation)
6	Modernisation du bâti (travaux de maintenance important / valorisation patrimoniale / changement de propriétaire)
7	Responsabilité écologique
8	Mise en conformité avec la réglementation (pour des raisons d'assurance, la mise en location...)

Tableau 1 – Principales orientations des objectifs de réhabilitation en milieu résidentiel

I.4 Travaux d'amélioration énergétique les plus courants

Les opérations de réhabilitation peuvent être représentées comme une combinaison d'actions élémentaires à mettre en œuvre. Ces actions ciblent l'enveloppe thermique et les installations énergétiques. La littérature propose de nombreuses classifications des actions améliorant la performance énergétique des bâtiments [15, 18, 21, 22]. En adoptant une approche systémique, l'ensemble (non exhaustif) des actions permettant d'améliorer le comportement énergétique d'un ouvrage, couvre :

- l'isolation thermique de l'enveloppe : façades, toitures, planchers bas ;
- les travaux d'amélioration de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe ;
- le remplacement des ouvrants ;
- le remplacement et la gestion des protections solaires ;
- le remplacement du système de ventilation ;
- le remplacement du système de chauffage et de refroidissement ;
- le remplacement du système de production d'eau chaude sanitaire ;
- la gestion de l'éclairage artificiel ;
- la production d'énergie renouvelable.

En opposition aux bâtiments neufs, certains degrés de liberté sont limités voire inexistant, comme la modification de la géométrie et l'orientation du bâti, ou le comportement inertiel de l'enveloppe chauffée.

II. La nécessité d'entreprendre une approche globale

Le besoin d'améliorer la performance énergétique des bâtiments en France est un constat. Avec l'évolution croissante et certaine du prix de l'énergie, il faut convaincre les maîtres d'ouvrage des différents bénéfices, au-delà des aspects réglementaires ou énergétiques, d'engager des travaux d'économie d'énergie. Un levier peut être l'approche globale, sous la forme d'une analyse systémique et multicritère.

II.1 Limites de l'approche classique visant à maîtriser un budget tout en respectant les réglementations

Un premier constat est que les réglementations dans le secteur du bâtiment sont de plus en plus nombreuses et contraignantes. L'aspect « énergétique » n'est qu'un volet parmi d'autres (normes électriques, réglementations sanitaires, acoustiques, incendies, parasismiques, accessibilité...). Nous retrouvons donc bien ici la nécessité d'une d'évaluation multicritère

des *bouquets de travaux*³ d'amélioration énergétique pouvant être proposée pour une opération de rénovation. Néanmoins le respect des réglementations est un minimum, mais il n'est pas toujours synonyme de bâtiment performant. Les normes et textes réglementaires se contentent bien souvent de fixer des valeurs garde-fous à respecter sur de nombreux points de contrôle pour répondre à la législation. Ainsi, un bâtiment peut être, au final, jugé comme « conforme » ou « non conforme ». Il n'y a pas d'idée d'échelles vertueuses de la performance, ni d'intégration des préférences de la maîtrise d'ouvrage.

Un second constat est l'absence de communication entre les réglementations existantes. Parfois les réglementations vont dans des sens opposés. Par exemple, l'exigence de performance énergétique prône le respect de températures de consignes de chauffage, souvent considérées comme inférieures à la zone de confort des occupants, et la réduction des déperditions thermiques (par transfert thermique et ventilation). Dans un même temps, la réglementation sanitaire impose des débits minimaux de renouvellement d'air contrebalançant l'idée de réduction des besoins, et cela dans l'intérêt de la santé des occupants et de la pérennité de l'enveloppe chauffée vis-à-vis de son comportement à la vapeur d'eau. On peut citer également les exigences relatives aux traitements des ponts thermiques qui contredisent parfois celles relatives aux règles parasismiques. Ces exemples montrent les antagonismes existants entre certaines réglementations ; mais aussi la nécessité d'étudier chaque aspect de la performance pour identifier et quantifier les impacts collatéraux associés à une décision.

Enfin, la nécessité de maîtriser le budget alloué à une opération force au compromis. En fonction de l'enveloppe financière disponible, certains choix peuvent être reportés à une date ultérieure ou certaines actions d'amélioration privilégiées pour profiter de subventions ou autres types d'aides (crédits d'impôts, TVA préférentiels, CEE...).

II.2 Critères de décision

Ils doivent permettre de confronter plusieurs solutions techniques et architecturales au regard d'aspects informatifs ou performantiels pouvant infléchir une décision. Ces critères de décision peuvent être construits à partir de sorties d'outils de calcul (par exemple des outils de simulation de performance énergétique), de calculs comptables (temps de retour sur investissement, empreinte environnementale) ou encore issus du retour d'expérience (grille d'évaluation experte, enquête sociale, etc.).

Trois typologies de critères entrent en jeu dans la sphère du bâtiment :

- *les critères réglementaires* : valeurs-seuils, souvent minimales à respecter par tous les moyens (ici la notion de choix ou préférence est absente, on est soit bon soit mauvais) sur des grandeurs physiques ou calculées ;
- *les critères issus de contraintes* : tel que le coût d'investissement, les risques potentiellement encourus ;
- *les critères de performance* : aspects que l'on cherche à maximiser pour remplir des objectifs d'amélioration. (ici la notion de préférence prend tout son sens).

II.3 La nécessité d'explicitier les préférences du décideur

Deux langages sont à rapprocher. D'une part la maîtrise d'ouvrage, qui n'est pas un sachant, exprime son besoin sous forme d'enjeux plus ou moins opérationnels (réduire la facture énergétique, remplacer une génération de chauffage défectueuse, etc.) ; d'autre part la maîtrise d'œuvre fonctionne avec des critères de performance souvent chiffrés (atteinte d'un label énergétique pour débloquer des aides financières, respects des conformités

³ Bouquets de travaux : combinaison de plusieurs actions d'amélioration

réglementaires, choix de solutions techniques dotées de caractéristiques performantielles chiffrées, etc.). Un des problèmes majeurs reste donc la difficulté des deux types d'acteurs à se comprendre et à partager un objectif commun. Par contre, cet effort de rapprochement doit être réalisé par la maîtrise d'œuvre qui est au service de la maîtrise d'ouvrage, et par conséquent, doit répondre aux attentes de cette dernière.

III. Périmètre d'étude et positionnement des travaux de recherche

La rénovation énergétique de bâtiments est un vaste sujet. Délimiter un périmètre d'étude précis permettra de fixer le cadre de l'analyse à effectuer pour la future traversée de l'état de l'art et le positionnement de la problématique.

III.1 La maison individuelle, indépendante ou mitoyenne

L'étude ciblée est la période 1945-1974. Ces dates charnières correspondent à deux temps forts pour le secteur du bâtiment en France. Elle débute en 1945, correspondant à la fin de la seconde Guerre Mondiale, époque du Baby-Boom, où il faut construire et reconstruire rapidement de nombreux logements, et prend fin en 1974, premier choc pétrolier qui se traduit par la fin de « l'énergie abondante et peu chère » et l'instauration de la première Réglementation Thermique.

En terme de cible, cette thèse se focalise sur le résidentiel et plus particulièrement les maisons individuelles pour plusieurs raisons qui seront précisées dans les différentes parties de cette ouvrage :

- les 3.5 millions (soit environ 300 millions de m² de surface habitable [23]) de maisons individuelles construites sur la période 1945-1974 consomment en moyenne 350 kWh_{EP}.m²_{SHON} par an (soit 7 fois plus que les exigences actuelles pour les bâtiments neufs) et représentent donc le gisement énergétique au plus fort potentiel ;
- la maîtrise d'ouvrage n'a souvent pas les moyens de s'offrir une étude de conception de qualité et concentre les efforts financiers sur les travaux en eux-mêmes ;
- Les bureaux d'études techniques, les plus à même de proposer et chiffrer des scénarios d'amélioration énergétiques pertinents et compatibles avec les spécificités de l'existant, délaissent souvent le secteur de la maison individuelle car il est peu rentable sur le plan économique.

Il est également important de préciser que nous ne nous intéressons qu'aux rénovations légères, ces dernières ne touchent généralement pas à la partie structurelle des bâtiments.

III.2 Les artisans et auto-entrepreneurs

La méthodologie déployée vise à assister tous les acteurs professionnels de la construction pouvant jouer le rôle « d'améliorateur » du bâti existant. Par « améliorateur » nous entendons les personnes soucieuses d'entreprendre une réhabilitation globale, d'intégrer les préoccupations énergétiques, environnementales et sociétales au cœur du processus de conception d'une opération de rénovation. Les métiers qui, le plus vraisemblablement, peuvent jouer ce rôle d'améliorateur dans le secteur du logement individuel sont : les entrepreneurs, les artisans, les architectes (voire les assistants à maîtrise d'ouvrage, et les bureaux d'études techniques).

III.3 La phase la plus amont des études de conception

En faisant l'analogie au déroulement chronologique des grandes phases de conduite de projet, pouvant s'appliquer aussi bien au domaine de la construction qu'aux sciences informatiques, ces travaux de thèse se concentrent sur la phase la plus amont d'un projet de rénovation énergétique de bâtiment. En se basant sur le découpage en 17 phases, comme proposé par Debaveye et Haxaire dans [11] et repris dans le Tableau 2, cette phase correspond aux « Études préalables ».

Tableau 2 – Principales étapes chronologiques d'un projet de construction

N°	Étapes	Phases
1	Études préalables et programmation	Études préalables [DIAG] ← La cible de cette étude
2		Programme [PRO]
3		Désignation de la maîtrise d'œuvre
4		Marchés d'études
5	Études et projets	Esquisse [ESQ]
6		Avant-projet [APS, APD]
7		Permis de construire et de démolir
8		Projet [PRO]
9	Consultation des entreprises et marchés	Consultation des entreprises [DCE]
10		Offres et marchés
11	Préparation de chantier	Préparation du chantier
12		Planification du chantier
13	Conduite de chantier et réception	Gestion technique et administrative du chantier
14		Gestion financière du chantier
15		Réception des travaux
16	Exploitation de l'ouvrage	Achèvement du marché
17		Vie de l'ouvrage

Dans cette dernière, trois sous-phases essentielles sont à suivre : la qualification du besoin, les études d'opportunité, les études de faisabilité.

1. Qualification du besoin : cette sous-phase, essentielle, consiste à clarifier les attentes de la maîtrise d'ouvrage, répondre à la question suivante : *Quelle sont les finalités de l'opération de rénovation à venir ?* Ici les enjeux d'un projet doivent être définis de manière claire et concise. L'utilisation d'objectifs quantifiés est courante pour qualifier le besoin (performances attendues, délais, budget..). La réponse à la question sur l'évolution dans le temps des besoins exprimés doit être également débattue.
2. Études d'opportunité : généralement déléguées à un cabinet d'AMO pour les grandes opérations, les études d'opportunités consistent à :
 - Vérifier les caractéristiques du territoire concerné, l'existence de projets concurrents ou complémentaires ;
 - capitaliser les informations architecturales, techniques et sociales caractérisant le bâti existant (à travers la réalisation de diagnostics⁴) ;

⁴ Parmi les diagnostics à réaliser pour une opération de rénovation, de nombreux diagnostics immobiliers sont obligatoires : diagnostic « loi Carrez » et « loi Boutin », diagnostic de performance énergétique (DPE), diagnostic d'exposition aux risques naturels et

- proposer quelques projets d'améliorations a priori viables (à travers des audits énergétiques). Ces projets sont généralement évalués une première fois de manière globale et peu détaillée, plutôt qualitative, en ce qui concerne leur performance énergétique, le respect des réglementations et leur coût financier.

Ces études essaient de mettre en lumière les opportunités et contraintes associées aux projets afin de bien identifier les potentialités d'une opération. Pour les petites opérations de rénovation principalement dédiée à l'habitat individuel privé, ces études, trop souvent minimisées, prennent la forme d'un diagnostic rapide, parfois non formalisé, associé à un premier devis chiffrant le type de travaux envisagés d'après une étude récente de l'association de consommateurs *UFC-Que choisir* [24]. La fin de cette étape consiste à décider s'il y a vraiment opportunité à continuer le projet.

3. Études de faisabilité : lorsque la maîtrise d'ouvrage a décidé de poursuivre, des études plus approfondies appelées « études de faisabilités » sont menées. Elles visent à répondre aux questions suivantes : *Est-ce que le projet est réellement réalisable au regard des contraintes mises en évidence par l'étude ? Doit-on se lancer dans le projet en l'état ? Le risque financier est-il maîtrisable ? Le résultat est-il certain ?*

Dans le cadre de ces travaux de recherche, l'idée principale à retenir est de travailler sur la formalisation de la commande de la maîtrise d'ouvrage, bien comprendre ses attentes, pour ensuite donner un cadre à l'étude du champ des possibles permettant de répondre au besoin exprimé. En ce sens, la qualification du besoin et les études d'opportunité sont le cœur de notre étude.

IV. Enjeux soulevés

Trois enjeux majeurs sont soulevés dans le contexte de la rénovation énergétique de bâtiments résidentiels.

Le premier, certainement le plus important, consiste à pallier le manque actuel de méthodes pour aider à la formalisation des attentes de la maîtrise d'ouvrage. Pourquoi souhaite-t-elle rénover son patrimoine ? Quels sont les obstacles au lancement de l'opération ? Souhaite-t-elle l'atteinte de performances chiffrées, si oui comment sont intégrées ses préférences ? Sans réponse à ces questions, il est difficile de proposer des solutions architecturales et techniques pertinentes. Malheureusement ce processus de formalisation qui devrait être progressif et itératif est trop souvent laissé de côté par manque de temps, de méthodes et d'expertise du professionnel sollicité, ou simplement le refus de financer ces études qui peuvent ne pas aboutir.

Le second est de pallier le manque actuel d'outils d'aide à la prescription de travaux de rénovation à dominante énergétique intégrant en leur sein une évaluation multicritère des scénarios proposés et une formalisation de certains retours d'expérience (contraintes majeures de mise en œuvre, couplages avec des travaux de maintenance programmée) permettant d'orienter le choix des travaux en fonction de la connaissance sur l'existant.

technologiques (ERNT), diagnostic relatif à l'assainissement non collectif, diagnostics relatifs à la présence d'amiante (DTA) de plomb (CREP) de radon et de termites, diagnostics des installations de gaz et installations électriques.

Enfin, le troisième prône l'intégration des différents types d'incertitudes omniprésents dans le processus de rénovation. Que ce soit dans la caractérisation de l'existant ou dans le mécanisme de prise de décision, les inconnues et imprécisions sont nombreuses et peuvent impacter considérablement un choix.

- Plus un bâtiment est ancien, moins les données disponibles sont nombreuses. Les outils actuels d'aide à la rénovation énergétique ne permettent pas d'intégrer les connaissances partielles ou l'absence totale de connaissance. Ils utilisent des valeurs par défaut pénalisantes – au niveau performantiel – pour pallier les données non disponibles ; ils éprouvent des difficultés à modéliser les systèmes énergétiques complexes ou innovants.
- L'élaboration de scénarios d'amélioration énergétique de l'existant, qui incombe généralement aux professionnels en charge de la phase de conception d'une opération, repose essentiellement sur les retours d'expériences passées et, si elles ont eues lieu, des résultats de simulations analytiques ou numériques (économiques, énergétiques...). Ce cheminement est empreint de nombreuses incertitudes : *a-t-on pensé à explorer toutes les pistes techniques et architecturales possibles ? les solutions identifiées sont-elles compatibles entre-elles et avec l'existant ? les performances supposées sont-elles réellement accessibles ?*

Dans le cas particulier des logements individuels, une difficulté supplémentaire apparaît. Le professionnel démarché pour améliorer la performance énergétique du bien est souvent un artisan ou un entrepreneur, qui ne maîtrise pas l'ensemble des aspects performantiels de la rénovation (interaction entre l'énergie et les autres thématiques comme l'acoustique, la santé, la qualité d'usage...). Peu d'outils lui permettent d'évaluer de manière rapide les impacts multicritères d'une stratégie de rénovation et d'identifier de possibles leviers ou freins qui pourraient orienter un projet.

Deuxième Partie : Traversée de l'état de l'art

I. Études typologiques du parc de logements en France	26
I.1 Gisement énergétique du parc résidentiel Français	26
I.2 La période 1945-1974, véritable enjeu de la rénovation énergétique	28
II. Bases de données et de connaissances existantes	33
II.1 Bases de données dédiées à la consommation énergétique des bâtiments.....	33
II.2 Bases de données d'analyse de cycle de vie environnemental.....	34
II.3 Bases de données d'évaluation des coûts	35
II.4 Base de connaissance sur les logements de la période 1945-1974.....	36
III. Analyse des méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique	38
III.1 Processus classique de conception de stratégies de rénovation.....	38
III.2 Méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique.....	41
III.3 Outils spécifiques à la rénovation de logements	44
IV. Approche globale : terminologie et modélisation des performances	46
IV.1 Intérêts de l'approche multicritère	47
IV.2 Notion d'indicateurs de performance	47
IV.3 Modélisation de la performance	53
V. L'incertitude dans les systèmes de modélisation de l'information	55
V.1 Les différents types d'incertitude.....	56
V.2 Les représentations de l'incertitude	58
V.3 Les méthodes d'analyses et de propagation de l'incertain dans les modèles.....	59
VI. Représentations et utilisations de connaissances	67
VI.1 Grands principes	67
VI.2 Les techniques de modélisation de la connaissance.....	69
VII. L'analyse multicritère	80
VII.1 Définition des enjeux, formalisation des préférences	80
VII.2 Méthodes d'optimisation	81
VII.3 Méthodes d'aide à la décision multicritère	84
VIII. La naissance d'une problématique	93

Cette partie du mémoire est dédiée à la traversée de l'état de l'art sur différents domaines d'études pouvant contribuer à la future méthode d'aide à décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, spécifique aux opérations de rénovation de maisons individuelles.

L'état de l'art commence par aborder la question de la caractérisation technico-énergétique du parc de logements français à travers des études typologiques, puis enchaîne sur un examen des différentes bases de données et bases de connaissances existantes utiles dans une optique d'aide à la caractérisation technique des bâtiments et d'aide à l'évaluation multicritère de solutions d'amélioration énergétique. L'objectif est de faire la lumière sur la nature des connaissances techniques disponibles pour alimenter la future méthodologie.

Sont présentés par la suite, les méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments. Une attention particulière est portée sur ceux spécifiquement dédiés aux opérations de rénovation énergétique. Notre objectif de ne pas se restreindre à la seule dimension énergétique mais plutôt d'élargir l'approche à une vision globale et multi-technique de l'acte de rénovation, nous oblige à engager une analyse des référentiels d'évaluation de la performance globale. Sur cette base, nous faisons le point sur les différents indicateurs de performances utiles à la prise de décision pour la rénovation, ainsi que les différentes approches de modélisation possibles pour les évaluer. Cette partie de l'état de l'art doit permettre l'identification des travaux existants sur les thématiques de la modélisation des performances et de la prescription de solutions de rénovation.

Les deux chapitres suivants abordent les questions de l'intégration des incertitudes dans la prise de décision et des technologies d'intelligence artificielle permettant de formaliser et manipuler des connaissances métiers hétérogènes incertaines. L'idée première est de pouvoir centraliser dans un modèle unique d'inférence probabiliste des données issues de sources diverses (littérature spécialisée, bases de connaissances, interviews de spécialistes...) pour élaborer puis évaluer des scénarios de rénovation.

Enfin, un dernier grand chapitre est dédié à la thématique de l'analyse multicritère. Les principales méthodes d'optimisation multicritère et d'aide à la décision multicritère utilisées dans le monde du bâtiment sont présentées. Ce domaine d'étude a pour but de comprendre les mécanismes existants qui permettent d'identifier parmi un domaine de solutions lesquelles sont les plus efficaces au regard des préférences exprimées par un décideur, le tout dans un environnement contraint et empreint d'incertitudes.

L'analyse des différents mais complémentaires domaines traités dans cette partie permet d'acquérir les connaissances méthodologiques nécessaires à la formalisation de la future démarche d'aide à la décision pour la rénovation. L'examen de cet état de l'art met en lumière les lacunes actuelles dans le processus de prescription de solutions d'amélioration énergétique pour les maisons individuelles. En ce sens, cette partie se conclut par la mise en forme d'une problématique de recherche qui vise à contribuer à la complétion de ces manques.

I. Études typologiques du parc de logements en France

Essentielles à la caractérisation du parc et à l'aide à la complétion d'informations lorsque ces dernières manquent, les études typologiques de bâtiments permettent de capitaliser la connaissance sur l'existant pour :

- Aider à la caractérisation de l'existant et estimer le potentiel énergétique d'un bâtiment
- Évaluer la pertinence du segment de bâtiment visé pour le périmètre d'étude fixé
- Anticiper les risques de pathologies et les contraintes (techniques ou autres) de certaines typologies
- Préconiser à l'avance des solutions compatibles avec certaines typologies (et inversement)

I.1 Gisement énergétique du parc résidentiel Français

Le parc de bâtiment français est jusqu'en 1945 principalement constitué de constructions traditionnelles privilégiant les matériaux et procédés constructifs locaux⁵ [25-27]. À la fin de la seconde Guerre Mondiale le parc de bâtiments en milieu urbain est lourdement endommagé. Il s'en suit une période de reconstruction massive jusqu'au milieu des années 50, suivi dans les années 60 et 70 des premiers procédés de constructions industrialisés et l'avènement des premières maisons préfabriquées. En 1974 est instaurée la première réglementation thermique, qui apporte une harmonisation des modes constructifs à l'échelle nationale et des garde-fous au niveau des performances énergétiques des bâtiments nouvellement construits. Entre ces deux dates (1945-1974), le parc français construit est important. Le bas prix de l'énergie ne pousse pas au changement de comportement et les bâtiments continuent de consommer énormément d'énergie. Les deux chocs pétroliers dans les années 70 pousseront les pouvoirs publics à modifier ces types de construction en renforçant la dimension économie d'énergie dans les réglementations successives.

I.1.1 Quelques chiffres

Le secteur du bâtiment représente 44 % des consommations en énergie finale en France, et plus de 25 % des émissions de gaz à effet de serre. Le secteur résidentiel en France représente, à lui seul, 32 millions de logements [28] (56 % de maisons individuelles, 44 % de logements collectifs), soit 2,5 milliards de m² de surface habitable (respectivement 1.7 milliards et 0.8 milliards de m² [29])

De manière plus précise, sur la période de construction prioritairement étudiée (1945-1974) représentant 3,5 millions de maisons individuelles et 5 millions de logements collectifs (Figure 6), 60 % du parc de maisons individuelles sont des maisons sur catalogue proposées pour l'essentiel par des grands constructeurs.

⁵ Un procédé constructif appartenant à une zone géographique précise est également appelé « architecture vernaculaire »

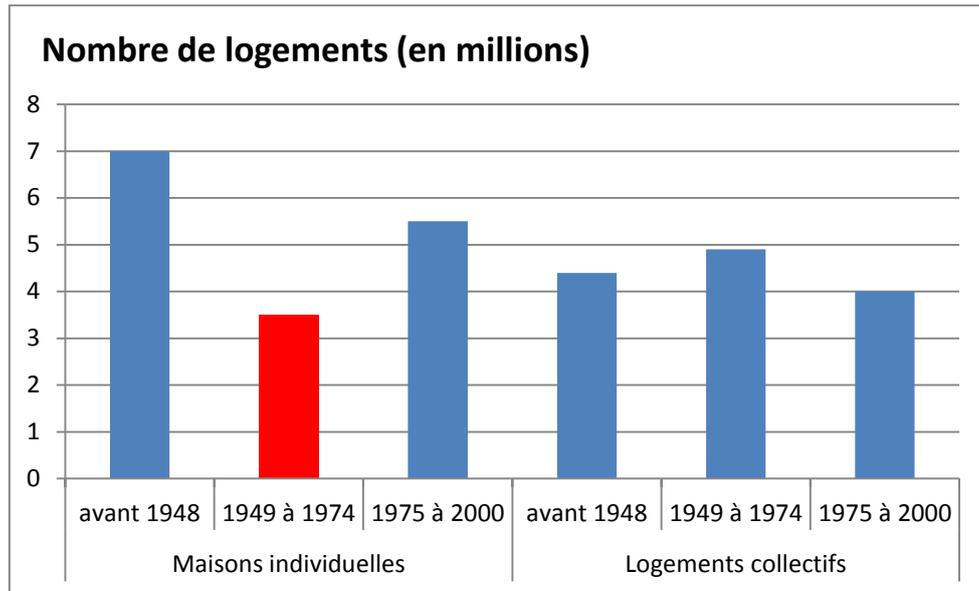


Figure 6 – Répartition des 32 millions de logements par périodes de construction (Source : FILICOM, taxe d'habitation 2009)

I.1.2 Un découpage chronologique

Dans de nombreux ouvrages traitant des typologies d'habitations françaises les plus représentatives, une segmentation du parc existant en trois « ères » est souvent réalisée (Tableau 3). Ce découpage chronologique correspond aux évolutions majeures des modes constructifs (procédés de construction mis en œuvre, comportement énergétique, architecture...) depuis le début du XX^{ème} siècle à aujourd'hui [26, 30]. Chacune de ces périodes est brièvement décrite ci-après.

Ères	avant 1945	1946 -- 1974	après 1975
Pourcentages du parc	34 %	25 %	41 %

Tableau 3 – Frise chronologique des typologies de bâtiment d'habitation français et pourcentage du nombre de logements du parc construits pour chaque période

I.1.2.1 L'ère d'avant-guerre

Avant 1945 les bâtiments sont dits anciens et correspondent à des constructions traditionnelles privilégiant une architecture vernaculaire (en fonction des ressources locales et du climat régional). Les solutions de réhabilitation ne peuvent être généralisées de par la grande variabilité des bâtiments sur le sol Français. Une attention particulière doit être portée sur l'isolation des parois qui sont généralement perméables à la vapeur d'eau, ainsi qu'aux planchers souvent en bois, ne supportant pas de surcharges structurelles importantes et les fortes variations hygrométriques.

I.1.2.2 L'ère de la reconstruction

De 1945 à 1974 le parc français connaît une véritable mutation amorcée par la nécessité de pallier le manque de logement détruit durant la Seconde Guerre Mondiale et accompagnée par la suite du baby-boom post-guerre. Au début des années 60 apparaissent les premiers grands chantiers de construction nationaux (Chalandon, Logéco) prémices des premières constructions industrialisées, souvent peu chères et aux performances énergétiques plus que passables. Cette période, où les bâtiments appartiennent à des familles topologiques

bien identifiées, prend fin avec l'arrivée de la première réglementation thermique en 1974 qui exige une amélioration de la performance thermique des logements.

I.1.2.3 L'ère post réglementation thermique

De 1974 à aujourd'hui le parc de bâtiment devient plus diversifié, en répondant au refus de la population de vivre dans des logements qui se ressemblent tous. L'application des réglementations thermiques successives permet également d'améliorer le confort des occupants tout en intégrant progressivement une mutation sur la consommation énergétique des logements (création de label énergétique, subvention pour l'amélioration énergétique des logements...).

I.2 La période 1945-1974, véritable enjeu de la rénovation énergétique

De par ses familles typologiques identifiables et leur niveau de performance énergétique plus que médiocre, les bâtiments de la période 1945-1974 représentent le segment du parc le plus pertinent en termes de réhabilitation énergétique.

I.2.1 Segmentation du parc résidentiel sur cette période

Décomposée en 3 plages d'années de construction et en quatre typologies de bâtiments génériques, une étude de l'ADEME [23] donne un aperçu du parc résidentiel français et de la consommation énergétique des bâtiments construits sous la période 1945-1974. Avec plus de 3.3 millions de maisons individuelles ou mitoyennes en France, consommant de 400 à 900 kWh d'énergie primaire par m² de surface habitable, il est pertinent de se focaliser sur ce segment (Tableau 4).

Tableau 4 – Données typologiques du parc résidentiel de 1945-1974 de l'outil TABULA

Typologie	Période de construction	Type			
		Maison indépendante 	Maison mitoyenne 	Immeuble particulier 	Immeuble collectif 
Nombre de bâtiments (x1000)					
1	1945-1954	495.4	131.7	58	45.8
2	1955-1967	928.9	246.9	130.6	80.2
3	1968-1974	1169.2	310.8	198.4	78.3
Surface habitable (en million m²)					
1	1945-1954	43	11.4	14.2	42.5
2	1955-1967	80.6	21.4	31.9	74.4
3	1968-1974	112.7	30	50.7	76.1
Surface habitable moyenne par bâtiment⁶ (en m²)					
1	1945-1954	86.8	86.6	244.8	927.9
2	1955-1967	86.8	86.7	244.3	927.7
3	1968-1974	96.4	96.5	255.5	971.9
Consommations annuelles moyennes en énergie primaire [kWh-EP.m⁻².an⁻¹] Chauffage Fioul et ECS fioul par accumulation					
1	1945-1954	918.8	918.8	502.1	370.4
2	1955-1967	888.8	888.8	517.1	468.2
3	1968-1974	406.7	254.1	625.5	544.2
SOURCE	http://www.building-typology.eu/country/typology-fr.html				

Une étude similaire, réalisée dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, a identifié en 2012 la répartition du stock de bâtiments résidentiels français en typologies constructives, et a évalué la performance énergétique moyenne de chaque famille (Tableau 5).

Enfin, le CSTB dans le cadre de son programme de recherche Modernisation Durable de l'Existant (MDE 2007-2010), a caractérisé qualitativement les typologies de maisons individuelles et immeubles collectifs représentatifs de cette même période (Tableau 6). L'accent a été porté ici sur la caractérisation technique des modes constructifs mis en œuvre.

⁶ Pour les maisons mitoyennes, la surface habitable moyenne donnée correspond à l'unité d'habitation (le logement) et non le bâtiment comme stipulé dans le sous-titre du tableau. Les données extraites de cette source ne font pas la distinction entre surface de logement et surface de bâtiment.

Tableau 5 – Données typologiques du parc résidentiel de 1915-1974 de l'étude RAGE

Typologie	Période de construction	Type		
		Pavillon de banlieue	Pavillon de la reconstruction 	Immeuble particulier 
Volume du parc (en %)				
1	< 1948	6.1 %	-	-
2	1948-1967	-	7.1 %	-
3	1968-1974	-	-	5.6 %
Consommations annuelles moyennes en énergie primaire [kWh-EP/(m².an)] Chauffage				
1	< 1948	247	-	-
2	1948-1967	-	247	-
3	1968-1974	-	-	196
SOURCE	Règles de l'art du Grenelle de l'environnement 2012 - Analyse détaillée du parc résidentiel existant			

* Les cases grisées correspondent à une absence des typologies décrites sur le segment temporel observé.

Tableau 6 – Données typologiques du parc résidentiel de 1915-1974 du programme MDE

Typologie	Pavillon traditionnel	Pavillon normalisé (homologué LOGECOS)	Pavillon de la relance	Pavillon industrialisé
Illustrations				
Période	1945-1974	1948-1968	1968-1974	1968-1974
% du parc	-	-	-	-
SH (=SHAB)	155	64-68	90	74-104
kWh _{EP} .m ⁻² .an ⁻¹	334	-	-	-
kgCO ₂ .m ⁻² .an ⁻¹	97	-	-	-
SOURCE	Livrables MDE, Cartographie du parc : secteur résidentiel - les bâtiments construits entre 1948 et 1974, <i>rapport interne du CSTB</i> , 2009			

* Les cases grisées correspondent à une absence des typologies décrites sur le segment temporel observé.

1.2.2 Analyse critique des données typologiques issues de statistiques à l'échelle du parc

1.2.2.1 Une analyse statistique des estimations de consommations énergétiques peu valorisable à si grande échelle

Les études à l'échelle d'un parc de 32 millions de logements montrent parfois des incohérences notables, principalement dues à l'impossibilité de savoir comment les chiffres ont été construits. Au niveau des aspects énergétiques, certains chiffres annoncés sont difficilement interprétables. Utilisons les trois études statistiques précédentes pour mettre en lumière ces difficultés.

Par exemple, l'étude statistique présentée en Tableau 4 montre des consommations énergétiques identiques entre les typologies de maisons individuelles indépendantes et mitoyennes pour deux tranches temporelles (1945-1954 et 1955-1967). Cela est physiquement et sociologiquement parlant peu crédible pour deux raisons :

- du point de vue statistique : le segment 1968-1974 montre une différence de performance énergétique notable entre les maisons mitoyennes et indépendantes, alors que les trois segments temporels sont supposés construits sur les mêmes hypothèses statistiques
- du point de vue énergétique : une maison mitoyenne possède en général 20 à 40 % de surface déperditive en moins par rapport à une maison indépendante, à usage égal et surface habitable proche. Cela devrait se retranscrire au niveau des consommations énergétiques.

Il est également important de mentionner que les résultats d'études typologiques de travaux similaires nous donnent des résultats assez différents (Tableau 4 et Tableau 5). Cela montre la portée limitée de l'utilisation de données statistiques pour l'évaluation « a priori » de la performance énergétique du parc existant sous cette période.

Il faut néanmoins relativiser. En se limitant à une analyse à un niveau plus global, ce segment du parc de logements – *construit durant la période 1945-1974* – reste indubitablement le plus énergivore du parc actuel et doit être rénové en priorité car sa consommation énergétique annuelle moyenne excède les $350 \text{ kWh}_{EP} \cdot \text{m}^{-2}_{SHON}$. En même temps, les analyses menées par les auteurs des études typologiques précédemment citées montrent que le gisement d'économies d'énergie est énorme et que les actions permettant de passer à l'acte sont clairement identifiées.

1.2.2.2 Des actions d'amélioration énergétiques clairement identifiées

Ce segment du parc possède également de nombreuses caractéristiques techniques et architecturales qui montrent un potentiel d'intervention important d'amélioration de leur performance énergétique au travers d'actions de maintenance ou de modernisation :

- des menuiseries simple vitrage à remplacer car n'assurant plus les standards actuels de confort thermique ;
- des défauts d'étanchéité de l'enveloppe chauffée souvent important (menuiseries extérieures perméables à l'eau et à l'air, revêtement d'étanchéité des toitures terrasses à reprendre sur de nombreux immeubles collectifs) ;
- un besoin fort de modernisation (cloisonnement, second-œuvre, apport lumineux) ;
- des combles à isoler ou des renforcements d'isolation à prévoir ;
- des équipements énergétiques anciens et consommant énormément ;
- des problèmes d'humidité récurrents (souvent liés l'absence de système de ventilation) ;

- un besoin croissant d'agrandissement de la surface habitable (moyenne à 86m² pour les MI en 1950 et à plus de 100m² aujourd'hui).

1.2.2.3 Les typologies, une aide à la caractérisation de l'existant en milieu incertain

Nous constatons également que les procédés architecturaux et équipements énergétiques mis en place à cette époque sont relativement homogènes et bien documentés [20, 23, 26, 27, 30]. Ces informations techniques et performantielles capitalisables à l'échelle du parc, bien que souvent trop approximatives, génériques et ventilées sur différents ouvrages ou bases de données, permettent d'aider au diagnostic individuel de bâtiments.

En effet, durant la phase de caractérisation de l'existant pour une opération de rénovation spécifique, de telles informations permettent de pallier des connaissances incertaines en proposant des éléments de réponses contextuels (par exemple sous la forme de distributions statistiques de valeurs recherchées en fonction de l'année de construction ou de la zone géographique). Elles peuvent également servir à rendre plus rapide cette étape de saisie d'informations.

1.2.3 De nombreux leviers permettant de justifier le passage à l'acte

Pour conclure sur cette partie de l'état de l'art traitant des études typologiques du parc de logements français, le segment de bâtiments construits entre 1945 et 1974 représente le plus fort potentiel d'économie d'énergie réellement accessible à court et moyen termes. Cela principalement pour les raisons suivantes :

- des bâtiments énergivores et ne répondant plus aux standards de confort actuels ;
- un parc globalement homogène avec peu de diversité architecturale ;
- une connaissance technique réelle du bâti de l'époque (1945-1974) en opposition avec le parc ancien qui est souvent hétéroclite, issu de mouvances vernaculaires et peu documenté ;
- des actions de rénovation identifiées à fort potentiel énergétique ;
- un engagement politique pour l'efficacité énergétique et une valorisation des logements existants.

Nous avons brièvement vu, à travers cette partie de l'état de l'art, comment est constitué le parc de logements français. La période constructive 1945-1974 rassemble des typologies identifiées de bâtiment, qui sont pour la plupart, les bâtiments les plus énergivores en France. L'évaluation de leur performance énergétique à l'échelle du parc n'est pas compatible avec une logique d'aide à la décision pour la réhabilitation à l'échelle d'un bâtiment (nécessitant la prise en compte des spécificités de chaque habitation : rénovations antérieures, mode de vie des occupants, vieillissement du bâti, préférences des décideurs...). Cependant, ces études permettent de mettre en avant des ratios et points-clés aidant à réaliser un aperçu rapide du potentiel d'amélioration énergétique d'un projet (avantages et faiblesses des familles typologiques identifiées, retours d'expérience similaires...). De la même manière, nous voyons ici émerger le début d'une structuration des informations nécessaires à la formalisation d'une méthodologie d'aide à la décision : des solutions de rénovation à mettre en œuvre pour pallier les faiblesses de ce segment de parc (isolation thermique de l'enveloppe, installation de systèmes de ventilation, remplacement des équipements de production de chaleur...) d'un côté, et des thématiques performantielles à prendre en considération (performance énergétique, confort thermique, besoin de modernisation, gestion des apports lumineux...) de l'autre.

II. Bases de données et de connaissances existantes

L'objectif de cette partie du rapport est de faire un tour d'horizon des bases de données existantes traitant de l'évaluation performantielle au sens large des logements (aussi bien à l'échelle de l'ouvrage qu'à l'échelle du procédé) ainsi que des bases de connaissances capitalisant des règles métiers ou recommandations de mises en œuvre utiles à la prescription de solutions de rénovation en fonction du niveau de connaissance sur l'existant.

II.1 Bases de données dédiées à la consommation énergétique des bâtiments

De nombreuses bases de données nationales et internationales fournissent des informations permettant d'aider à la segmentation du parc de logements Français sur le critère énergétique ainsi que de proposer des améliorations techniques chiffrées. Sont référencées ci-après, les principales bases de données centralisant des informations potentiellement utiles dans le cadre d'une démarche d'aide à la rénovation pour les maisons individuelles.

À l'échelle nationale :

- **Observatoire DPE de l'ADEME** : cet observatoire centralise les données relatives aux Diagnostics de Performance Énergétique (DPE) des logements depuis 2013. La répartition des données statistiques proposées peut se faire : par étiquette, par année de construction, par type de logements et par département métropolitain.
- **INSEE Enquêtes Nationales Logement (2006 et 2011)** : elles fournissent une estimation des dépenses des ménages pour les différents biens et services par décile de revenu.
- **FILOCOM (Fichier des Logements par communes)** : ces fichiers concernent les locaux à usage d'habitation assujettis ou non à la taxe d'habitation, et leurs données agrégées confidentialisées sont accessibles sous certaines conditions si une demande est faite auprès des autorités régionales. De très nombreuses informations y sont référencées : types de logements, surfaces habitables, composition des ménages, années de construction, revenu des occupants...
- **Fichier MAJIC** : ce sont les fichiers fonciers basé sur les informations cadastrales des territoires [31]. Leur vocation initiale est l'évaluation fiscale (taxes foncières et d'habitation) des propriétés bâties, mais d'autres informations précieuses y sont disponibles pour les logements : caractéristiques, équipements, date d'achèvement, matériaux de construction...
- **Enquête Phébus (Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie)** : Enquête menée en 2013 auprès de 8000 logements tirés au sort dans l'enquête annuelle de recensement 2011. Les thèmes abordés lors de cette enquête sont : les caractéristiques générales du logement et des occupants (taille, date d'achèvement...); les caractéristiques socio-démographiques du ménage (composition, profession, nature d'emploi, date d'installation dans le logement, charges, revenus...); les travaux d'amélioration de l'habitat effectués depuis 2007 et pouvant avoir un impact sur l'efficacité énergétique (travaux d'isolation, changement de la chaudière, des fenêtres, installation de panneaux solaires,...); les usages et comportements énergétiques ainsi que les consommations d'énergie.
- **Enquêtes OPEN (campagnes 2007 à 2011)** : Menées par l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement, ces études se focalisent sur le contexte de la

rénovation des logements français (motivation, performances attendues, bouquets de travaux).

Aux échelles européenne et internationale :

- **NREMD (National Residential Efficiency Measures Database)** : régulièrement mise à jour par le National Renewable Energy Laboratory des États-Unis d'Amérique, la NREMD [32] est libre d'utilisation et regroupe de nombreuses caractéristiques multicritères sur des solutions génériques dédiées à la rénovation énergétique de bâtiments résidentiels⁷. Parmi ces dernières nous pouvons citer, pour chacune des solutions listées : des performances énergétiques (en unités anglo-saxonnes) ; des intervalles de prix (investissement + mise en œuvre) ; une durée de vie estimée.
- **BPIE (Buildings Performance Institute Europe)** : Cette base de données en libre accès propose à l'échelle européenne (une trentaine de pays), de nombreuses informations statistiques sur la segmentation et la performance énergétiques des bâtiments existants. La répartition peut se faire par pays, types de bâtiments, profils des occupants...

II.2 Bases de données d'analyse de cycle de vie environnemental

Appelées aussi *Life Cycle Analysis (LCA) databases* en termes anglo-saxons, les BDD environnementales permettent d'évaluer les impacts environnementaux de produits ou systèmes manufacturés sur une part ou l'intégralité de leur cycle de vie. Le périmètre de validité et la représentativité des impacts calculés pour un produit référencé dépendent grandement des nombreuses hypothèses prises en considération dans la modélisation du cycle de vie.

II.2.1 INIES

La base de données inies.fr recense 1003 Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES⁸) de produits de construction en France, fournies par les fabricants ou syndicats professionnels. Le format et le contenu des données présentes dans ces fiches correspondent au cadre dicté par la norme NF P01-010. On y retrouve 11 indicateurs d'impacts environnementaux à l'échelle du procédé. Elle est gratuite.

- Consommation de ressource énergétique totale (MJ)
- Épuisement de ressources (kg éq. Sb)
- Consommation d'eau totale (L)
- Déchets solides totaux (kg)
- Changement climatique (kg éq. CO₂)
- Acidification atmosphérique (kg éq. CO₂)
- Pollution de l'air (m³ d'air)
- Pollution de l'eau (m³ d'eau)
- Destruction de la couche d'ozone (kg éq. CFC)
- Formation d'ozone photochimique (kg éq. d'éthylène)
- Eutrophisation (kg éq. PO₄³⁻)

⁷ La base de connaissance NREMD permet d'estimer le coût de certaines solutions de réhabilitation pour le marché américain. Par conséquent les coûts présentés ne reflètent pas le marché européen, et les caractéristiques énergétiques des procédés ne sont pas en SI mais en système d'unités anglo-saxonnes. Cependant les données présentées donnent une estimation de la durée de vie envisagée de chaque solution répertoriée.

⁸ Les FDES, dispositifs nationaux, seront remplacés dès 2015 par leurs équivalents européens les « Environmental Product Declaration » (EPD). Les EPD sont définis par la norme européenne NF EN 15804.

Cette base de données alimente partiellement les outils d'analyse de cycle de vie (ACV) français ELODIE [33] et Cocon [34].

II.2.2 PEP-ECOPASSPORT

Base de données⁹ collectant les déclarations environnementales des équipements électriques, électroniques et de génie climatique. 1124 Profils Environnementaux Produits (PEP) y sont référencées.

II.2.3 ECOINVENT

Base de données suisse, evoinvent.ch est composée des *Environmental Product Declaration* (EPD) et d'autres formats de fiches déclaratives, regroupant dans sa version 3 plus de 9000 jeux de données environnementales. Cette base de données est la plus couramment utilisée en Europe dans les outils d'ACV (Cocon, Elodie,...). Elle est payante.

II.3 Bases de données d'évaluation des coûts

Notre recherche se focalise uniquement sur les bases de données permettant de chiffrer les coûts associés à des types de travaux de construction ou de rénovation ainsi que la consommation annuelle en flux énergétiques (électricité, fioul, gaz naturel...) d'un bâtiment. Nous excluons de ce fait les sources d'informations permettant l'obtention des indices de coûts de construction ou de rénovation à l'échelle des projets.

Dans le cadre d'investigation mené, de nombreuses bases de données commerciales – i.e. payantes – donnent accès à des catalogues de prix sur des types de travaux détaillés ou lots de travaux. Ces bases de données précisent rarement comment les tarifs estimés sont calculés. Une des valeurs ajoutées de ce type de données par rapport aux catalogues commerciaux de produits de construction, est la possibilité d'avoir des tarifs intégrant ou non la part de mises en œuvre des travaux proposés, le coût de location journalière d'engins de chantiers (bulldozer, bennes, grues...), des coefficients d'actualisation des prix pour des calculs pluriannuels.

Pour ce qui est des prix des énergies consommées durant la période d'exploitation d'un bâtiment (par kWh d'énergie finale + abonnements annuels), la base de données publique PEGASE en libre accès tient à jour les tarifs mensuels et annuels des vecteurs énergétiques suivants : bois, électricité, gaz naturel, vapeur, produits pétroliers.

Le Tableau 7 synthétise les trois bases de données majeures en France pouvant aider à l'évaluation d'indicateurs économiques (temps de retour sur investissement, coût global, valeur actualisée nette...) pour des travaux de rénovation énergétique de logements.

⁹ Association et référentiel PEP ecopassport : www.pep-ecopassport.org

Tableau 7 – Bases de données de coûts (limitées à un usage en France métropolitaine)

Nom	Nature des coûts disponibles	Description	Accès
PEGASE ¹⁰ [35]	Flux d'énergie	Base de données publique, fournissant l'évolution du prix de l'énergie par type et par usage sur les quinze dernières années.	Libre
Bâtiprix [®] [36]	Produits + mise en œuvre	La base de données Bâtiprix, du groupe Le Moniteur, qui est complète et actualisée fréquemment.	Payante
BatiChiffrage [®] [37]	Produits + mise en œuvre	Le logiciel et base de données liées du site internet « Bâti-Actu ». Un temps de main d'œuvre moyen est également proposé pour chaque opération référencée.	Payante

II.4 Base de connaissance techniques et architecturales sur les logements de la période 1945-1974

Nous prenons une légère liberté et appelons par la suite « bases de connaissance » tous types de support permettant de capitaliser des règles métiers, des retours d'expériences, des recommandations de spécialistes de la rénovation de bâtiments. Ces supports prenant généralement plus souvent la forme d'ouvrages littéraires spécialisés (guides techniques, retours d'expériences...) que de bases directement exploitables par des outils informatiques (moteurs d'inférence notamment).

L'analyse des différentes bases de connaissances examinées lors de notre recherche bibliographique a montré que le savoir capitalisé en leur sein pouvait revêtir trois natures de connaissances différentes mais complémentaires :

1. une aide à la segmentation du parc de bâtiments par typologies (modes constructifs ou/et potentiels d'amélioration énergétique similaires) ;
2. des inventaires contextualisés¹¹ des caractéristiques techniques ou performantielles de procédés de rénovation mis en œuvre ;
3. des règles métiers (contraintes diverses, couplages d'actions, recommandations) sur la mise en œuvre de solutions élémentaires ou de stratégies globales.

Les deux premières natures sont proches de la notion stricto-sensu de bases de données, mais ici les données sont accompagnées d'un contexte et d'une analyse-métier difficilement formalisable sous un tel format. La dernière nature prend aussi bien la forme de retours d'expérience que de guides d'aide à la conception ou à la mise en œuvre de solutions techniques.

II.4.1 Sources contribuant à l'aide à la segmentation du parc de bâtiments

De nombreux ouvrages et bases de connaissances s'orientent vers une analyse de segmentation. Graulière dans [26] présente de nombreuses caractéristiques architecturales

¹⁰ PEGASE : Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie

¹¹ Par « contextualisés », nous entendons *caractéristiques dépendant de certains critères discriminants* comme la géographie, l'année de construction, etc.

et techniques de typologies de bâtiments français, depuis la fin de XIX^{ème} siècle à aujourd'hui. De nombreux travaux similaires ont été engagés dans la même voie mais rajoutent un volet *consommations énergétiques* à chaque typologie étudiée (le Guide ABC [30], les rapports MDE du CSTB [38], les livrables du projet européen MARIE [20] spécialisée sur les régions méditerranéennes et alpines). Dans le même thème mais cette fois-ci à l'internationale, l'université de Montfort propose une application en ligne permettant d'évaluer le confort thermique d'été de différentes typologies constructives propres à l'Angleterre [39] ; enfin la base de données Tabula regorge de typologies de logements à travers 25 pays d'européenne [23].

II.4.2 Sources contribuant à l'aide aux caractérisations techniques et performantielles des solutions de rénovation

Sous la forme de caractéristiques techniques intrinsèques ou de contributions aux performances multicritères globales à l'échelle d'un projet de rénovation, de nombreuses connaissances associées à des procédés techniques de rénovation (éléments d'isolation de l'enveloppe, baies vitrées, systèmes énergétiques...) sont disponibles dans les guides techniques et autres ouvrages spécialisés. Le *guide ABC* [30], la série de guides *Bâtir le développement durable* éditée par le CSTB dont celui dédié à la réhabilitation des maisons individuelles [40], le guide pratique de l'ADEME sur la ventilation [41], celui de l'ANAH sur l'estimation économique des rénovations thermiques les plus rentables [42] , ou encore le livre de Salomon et Aubert sur le rafraîchissement sans climatisation [43] sont de véritables mines d'informations pour l'aide à l'évaluation multicritère (le plus souvent qualitative à partir de dires d'experts, mais également parfois de manière quantitative) de certaines solutions de rénovation.

II.4.3 Sources capitalisant des règles expertes et retours d'expérience

Cette nature de connaissance est sans aucun doute la plus utile à notre souhait de mettre en rouage une méthodologie d'aide à la prescription de scénarios de rénovation pour la maison individuelle. En effet, l'expertise métier de la rénovation est ventilée sur de nombreux corps de métiers propres au secteur de la construction. La capitalisation de ce savoir peut se faire à l'oral à travers des interviews de spécialistes, mais aussi par l'examen de guides et fiches techniques spécialisés. L'ensemble des guides mentionnés dans la section précédente (§II.4.2) fournissent également des informations sur les prérequis nécessaires à la mise en œuvre de certaines solutions de rénovation. Nous y retrouvons également des contre-indications d'usage (incompatibilités techniques et contraintes réglementaires) et quelques recommandations (couplages avec des actions de maintenance pour bénéficier de synergies, protocoles de mise en œuvre...). Dans cette même fibre, les fiches pédagogiques du projet MARIE expliquent à *l'utilisateur lambda* pourquoi certaines solutions de rénovation sont plus adaptées que d'autres en fonction des spécificités techniques de son logement [20]. Les fiches « solutions techniques » du programme RAGE, principalement dédiée aux acteurs professionnels de la rénovation, détaillent les règles expertes à suivre pour mettre en œuvre les solutions de rénovation les plus performantes [44, 45]. Enfin les fiches pathologies de l'Agence Qualité Construction [46] communiquent, par retours d'expérience, les situations à risques pour éviter l'apparition de sinistres lors de travaux sur le bâti.

Même si de nombreuses bases de données et bases de connaissances existent sur le segment de la construction et de l'analyse de la performance énergétique, aucune d'entre-elles ne propose une évaluation globale des performances de bâtiments, que ce soit à l'échelle du procédé, du bâti, du parc. Certaines bases se focalisent sur les échelles « parcs » ou « bâtis » en proposant des informations macroscopiques uniquement centrées sur les aspects socio-économiques ou énergétiques ; d'autres bases, à l'échelle des procédés, proposent des évaluations détaillées sur les aspects énergétiques, économiques et environnementaux. Par conséquent, il est donc important de rester pragmatique quant à la possibilité d'évaluer des scénarios d'amélioration énergétique via une approche multicritère quantitative : lorsque certaines données utiles ne peuvent être obtenues par l'approche statistique, le recours à une expertise métier, souvent qualitative, auprès des spécialistes de la construction et de la rénovation énergétique, reste nécessaire.

Du côté de la capitalisation de connaissances expertes permettant d'orienter des choix techniques et architecturaux de rénovation en fonction des attentes des maîtres d'ouvrage et des spécifications techniques des bâtis existants à rénover, le recours à la littérature spécialisée (notamment les guides techniques) représente une approche intéressante bien que les informations trouvées restent cependant souvent insuffisantes. En effet, celles accessibles sont souvent redondantes et ciblent principalement certaines technologies (procédés d'isolation thermique, systèmes de ventilation). La multitude d'ouvrages existants dans le domaine rend la tâche de collecte extrêmement chronophage ; le tout sans succès garanti de trouver les conseils recherchés. D'autre part il convient de noter que ces bases de connaissances ne sont pas exploitables car stockées majoritairement sur des supports classiques : des livres. Un travail de formalisation est donc nécessaire. On retiendra aussi qu'une voie essentielle, pour capitaliser de la connaissance, consiste à interviewer des spécialistes de la rénovation.

III. Analyse des méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique

Dans ce chapitre nous aborderons successivement : les processus classiques de conception de stratégies de rénovation, les méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique au sens large, ainsi que les outils spécifiques à la rénovation énergétique de logement. L'objectif est d'identifier le fonctionnement des méthodes actuelles sur la thématique de la prescription de solutions d'amélioration énergétique.

III.1 Processus classique de conception de stratégies de rénovation

Dans ce chapitre, seuls les processus simplifiés et partiellement informatisés permettant, avec peu de moyens d'investigation et peu de temps, d'apporter un éclairage succinct sur les solutions techniques pertinentes pour un projet de rénovation sont discutés. Les autres approches (basées sur de l'expertise pure, sans cheminement clairement identifiés ou bien sur des processus complexes nécessitant des moyens de mises en œuvre longs et coûteux) ne sont pas abordées.

De manière traditionnelle, les processus d'aide à la rénovation basés sur des outils informatiques dédiés initialement à l'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment suivent le schéma suivant :

- 1) **Diagnostic énergétique / Identification de l'existant** : c'est l'étape essentielle permettant de collecter les informations nécessaires à l'évaluation de la performance énergétique. En fonction de la nature du modèle de calcul embarqué (voir chapitre §III.2), le diagnostic peut se limiter à la caractérisation de l'enveloppe chauffée du bâtiment et de son environnement proche ainsi que la description plus ou moins poussée des installations énergétiques (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, ...), ou bien s'ajouter à un questionnaire utilisateur pour évaluer les

scénarios énergétiques (températures de consigne, période d'occupation, période d'occultation des vitrages,...).

2) **Évaluation de la performance énergétique** : Deux orientations méthodologiques sont possibles :

(a) *Évaluation spécifique, en temps réel* : Une méthode de calcul ou un outil d'évaluation est utilisé pour déterminer les déperditions thermiques du bâti, les estimations théoriques des besoins et des consommations énergétiques par postes audités (chauffage, E.C.S.,...). Cette évaluation vise donc à comparer la performance initiale d'un bâtiment, calculée en fin de diagnostic énergétique, avec les résultats d'évaluation des propositions d'actions d'amélioration énergétique (étape définie ci-après).

(b) *Évaluation générique, à partir d'une base de données* : En fonction des résultats du diagnostic de l'existant, un rapprochement technico-performantiel est fait avec un bâtiment-type similaire extrait d'une base de données technique propre à l'outil manipulé (ex : l'outil *123 Réno* du projet européen MARIE [20] ou l'outil d'évaluation du confort thermique d'été *ALICE* [47]). Ensuite les propositions d'actions d'amélioration énergétique sont directement pré-câblées et les résultats de simulations directement piochés dans la même base de données.

3) **Proposition de solutions d'amélioration énergétique** : l'objectif est d'identifier et de hiérarchiser les bouquets de solutions d'amélioration permettant de minimiser une facture énergétique ou d'obtenir un certain niveau de performance. Ici, deux visions complémentaires sont couramment exploitées :

(a) Un choix automatisé de bouquets de solutions répondant aux critères énoncés par la maîtrise d'ouvrage est proposé à l'utilisateur.

(b) Un choix personnalisé de solutions : l'utilisateur sélectionne lui-même la nature des travaux qu'il souhaite réaliser et les outils proposent alors des solutions jugées pertinentes au regard des informations qui leur sont transmises. Dans certains cas, des problèmes de compatibilité peuvent être mis en avant (mais cela reste anecdotique dans les outils actuellement disponibles sur le marché).

La plupart de ces outils mettent en avant des critères comme des temps de retour sur investissement, l'accession à des labels de performance afin de subventionner une partie de l'investissement à réaliser pour chaque pack de solutions. Peu nombreux sont les outils s'orientant vers la maîtrise durable des besoins énergétiques du bâti, et du confort de ses occupants.

4) **Sélection d'une alternative** : Un classement performantiel des bouquets de solutions proposés et chiffrés est mis en avant. La décision finale se réduit généralement à un aspect purement budgétaire, en fonction des possibilités de financement de la maîtrise d'ouvrage.

Deux processus d'outils d'aide à la rénovation illustrant ce cheminement classique sont proposés dans les Figure 7 et Figure 8. Dans ces figures, les utilisateurs sont des particuliers non-sachant (propriétaires de maisons individuelles ou d'appartements) souhaitant a priori connaître les solutions de rénovation adaptées à leur besoin.

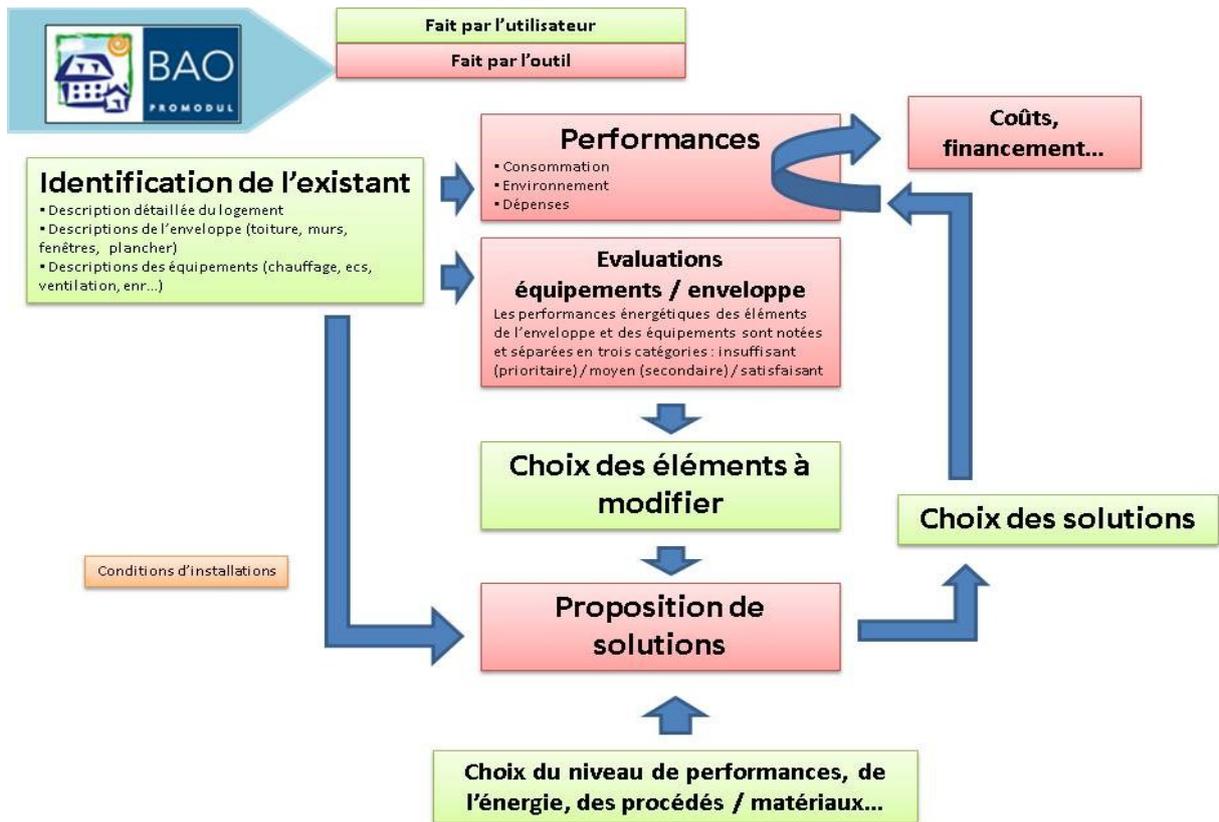


Figure 7 – Exemple de processus d'aide à la conception de stratégies de réhabilitation énergétique de l'outil « BAO promodul » (issu des livrables MDE du CSTB)

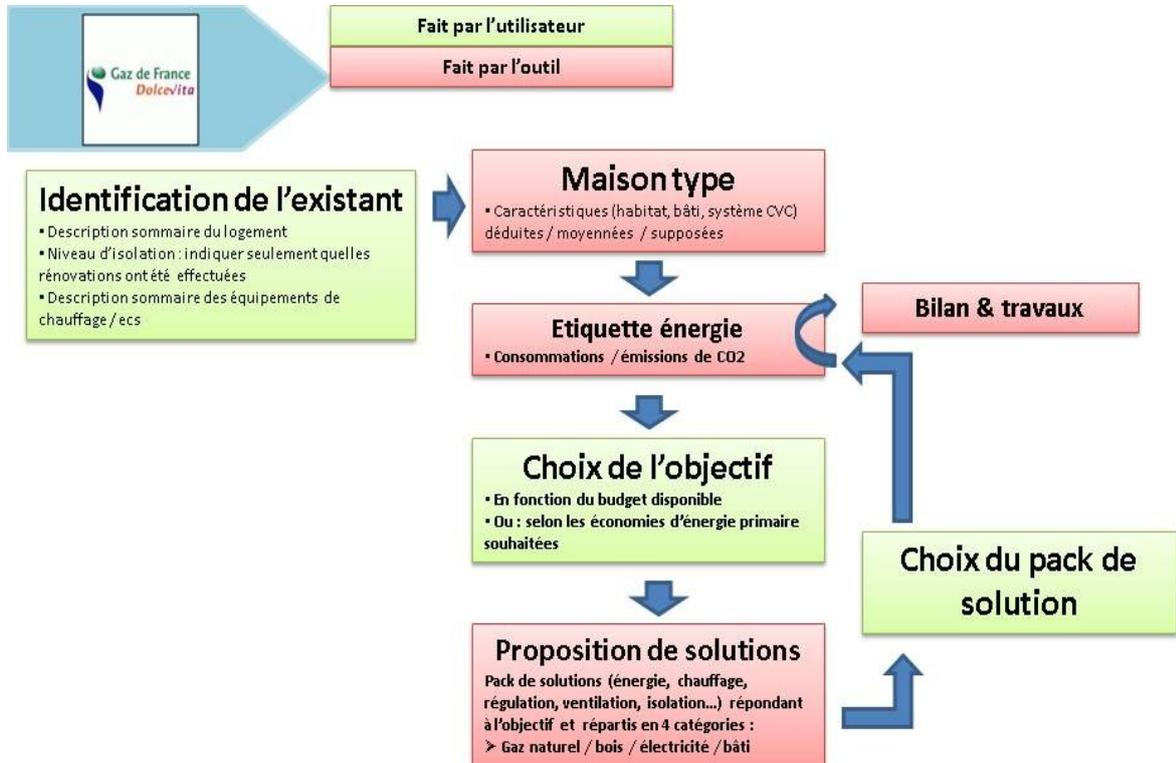


Figure 8 – Exemple de processus d'aide à la conception de stratégies de réhabilitation énergétique de l'outil « Gaz de France DolceVita » (issu des livrables MDE du CSTB)

Limites de ces approches classiques

La première limite de ces processus traditionnels est l'absence de prise en compte en amont des enjeux du projet de réhabilitation¹² et des spécificités de chaque bâtiment (motivations, objectifs, contraintes) : chaque opération est traitée exactement de la même manière que les autres. Le diagnostic de l'existant est purement énergétique et permet de dresser un niveau de performance de type DPE (§III.2.2) ainsi qu'identifier les éléments architecturaux ou systèmes techniques peu performant à améliorer.

La seconde limite est l'absence d'indicateurs de performance sur d'autres thématiques (tels que le confort, la santé, l'environnement...) pouvant interagir avec la performance énergétique des solutions d'amélioration énergétique proposées. Cela peut conduire à la préconisation d'une solution non adaptée à la situation pouvant entraîner une surestimation des gains énergétiques possibles, voir une dégradation du confort ou l'apparition de pathologies. Placer entre les mains de personnes non qualifiées, ces approches monothématiques comportent des risques non négligeables de contre-performance.

Une dernière limite est le manque de visibilité sur les interactions possibles des solutions de réhabilitation proposées (synergie, incompatibilité, situations à risques). En effet ces approches n'embarquent pas suffisamment « d'intelligence métier ». Les solutions proposées peuvent très bien être incompatibles avec certaines spécificités de l'existant non renseignées durant la phase de diagnostic ; ne pas intégrer des facteurs d'échelles liés au phasage des travaux ; omettre des prérequis à la mise en œuvre de certaines technologies (pouvant générer des pathologies sur l'enveloppe ou des risques pour la santé des occupants).

III.2 Méthodes et outils d'évaluation de la performance énergétique

Les outils de simulation sont omniprésents lorsqu'il s'agit d'évaluer la performance énergétique d'un bâtiment (bâtiments neufs et existants), ils ont pour objectif de modéliser les phénomènes physiques régissant le stockage et le transfert de chaleur. Ils prennent la forme de logiciels d'évaluation des consommations énergétiques ou de codes de calcul détaillés pour la conception de bâtiments performants, et jouent un rôle important dans l'accompagnement des maîtres d'ouvrage tout au long du processus de conception (évaluation des alternatives, la validation de choix). Certains logiciels utilisant des codes de calcul réglementaires, cherchent à évaluer le respect de la réglementation énergétique en vigueur par rapport à des bâtiments de références et à un jeu de garde-fous¹³. D'autres, enfin, sont juste des codes de calculs simplifiés destinés à évaluer de manière rapide les consommations énergétiques de bâtiments.

Ces outils de simulation peuvent être classés en deux grandes familles, présentées ci-après, chacune associée à un compromis *données disponibles / temps de calcul / précision / complexité d'usage* différent.

¹² Or nous avons vu la variété et l'importance de ces enjeux à la page 14.

¹³ On notera ici que, dans le cadre de la réglementation thermique pour les bâtiments existants, la consommation des bâtiments d'habitation est comparée d'une part à une consommation de référence pour les cinq usages réglementaires (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires), et d'autre part à une valeur absolue (le Cep_{max}) pour certains usages (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire), à l'image de ce que fait la RT2012.

III.2.1 Méthodes et outils de simulations

Ces outils complets jouent un rôle capital dans l'accompagnement des hommes d'études au cours du processus de conception (pour l'évaluation et la validation de leurs choix) [48]. Ce sont eux qui représentent les phénomènes physiques le plus fidèlement possible. On retrouve dans ces catégories les outils de conception, et les outils de validation réglementaire.

- *Les outils de conception et de dimensionnement* : réservés exclusivement aux hommes d'études et à la recherche, ces outils détaillés (TRNSYS, Energy+, Pléiades+Comfie, CoDyBa, SIMBAD ou autres) nécessitent une formation technique assez poussée. Il est possible d'agir directement sur les modèles (en développant de nouveaux modèles ou en modifiant ceux existants) et les paramètres. L'utilisateur modélise ce qu'il veut, comme il le souhaite, à l'aide de petites calettes échangeant des informations entre elles, au pas de temps souhaité.
- *Les outils et méthodes de calculs réglementaires* : tels que les méthodes Th-BCE de la RT 2012 (i.e. réglementation thermique pour les bâtiments neufs) ou Th-C-E Ex pour la RT Existante Globale (i.e. réglementation thermique pour les bâtiments existants), ces méthodes utilisent des paramètres prédéfinis pour certains éléments du calcul (scénarios conventionnels). Ils utilisent un pas de temps horaire, mais ne sont pas destinés à une utilisation pour la conception de solutions constructives ou de réhabilitation. L'évaluation du confort d'été est réalisée au moyen du calcul d'une température intérieure de confort (Tic) atteinte à l'intérieur du bâtiment au cours de la semaine la plus chaude de l'année. Cette valeur est ensuite comparée à une température de référence¹⁴. Les systèmes innovants peuvent être pris en compte par le biais d'une procédure spécifique, dite procédure Titre V (Ces Titre V ne sont pas des objets informatiques intégrés directement dans le moteur de calcul en RT Existante Globale, ce qui est le cas pour la RT2012).

Même si ces outils sont performants, ils ne sont pas adaptés à la réalisation de diagnostic rapide pour plusieurs raisons :

- (1) Ils sont trop précis et demandent un jeu d'entrée de données trop important, ce qui rend la saisie longue et fastidieuse. Ici la place du diagnostic initial est prépondérante et indispensable à la formulation d'hypothèses nécessaires au fonctionnement de ces outils.
- (2) De par la complexité des connaissances demandées, leur utilisation est restreinte aux hommes d'études qui sont familiers avec les concepts de modélisations des phénomènes physiques et les sciences du bâtiment. Par conséquent une étude complète est onéreuse et non adaptée aux petits budgets (notamment les particuliers).
- (3) Ils traitent les aspects énergétiques, parfois le confort des occupants, mais négligent les aspects financiers, environnementaux, acoustiques, etc.
- (4) Leur temps de calcul dépasse parfois l'heure, ce qui peut être un frein à l'étude de plusieurs scénarios en temps réel.¹⁵

¹⁴ On notera ici qu'une évolution sur ce point est prévue dans le cadre de la RT2012, l'indicateur de confort d'été actuel (température) sera remplacé par un indicateur d'inconfort mêlant le nombre d'heures d'inconfort mais aussi son intensité.

¹⁵ Ce problème peut être pallié en utilisant des résultats de simulations déjà réalisés sur des typologies de bâtiment préalablement identifiées

III.2.2 Méthodes et outils de calcul simplifiés

Avertissement : ne sont évoquées dans cette section, que les codes de calcul permettant théoriquement une évaluation de scénarios d'amélioration (usages prospectifs ou prescriptifs). Les évaluations de la performance énergétique par règles de trois, analyses des factures ou relevés de compteurs n'y sont pas mentionnées.

Ces outils de calcul simplifiés sont dédiés au diagnostic et à l'établissement rapide d'une estimation conventionnelle¹⁶ des consommations énergétiques annuelles des bâtiments. Ils ont une vocation informative mais ne devraient pas être utilisés comme outils de conception. Ils peuvent, être soit réglementaires afin d'évaluer de manière transparente et conventionnelle la performance énergétique d'un bâti en vue d'une transaction immobilière (vente, location), soit commerciaux en vue d'évaluer rapidement l'impact de travaux d'agrandissement ou de rénovation énergétique pour accompagner le choix des maîtres d'ouvrage.

- *Les outils de diagnostic de performance énergétique réglementaires* : Ils sont initialement dédiés aux professionnels chargés d'établir des diagnostics de performance énergétique (DPE). Un tel diagnostic est obligatoire pour la vente d'habitation depuis 2006 en France [49, 50] et à la location depuis 2007. Les outils permettent de calculer de manière conventionnelle, les consommations énergétiques et une estimation de leur coût annuel pour les postes suivants : chauffage, refroidissement et ECS¹⁷. La plupart embarquent le moteur de calcul DPE-3CL qui est une transposition nationale d'une des méthodes de calcul proposées par la norme européenne EN 17390 (remplaçant la EN832).
- *Les outils de diagnostic de performance énergétique commerciaux* : Ils sont principalement destinés aux commerciaux des grands distributeurs d'énergie en France ou des grandes enseignes du bâtiment et ne nécessitent pas de compétence vraiment spécifique. Ils prennent la forme de modules d'évaluation simplifiés des consommations énergétiques au pas de temps annuel. Utilisant des codes de calcul rapides mais peu précis, ils reprennent souvent les méthodes de calculs réglementaires simplifiées qu'ils ajustent à leurs besoins. La finalité est de proposer à l'utilisateur des solutions d'amélioration énergétique de partenaires commerciaux associés à la création de l'outil. Une fois les choix de l'utilisateur saisis, des devis ou autres formulaires de contacts sont proposés pour démarcher ce dernier.

Ces outils de diagnostic, calibrés pour informer les usagers sur le comportement énergétique d'un bâtiment existant ou neuf, permettent de mettre rapidement en lumière les atouts et points faibles d'un bâti. Malheureusement le volet recommandation de solutions d'amélioration énergétique est souvent laissé à l'utilisateur qui doit par lui-même faire sa sélection parmi des bases de données de solutions génériques. Ces bases de données de solutions, quand elles existent, n'intègrent que des caractéristiques énergétiques et financières en laissant de côté de nombreux verrous à lever pour s'assurer de la réelle pertinence de ces solutions. Parmi ces lacunes, nous pouvons citer :

- (1) Les contraintes techniques de mise en œuvre de certaines solutions d'amélioration ne sont pas modélisées (ex : planéité du mur-support pour un procédé d'isolation, type de raccordement des fumées de combustion pour une chaudière...).

¹⁶ Scénarios génériques d'occupation et d'utilisation du bâti

¹⁷ ECS : Eau Chaude Sanitaire

- (2) L'impact de possibles pathologies de l'enveloppe ou d'inconfort des occupants sont peu intégrés aux approches de diagnostic énergétique. Malheureusement les deux thématiques sont intimement liées et ne doivent pas être traitées séparément.
- (3) Les bases de données sont souvent commerciales et prônent de manière plus ou moins directe des marques d'entreprises partenaires. On peut donc légitimement s'interroger sur l'impartialité de ces outils qui ne proposent que les solutions de leurs partenaires, et en aucun cas selon une approche globale.

III.2.3 Constat d'une dérive des utilisations de ces outils

Depuis plusieurs années maintenant, il est souvent constaté que des outils d'évaluation réglementaire sont utilisés, à tort, comme outils d'aide à la conception pour les opérations de construction et de rénovation. La nécessité pour le concepteur de vérifier la conformité réglementaire de son projet avec un outil réglementaire, l'oblige à manipuler « outils de conception » et « outils d'évaluation réglementaire ». Ce doublon, extrêmement chronophage pour les étapes de saisie, contribue à la dérive des utilisations des outils réglementaires. Une autre explication est la nécessité d'utiliser ce type d'outil pour débloquer des labels de performance donnant droit à des subventions publiques (État / régions / localités).

Ce constat est d'autant plus grand lorsque les budgets attribués pour la partie conception d'une opération de construction ou rénovation sont faibles (souvent le cas pour les logements individuels). L'autre explication majeure est la complexité d'usage de certains outils de conception qui nécessitent de nombreuses heures de formations techniques avant d'être capable de réaliser un calcul énergétique adéquate.

III.3 Outils spécifiques à la rénovation de logements

Les méthodes et outils dédiés spécifiquement à la rénovation des logements sont peu nombreux mais ils existent. La plus grande partie se focalise uniquement sur la thématique « Coût-énergie » ; d'autres apportent une valeur ajoutée en traitant des thématiques moins courantes comme la « maintenance » ou le « confort thermique d'été ».

III.3.1 Outils privilégiant les approches technico-économiques

Parmi ces méthodes existantes, nous pouvons citer la méthode *d'analyse des mécanismes incitatifs à la rénovation des logements* développée par les Mines de Paris [2]. La vision proposée se concentre sur une approche purement « incitations financières des pouvoirs publics / gains énergétiques » (avec respectivement, l'utilisation d'un algorithme de calcul en coût global et la méthode DPE-3CL pour le volet énergétique) et montre comment le triptyque « typologies de propriétaires – bouquets de travaux – incitations économiques » peut être optimisé en fonction du profil de l'investisseur et d'une typologie de maison individuelle. Dans cette approche, seule la rationalité économique est mise en avant ; ce qui est un facteur limitant lorsque l'évaluation des impacts multiples d'une rénovation entre dans la balance dans l'identification d'actions d'améliorations énergétiques efficaces et pertinentes pour un décideur.

Dans la même fibre, la méthode ODMIR4, développée pour le constructeur de maisons individuelles Phénix Évolution dans le cadre d'un appel à projets de la Fondation Bâtiment Énergie, a pour but de convaincre des particuliers propriétaires de se lancer dans une opération de rénovation énergétique [51]. Une version adaptée de la méthode DPE-3CL associée à un catalogue de solutions d'amélioration énergétique de partenaires commerciaux permet de chiffrer de manière conventionnelle les futurs gains énergétiques et les réductions d'émissions de GES d'une opération de rénovation ou d'agrandissement de

maisons individuelles du parc Phénix. La force de cet outil réside dans la connaissance détaillée des modes constructifs des maisons Phénix¹⁸ par les concepteurs de l'outil. Pour ce périmètre restreint du parc, il y a peu d'incertitudes et les économies d'énergie annoncées sont relativement fiables.

L'outil de prospection TABULA WebTool [52] développé pour la Commission Européenne permet quant à lui d'exploiter un catalogue important de typologies de bâtiments européens afin d'identifier le potentiel d'amélioration énergétique des parcs nationaux en appliquant en temps réel des méthodes de calcul énergétique issues de normes européennes (standard EN ISO 13790, EN 15316...). La finalité est double : l'amélioration du ciblage des incitations publiques d'aide à la rénovation et une meilleure compréhension des comportements énergétiques des parcs de bâtiments existants. L'utilisation de cet outil est cependant restreinte à des études statistiques à l'échelle des régions. Seule la dimension énergétique est prise en compte et les nombreuses hypothèses de calcul mises en œuvre restent largement contestables lorsque l'analyse redescend à l'échelle d'un bâtiment individuel.

L'ensemble de ces outils, outre le fait qu'ils se limitent à une vision monocritère de la rénovation, ne permet pas d'aider à l'identification de scénarios de rénovation adaptés aux enjeux et spécificités d'une opération réelle de rénovation. Le recours à des typologies représentatives ne sert qu'à rendre plus rapide l'étape de saisie nécessaire auxancements des méthodes de calcul embarquées. L'efficacité des solutions modélisée n'est estimée qu'après avoir lancée des calculs paramétriques sur le ou les bâtiments-type initialement sélectionnés.

III.3.2 Outils apportant des axes de recherche innovants

Le projet ALICE (Améliorer le confort d'été dans l'habitat collectif) [47], développé dans le cadre du programme du projet Bâtiment horizon 2010, permet sur la base de 2700 simulations énergétiques réalisées avec le moteur de calcul réglementaire Th-C-E¹⁹, d'étudier le comportement d'un bâtiment au regard du confort thermique d'été. L'objectif de ce travail de recherche était de mieux appréhender les problèmes de surchauffes estivales dans les bâtiments, d'identifier les situations à risque et de veiller à ne pas dégrader l'état initial lors de la mise en place de stratégies de rénovation énergétique. Il en est sorti un tableur permettant d'obtenir une valeur sur un indicateur de confort pour une stratégie de rénovation d'appartement donnée en fonction d'une dizaine de paramètres d'entrée.

L'outil en ligne *123 Réno*, issu du projet européen MARIE [20], optimise la génération de scénarios d'amélioration énergétique afin de s'assurer que ces derniers atteignent le Facteur 4 en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre associées aux consommations énergétiques des bâtiments. Les calculs énergétiques ont été réalisés en amont sur une vingtaine de typologies d'habitation représentatives du bassin méditerranéen. Une approche par sélection d'enjeux de rénovation permet d'accéder à des fiches pédagogiques expliquant quelles sont les solutions d'amélioration énergétique les plus opportunes.

Enfin l'outil EPIQR, s'oriente plus vers la maintenance technique et la gestion du patrimoine. Développé initialement dans le cadre d'un projet européen et porté en France par le CSTB [53, 54], puis repris et amélioré en Suisse et en Allemagne, cet outil propose une analyse de l'existant et de stratégies d'amélioration du bâti avec un panel de 50 critères de décision rassemblés sous 3 thématiques : aspects économiques (coût global, opérations de maintenance), écologiques (performance énergétique, cycle de vie environnementale,

¹⁸ Maisons sur catalogues.

¹⁹ Moteur de calcul de la RT2005.

sauvegarde des ressources) et socioculturels (confort, santé, accessibilité, sécurité). La multitude des thématiques traitées et la capitalisation de résultats sur des millions de m² de surface de bâtiments traités avec ce modèle en font un outil unique en son genre. Principalement dédié à l'habitat collectif et au tertiaire, la prise en main de cet outil reste réservée à des hommes d'études maîtrisant aussi bien les sciences du bâtiment que celles de l'analyse statistique.

Chacun de ces trois outils montrent un intérêt particulier à suivre et à fusionner avec les précédents. Le premier montre qu'il est possible de penser la rénovation énergétique autrement en prenant comme objectif premier non pas les gains énergétiques ou le temps de retours sur investissement mais plutôt la santé et le confort des occupants. Le second outil met en avant la voie d'une optimisation par objectif pour piloter la génération de bouquets de solutions de rénovation ainsi que l'intérêt d'intégrer des enjeux non énergétiques dans le processus de sélection de solution de rénovation efficace. Le troisième outil montre l'intérêt de l'approche multicritère qui permet à un décideur d'identifier les bénéfices ou contre-performances collatéraux associés à des stratégies préalablement identifiées.

Cette partie de l'état de l'art montre le foisonnement de méthodes et d'outils disponibles sur le marché de l'évaluation de la performance énergétique et de la rénovation de bâtiments. Les premiers sont très nombreux et leur utilisation s'ajuste en fonction du degré de précision recherché, du niveau de qualification de l'utilisateur et du niveau de connaissance connu sur le bâti à étudier. Au niveau du segment spécifique de la rénovation énergétique de logement, les outils actuels sont mal-adaptés. Ils sont généralement des transpositions simplifiées des outils dédiés au marché des logements neufs et se concentrent sur l'évaluation des performances avant/après rénovation. Le sujet de l'aide à la prescription de solutions de rénovation adaptées aux spécificités de l'existant n'est pratiquement jamais traité. Soit les méthodes embarquées dans les outils proposent des scénarios génériques de rénovation permettant de maximiser les gains énergétiques ou de minimiser un temps de retour sur investissement, soit le choix de constituer des scénarios est laissé à l'utilisateur qui doit se débrouiller avec un catalogue de solutions génériques préalablement établi. Enfin trois autres constats sont mis en lumière : 1) l'absence de prise en compte des enjeux de réhabilitation pour piloter l'orientation des travaux d'amélioration proposés ; 2) l'absence d'analyse multicritère sur les impacts associés à n'importe quel choix ; 3) Aucune prise en compte des incertitudes liées à la caractérisation du bâti existant et au résultat attendu.

IV. Approche globale : terminologie et modélisation des performances

Par approche globale, nous entendons approche systémique et multicritère de l'acte de rénovation de bâtiment. « Multicritère » car la rénovation énergétique n'impacte pas seulement la dimension performance énergétique, mais aussi une multitude d'autres aspects performantiels. « Systémique » car la rénovation peut être vue comme un système dans lequel les procédés d'amélioration énergétique interagissent les uns sur les autres, mais aussi avec le bâti existant, les occupants, et l'environnement proche du bâti dans lequel il s'insère.

À travers les deux chapitres précédents, nous avons vu la nécessité d'aborder la rénovation de manière globale en ne se limitant pas à la simple approche « énergie / coût » qui est insuffisante pour convaincre une maîtrise d'ouvrage d'engager des travaux ou assurer la réussite d'une opération. En ce sens, ce chapitre commence par démontrer les intérêts multiples d'une réflexion globale autour de l'acte de rénovation. Ensuite la traversée de l'état de l'art nous amène à mettre en lumière les nombreux indicateurs de performance existant pouvant participer à un processus d'aide à la décision multicritère pour la rénovation de

logements. Enfin, un examen des différentes approches de modélisation des performances est proposé puis discuté.

IV.1 Intérêts de l'approche multicritère

Les intérêts de l'approche multicritère sont multiples et se rapprochent tous des problématiques décisionnelles. Figueira met en lumière dans [55] les trois suivants :

- Évaluation des contre-performances ou/et bénéfiques connexes : L'évaluation monocritère ne permet pas d'identifier les impacts collatéraux associés à un choix. D'où l'intérêt d'une évaluation multicritère qui lève rapidement le risque de laisser passer une contre-performance inacceptable pour un décideur et qui donne l'opportunité de juger la pertinence d'un choix en ne se basant pas uniquement sur un critère dont l'évaluation pourrait être biaisée (principe de distribution des risques liés à l'évaluation des performances).
- Obtention d'informations complémentaires initialement non identifiées comme déterminantes. L'approche multicritère permet de ne pas négliger certains aspects jugés importants mais non déterminants. À la manière d'une grille d'analyse, elle permet de se poser les bonnes questions et d'évaluer certains compromis.
- Une aide à la comparaison : L'évaluation multicritère facilite la comparaison de scénarios ayant des performances analogues sur le ou les critères considérés comme les plus importants pour un décideur en utilisant d'autres critères pour les départager.

IV.2 Notion d'indicateurs de performance

Dans ce sous-chapitre nous nous intéressons en premier lieu, aux notions d'indicateurs de performance et de critères de décision. Ensuite, l'état de l'art se focalise sur les indicateurs couramment utilisés dans l'évaluation des performances multicritères de bâtiments. Enfin, un panorama des principaux référentiels nationaux et internationaux sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments est présenté.

IV.2.1 Indicateurs de performance et critère de décision

Un indicateur est un paramètre ou une valeur construite à partir de paramètres donnant des informations synthétiques sur un système ou un phénomène. Il peut être à vocation descriptive, ou bien participer à l'élaboration d'un jugement, d'une prise de décision. Maystre et Bollinger dans [56] le définissent comme un ensemble de données de natures différentes, agrégé en une caractéristique plus synthétique et facile à la compréhension. La notion d'indicateur est pour l'IFEN dans [57] quelque chose qui simplifie l'information en provenance de phénomènes complexes et qui la quantifie de manière à la rendre significative à l'échelle désirée. Il peut être qualitatif ou quantitatif, être définie sur une échelle de valeurs discrètes ou continues, fermée ou ouverte²⁰. Un indicateur peut servir à divers usages : évaluer une situation à un moment donné, évaluer la progression d'un système à travers le temps (évolution d'une performance), comparer plusieurs actions dans une logique de prise de décision.

Le terme indicateur peut donc être défini de différentes façons, chaque organisation le définissant à sa manière, selon son utilisation d'après Moura [58]. Toutefois ces définitions sont en général proches et gravitent autour de la notion d'aide au jugement, d'aide à la décision.

²⁰ Exemple d'échelle ouverte : Intensité d'un séisme sur l'échelle de Richter

Un critère, en génie industriel, est considéré comme le plus petit élément dans lequel un problème peut être décomposé. Contrairement à la notion d'indicateur, le critère n'est pas issu d'informations agrégées. En sciences décisionnelles, les critères servent à comparer des actions potentielles dans une problématique de prise de décision. Comme les indicateurs de performance, ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Vanderpooten fait la distinction entre *attribut* et *critère*. Le premier est une caractéristique permettant de décrire des actions, le second doit permettre de mesurer les préférences du décideur vis-à-vis de chaque action, relativement à un point de vue [59]. Roy considère que les critères utilisés pour l'aide à la prise de décision doivent être exhaustifs, c'est-à-dire couvrir l'ensemble des préférences du décideur ou axes décisionnels d'un problème, être en cohérence avec la problématique, mais sans être redondants [60]. En ce sens, cette définition de critères de décision suppose que les valeurs pouvant être prises pour ces derniers doivent être définies sur des échelles de valeurs ordinales.

Dans la suite de ce document, ces notions d'indicateurs de performance et de critères de décision fusionnent et seront utilisées autant pour évaluer de manière simple et synthétique les différents aspects que peut revêtir l'idée de performance, que pour argumenter une prise de décision.

IV.2.2 Indicateurs de performance dans le cadre de la rénovation de bâtiment

La littérature scientifique foisonne d'études sur les indicateurs utilisés pour évaluer la performance des bâtiments [15, 61]. Trois grandes familles thématiques ressortent : les aspects énergétiques et environnementaux, les aspects économiques, et les aspects sociétaux. Les deux premières, regorgeant d'indicateurs quantitatifs souvent calculés à partir de codes de calculs plus ou moins détaillés, la dernière, faisant intervenir le ressenti des usagers d'un bâtiment, se base le plus souvent sur une approche qualitative construite à partir de questionnaires orientés [22].

La liste des indicateurs de performance présentés ci-après est loin d'être exhaustive. L'intérêt pour le lecteur est d'identifier, de manière synthétique, quels sont les aspects performantiels les plus utilisés par la communauté scientifique dans le cadre de l'évaluation des performances de bâtiment.

IV.2.2.1 Aspects énergétique et environnemental :

Les indicateurs de performance énergétiques sont ceux les plus utilisés en France dans le secteur de la construction du bâtiment. Depuis les chocs pétroliers dans les années 70 (1973 et 1979), l'avènement des réglementations thermiques et l'apparition de la contrainte énergétique, de nombreux travaux, outils et méthodes ont été développés pour chiffrer la performance énergétique. Côté indicateurs, les approches d'évaluation de la performance les plus courantes sont :

- les besoins en chauffage et de refroidissement [exprimés en $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$] ;
- les consommations annualisées ou mensualisées en chauffage et refroidissement, [exprimées en énergie primaire ou finale] ;
- les consommations énergétiques primaires totales rassemblant les consommations en énergies blanches (associées à la vie en œuvre d'un bâtiment) et les énergies grises (associées aux autres étapes du cycle de vie environnemental d'un bien : fabrication, transport, recyclage et fin de vie) [exprimés en MJ ou en $\text{kWh}_{\text{EP}}\cdot\text{m}^{-2}$ sur une durée de vie préétablie] ;

- l'efficacité énergétique des systèmes actifs (ex : rendements thermiques et électriques nominaux, COP, EER, etc.).

Les deux premiers sont des indicateurs de performances définis à l'échelle du bâti et sont calculables à l'aide d'outils de simulations énergétiques. Le troisième requiert le couplage d'outils de simulation énergétique avec un outil d'analyse de cycle de vie environnemental (pour le volet *énergie grise*). Enfin, le dernier représente à la fois la performance à l'échelle d'un système actif et les caractéristiques techniques constructeurs pour ces mêmes systèmes (évalués in situ et/ou en laboratoire).

Les indicateurs environnementaux, conçus à l'origine dans le secteur industriel pour quantifier les impacts sur l'environnement des chaînes de fabrication et d'approvisionnement de biens manufacturés, permettent de quantifier le coût environnemental d'une opération de construction ou de rénovation. Ils peuvent représenter :

- Le potentiel de changement climatique [exprimé en $\text{kg}_{\text{eq}}\text{CO}_2$];
- le potentiel d'acidification atmosphérique [exprimé en $\text{kg}_{\text{eq}}\text{SO}_2$];
- les consommations en eau [exprimées en m^3];
- la production de déchets [exprimée en kg];
- la consommation en énergie grise [exprimée en MJ ou en $\text{kWh}_{\text{EP}}\cdot\text{m}^{-2}$ sur une durée de vie préétablie].

Chacun de ces indicateurs peut être évalué aussi bien à l'échelle des procédés (à partir de base de données d'état, comme les FDES/EPD²¹, ou de fabricants), qu'à l'échelle bâtiment à l'aide d'outils d'analyse de cycle de vie environnementaux (EQUER [62], ELODIE [33]) pour obtenir certains labels de performance.

IV.2.2.2 Aspects économiques

Cette gamme d'indicateurs est couramment utilisée pour évaluer la faisabilité d'un projet ou départager des choix techniques au regard de l'aspect financier. Ces indicateurs sont soit des coûts directs, soit des valeurs transformées rajoutant des informations utiles dans une logique de prise de décision (le plus souvent avec une vision moyen/long terme).

Les coûts directs

- les coûts d'investissement, exprimés en k€ et intégrant les coûts des fournitures et de mises en œuvre ;
- les coûts annuels d'exploitation, exprimés en €/an (coûts de fonctionnement et de maintenance, coûts des énergies consommées ou des économies d'énergies associées à une intervention sur le bâti, coûts des assurances, coûts de remplacements programmés, etc.)

²¹ FDES : Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire / EPD : Energy Product Declaration.

Les indicateurs indirects (pouvant tenir compte de l'actualisation des coûts intégrés)

- Le Temps de Retour sur Investissement (TRI), exprimé en année, il exprime le temps nécessaire pour rentabiliser une opération en divisant le coût d'investissement d'une opération par les économies d'énergies annualisées engendrées ;
- La Valeur Actualisée Nette des investissements (VAN) permettant de juger de la rentabilité d'un projet (cet indicateur compare le coût du flux de trésorerie annuel d'une opération sur une durée déterminée au placement équivalent de l'investissement nécessaire à cette opération) [63];

Taux de Rentabilité Interne (TRI) indicateur similaire à celui de la VAN (il correspond au taux d'actualisation²² pour lequel la VAN d'un projet devient nulle.) ;

- Coût Global sur le cycle de vie du bâtiment (*Life Cycle Cost*) [63], il intègre tous les coûts directs souhaités et tient compte de l'actualisation des coûts, de la maintenance et du remplacement des composants du bâti ayant une durée de vie inférieure à celle du bâtiment.

IV.2.2.3 Aspects sociaux et sociétaux :

Considérés par certains comme secondaires car souvent subjectifs ou/et « non chiffrables » par des méthodes numériques classiques, les aspects sociétaux ramènent le bâtiment à sa vocation première : assurer la qualité de vie de ses occupants. De nombreux indicateurs ont été proposés, par la communauté scientifique, les réglementations du bâtiment, et les labels de performance, pour évaluer les impacts sociaux et sociétaux d'une opération de construction ou de rénovation.

Indicateurs chiffrés

- le confort hygrothermique d'hiver ou d'été peut être évalué par de nombreuses méthodes de calcul basées sur l'évolution des températures opératives²³ au cours d'une période de temps définie. Les deux méthodes les plus représentatives sont :
 - la méthode de Fanger, appelée également la méthode du Predicted Mean Vote / Percentage of Dissatisfaction (PMV/PPD) [64],
 - la méthode du confort adaptatif, basée sur le diagramme de Brager [65].

À partir de ces méthodes, le nombre d'heures cumulées en deçà ou au-dessus de la zone de confort peut être calculé et illustre alors le niveau d'inconfort thermique associé aux scénarios testés.

- le confort lumineux est fixé en France par la norme NF X35-103 qui établit les valeurs-cibles à atteindre ou valeurs-seuils à respecter pour différentes grandeurs (UGR, Ra, éclairements) [66]. Un indicateur qui a plus de sens pour l'occupant, est l'autonomie en lumière du jour (Daylight Autonomy DA) qui est défini comme étant le pourcentage des heures occupées par an, où le niveau minimum d'éclairément requis peut être assuré par la seule lumière naturelle. L'indicateur appelé Autonomie en Lumière du Jour Utile

²² Taux d'actualisation : c'est un paramètre économique utilisé pour déprécier des flux futurs et déterminer leur *valeur actuelle*, c'est à dire leur valeur à la date d'aujourd'hui.

²³ $T^{\circ}_{opérative} = (T^{\circ}_{air\ intérieur} + T^{\circ}_{parois}) / 2$

(UDI) va dans le même sens mais intègre le risque de niveau d'éclairement trop élevé qui peut être associé à un inconfort des occupants. [67]

- le confort acoustique, souvent modélisé par des performances à l'échelle des composants d'enveloppe ou des pièces de vie, on y dégage trois types de grandeur évaluant la performance d'une construction :
 - Isolation par rapport aux bruits extérieurs ;
 - Isolement acoustique standardisé pondéré entre deux locaux ($D_{nT,A}$ en dB)
 - Isolement acoustique standardisé pondéré entre l'extérieur d'un bâtiment et un local ($D_{nT,A,tr}$ en dB)
 - indice unique d'affaiblissement acoustique pondéré ($R_w(C;Cr)$ en dB)
 - Isolation par rapport aux bruits aériens intérieurs (bruits équipements) ;
 - Isolation par rapport aux bruits de chocs;
 - niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé $L_n T_w$
 - Indice d'efficacité (ΔL_w)
- la Qualité d'Air Intérieur pouvant être évaluée par de nombreux indicateurs qualifiant une ambiance de multiples façons (concentrations de polluants, de particules, d'odeurs)
 - Perméabilité à l'air de l'enveloppe chauffée (valeur mesurée sur une opération terminée : n_{50} ou I_4 en $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)
 - Taux d'humidité relative (HR en %)
 - Concentration CO_2 (ppm/ m^3)
 - Concentration tCOV (ppb ou ppb/ m^3)
 - Concentration en particules fines (PM 2,5, PM 10, etc.) (ppm ou ppb/ m^3)
 - Pollution olfactive de l'air (Olf et Décipols) (échelles de valeurs spécifiques)

Indicateurs difficilement chiffrables avec des méthodes consensuelles

- la qualité d'usage au quotidien : exprimant l'aisance avec laquelle une personne peut interagir avec le bien ;
- la facilité d'entretien et de maintenance : exprimant la facilité d'entretien ou la facilité à trouver les personnes compétentes aux maintiens d'équipements énergétiques anciens ou récents ;
- Sécurité au feu : La vérification du niveau d'inflammabilité des matériaux (Euroclasses de la Norme EN 13501 [68]), le respect des règles C+D [69], peuvent aider à évaluer le comportement au feu d'un bâti. Il est néanmoins difficile de « noter » la performance globale d'un bâti sur ce point.
- Durée des travaux : ils peuvent être évalués de manière rationnelle en fonction d'opérations antérieures similaires et par lois de proportionnalités.

Comme présenté, de nombreux indicateurs de performance existent et sont couramment utilisés pour évaluer la performance d'une construction ou d'un sous-système de construction. La plupart des indicateurs listés dans cette section sont issus de sorties de codes de calcul requérant une quantité de données d'entrées importantes pour être évalués. Lors de la conception amont d'une opération de rénovation, les nombreuses informations nécessaires à l'alimentation de ces codes ne sont généralement pas définies. Leur utilisation est par conséquent discutable dans une logique orientée plus vers l'aide à la constitution de scénarios d'amélioration que d'évaluation chiffrée des performances.

IV.2.3 Référentiels évaluant la performance (HQE, BREEM, LEED, ...)

De nombreux référentiels ou standards d'évaluation de l'efficacité environnementale des bâtiments existent à travers le monde. Parmi ces derniers, nous pouvons mentionner les démarches HQE²⁴ (France), LEED²⁵ (USA), BREEAM²⁶ (Grande Bretagne), DGNB²⁷ (Allemagne). Tous intègrent une dimension de performance énergétique forte, indissociable des aspects environnementaux. Principalement destinées aux bâtiments neufs, ces certifications de performance sont également appliquées dans des projets de réhabilitations lourdes. Les cibles mises en avant dans ces référentiels peuvent aider à la mise en place d'un système d'indicateurs de performance, point déterminant lorsque l'approche globale est recherchée.

Sur la thématique particulière de l'évaluation de la performance énergétique, de nombreux labels existent pour le neuf (HPE²⁸ – avec ses différents niveaux – HPE 2005, THPE 2005, HPE EnR 2005, THPE EnR 2005, BBC Effinergie 2005), PassivHaus, Minergie, Promotelec) et la rénovation (HPE Rénovation – avec ses deux niveaux – HPE Rénovation 2009 et BBC Effinergie Rénovation 2009, Promotelec Rénovation). Ces différents niveaux de labels ne sont délivrables que dans le cadre d'une certification plus globale, portant non seulement sur la performance énergétique, mais également sur la qualité globale du bâtiment, et ce uniquement par le biais d'organismes sous convention avec l'État français.

D'autres méthodes et outils s'orientent plus vers la maintenance et la gestion du patrimoine. La méthode EPIQR²⁹ base son analyse sur les aspects économiques (coût global, opérations de maintenance), écologiques (performance énergétique, cycle de vie environnementale, sauvegarde des ressources) et socioculturels (confort, santé, accessibilité, sécurité).

L'ensemble des méthodes proposant des labels destinés à communiquer sur la performance des ouvrages construits ou rénovés sont calibrés pour répondre à des enjeux nationaux et internationaux mais ne permettent pas de répondre à un besoin spécifique exprimé par une maîtrise d'ouvrage incarnée par un propriétaire de maisons individuelles. Ils permettent de proposer un panel de critères à évaluer en s'aidant aussi bien d'outils de simulation que de grilles d'analyses, mais reste le problème d'appropriation de ces outils de certification et d'intégration de préférences spécifiques à chaque projet pour en faire un usage d'aide à la décision.

²⁴ HQE® : Haute Qualité Environnementale

²⁵ LEED® : Leadership in Energy and Environmental Design

²⁶ BREEAM : BRE Environmental Assessment Method

²⁷ DGNB : Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

²⁸ Ces labels ne sont délivrables que pour des bâtiments soumis à la RT2005

²⁹ EPIQR : Energy Performance, Indoor environmental Quality and Retrofit method (pour le logement collectif)

IV.3 Modélisation de la performance

Dans ce sous-chapitre sont présentés les grands types de modélisation de systèmes ainsi que les types de modélisation d'indicateurs.

IV.3.1 Approches Top-Down et Bottom-Up

La modélisation d'un système peut se faire par deux approches distinctes : l'approche descendante « Top-Down », l'approche ascendante « Bottom-Up ». Nous allons brièvement décrire leur processus, pour se concentrer par la suite sur la seconde.

- *Approche descendante « Top-Down »*

Cette approche, appliquée au monde du bâtiment, consiste à aborder la modélisation de l'échelle la plus globale (parc de bâtiments, bâtiment), puis de la détailler afin de « redescendre » jusqu'à l'échelle des « composants » si la disponibilité des données le permet. Ce type de modélisation est souvent utilisé dans une optique de prospection en manipulant des facteurs portant sur le progrès technologique (taux de pénétration des technologies, effets de saturation...) ou d'analyse économétrique (évolution des prix des énergies, PIB, taxe carbone...) [22] mais aussi dans la modélisation des réseaux urbains [70].

- *Approche ascendante « Bottom-Up »*

À l'inverse de la précédente, cette approche nécessite un niveau détaillé d'informations. Elle consiste, à partir de l'échelle d'information la plus fine, à « remonter » vers des échelles supérieures d'abstraction (bâtiment, parc de bâtiment) afin de manipuler des indicateurs globaux plus synthétiques. Par exemple, les outils d'analyse de cycle de vie (LCC et LCA) utilisent ce principe. Le processus de transition entre la première échelle et les autres peut se faire soit par une approche statistique, soit par une approche physique [71].

- L'approche statistique repose essentiellement sur les techniques de régression (raisonnant à partir de factures énergétiques, ou d'impôts sur la taxe d'habitation dans notre cas).
- L'approche physique quant à elle se base sur les nombreuses données associées à la description performantielle d'un bâtiment : métrés, rendements des équipements, caractéristiques des éléments d'enveloppe, scénarios utilisateurs...

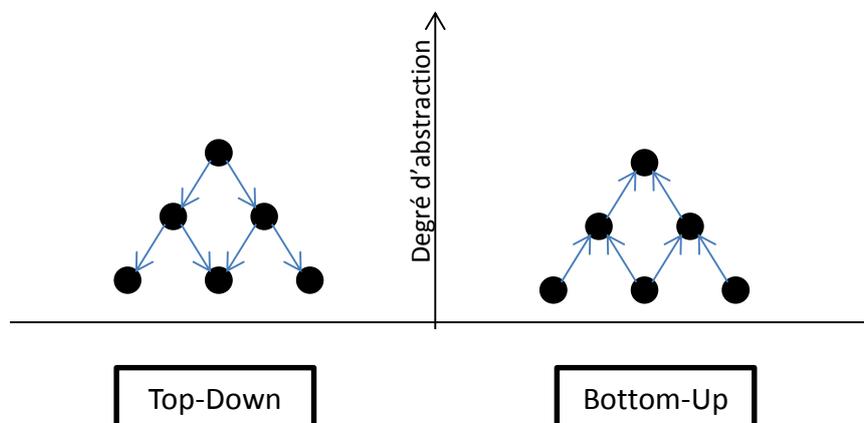


Figure 9 – Schéma illustrant les principes de modélisation "Top-Down" (à gauche) et "Bottom-Up" (à droite)

Le bâtiment, notre domaine d'étude, est constitué d'un nombre important de composants techniques qui, une fois assemblés de manière cohérente, permettent de répondre aux besoins fonctionnels d'un bâtiment (nous isoler des intempéries, nous procurer un lieu de vie ou de travail confortable, être fonctionnel et sans danger...). Les données techniques disponibles sont en général nombreuses (même si souvent incomplètes) et les connaissances métiers de la rénovation énergétiques sont généralement associées aux composants techniques et à leur mode d'assemblage et d'intégration dans le bâti.

IV.3.2 Approches quantitative et qualitative

L'évaluation de la performance systémique d'une opération de construction ou de réhabilitation, se heurte au constat suivant. D'un côté, nous avons une richesse d'informations hétérogènes à l'échelle du produit/procédé³⁰ (matériaux, système constructifs, systèmes énergétiques) qui représentent le niveau de description le plus fin. De l'autre, une poignée d'informations agrégées à l'échelle du bâtiment (critères ou indicateurs de performance) et souvent à forte valeur ajoutée, utiles pour l'évaluation globale d'une situation dans un but d'aide à la prise de décision³¹.

Un possible passage de l'un à l'autre peut se faire, via une approche bottom-up, par des modèles de calcul numériques (ex : consommations énergétiques), analytiques (ex : coût global, empreinte environnementale) ou statistiques, au prix de temps de calcul et de saisie proportionnels au niveau de précision souhaité.

Cependant, pour évaluer certains indicateurs faisant appel à des jugements subjectifs (confort, qualité d'usage, accessibilité...) ou d'appréciations expertes (santé, situations à risques...), les approches citées précédemment existent (confort adaptatif, PMV/PPD, AMDEC, HAZOP...) mais ne sont parfois pas les plus adaptées car elles nécessitent une forte disponibilité de données techniques. Il est possible alors de se tourner vers des modélisations qualitatives.

- *Focus sur l'approche quantitative*

L'approche quantitative consiste à transformer des données d'entrées collectées lors d'un diagnostic, d'un recensement, de mesures, en sorties représentant une information nouvelle, souvent synthétique et généralement difficilement mesurable de manière directe (pour des raisons de coûts d'instrumentation, de délais). Le passage des entrées aux sorties se fait par une modélisation numérique, analytique ou statistique d'un système à étudier. Les modélisations quantitatives permettent de manipuler des données essentiellement numériques, exprimées dans des formats différents (ex : températures, tailles de populations, données économiques...). La quasi-totalité des outils de modélisation des performances énergétiques des bâtiments utilisent cette approche (outils réglementaires, simulations thermiques dynamique, CFD...).

- *Focus sur l'approche qualitative*

L'approche qualitative est souvent décrite comme un formalisme de modélisation non numérique destiné à représenter les connaissances du sens commun relatives à la physique d'après Forbus dans [72]. Un modèle qualitatif utilise une représentation souvent abstraite de données quantitatives. Chaque variable est décrite en utilisant une série ordonnée de points et d'intervalles appelée espace qualitatif. Les points et intervalles sont généralement choisis pour décrire uniquement les aspects pouvant impacter le comportement des systèmes étudiés [73]. Les outils utilisant les

³⁰ Ces performances sont évaluées par organismes certificateurs, industriels, ou jugements d'expert (de manière comparative et pour une même réponse à un besoin fonctionnel).

³¹ Ou des évaluations réglementaires, labellisations...

technologies de type – systèmes experts, réseaux bayésiens, ou encore les systèmes de benchmarking – sont particulièrement adaptés à ce type d'approche.

Dans ce chapitre, nous avons abordé successivement les notions d'indicateurs, de *référentiels qualité*, de familles de modélisation. Le tout dans le but de faire une analyse prospective des méthodes et outils disponibles pour concevoir par la suite un outil d'aide à la rénovation de logement, doté d'un panel d'indicateurs de performance structuré, nécessaire à l'évaluation globale de chaque scénario d'amélioration énergétique proposé. Deux types de difficultés émergent de cette analyse. La première est la capitalisation des nombreuses données nécessaires à l'alimentation d'un modèle d'évaluation pour attribuer une valeur à un indicateur de performance. Cette étape peut, en fonction du modèle retenu, devenir extrêmement chronophage voire inaccessible. La seconde est la formalisation de ces informations dans un système d'évaluation multicritère structurée, clair et homogène.

V. L'incertitude dans les systèmes de modélisation de l'information

La notion d'incertitude est vaste et englobe les domaines d'études s'intéressant aux thématiques de la prise de mesures, la modélisation de la connaissance, l'aide à la décision. Une incertitude peut être associée à une valeur quantitative (mesures, statistiques) ou qualitative (avis d'experts, opinion d'utilisateurs), connue ou insoupçonnée, associée à des événements déterministes (propriétés intrinsèques d'un matériau) ou aléatoires (dispersion, variabilité d'un phénomène : séismes, loteries...). Elle est associée à une démarche prospective lorsque l'on souhaite décrire les futurs possibles afin d'aider la prise de décision aujourd'hui d'après Jovenel [74], et reste une notion qui évolue au cours du temps, en fonction des connaissances que nous avons, de sa typologie, de son environnement d'après Martin [75].

Dans l'usage courant, la définition de l'incertitude se limite souvent à l'erreur de la mesure technique, associée à une mauvaise calibration d'un appareil de mesure. On parle également d'incertitudes lorsqu'il s'agit de réaliser un choix, lorsque plusieurs options s'offrent à nous. Dans la littérature, parmi les différentes définitions apparaissant, ce sont les notions de modélisation de la connaissance et de la décision qui reviennent le plus souvent. Voici ci-après quelques définitions représentatives :

- « L'incertitude pourrait se définir comme l'absence de capacité à caractériser avec précision une situation, un résultat ; elle peut être aussi l'impossibilité d'établir un résultat déterminé dans un contexte décisionnel. » [76]
- « Souvent réduite à la notion d'erreurs sur la mesure, l'incertitude (quantitative) peut représenter l'imprécision ou le manque d'information, de fiabilité, de crédibilité (aspects qualitatifs). » [75]
- « Elle exprime un doute sur la validité d'une connaissance. » [77]

De ces définitions apparaissent les notions d'imprécision, d'incomplétude (manque d'information) et d'inexactitude (erreur). En associant les diverses informations collectées sur le sujet dans la littérature, une première taxonomie de l'incertitude peut se dégager (Figure 10).

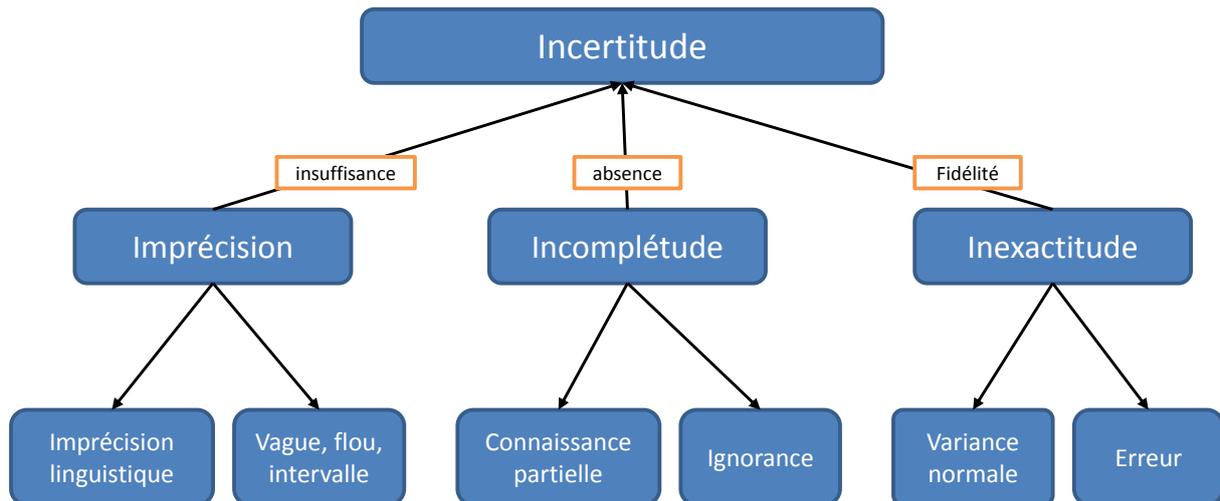


Figure 10 – Taxonomie de l'incertitude

Par cette arborescence, l'incertitude peut être assimilée à une imperfection de l'information. Cette notion est développée par Tacnet [78] qui replace ces imperfections dans le contexte de l'aide à la décision.

V.1 Les différents types d'incertitude

Dans le secteur de la construction, la littérature montre que la gestion des incertitudes n'est pas présente dans les pratiques des acteurs. L'approche conventionnelle consiste à surdimensionner les installations énergétiques [79], ou à appliquer un coefficient de sécurité pour les structures. Cette vision est réductrice ; il convient alors d'exposer les principales familles typologiques de l'incertitude pour se faire une idée de leurs champs d'application.

V.1.1 Les incertitudes non prises en compte

La conscience de l'incertitude

L'incertitude peut être passive dans la mesure où l'on ne sait même pas qu'elle existe (hypothèses de jugement présumées fiables, non connaissance d'un domaine d'étude spécifique). Ce cas de figure ne sera pas abordé dans cette étude ; en effet on ne peut pas réduire ou lever une incertitude sur un phénomène que l'on ne connaît ou comprend pas. Dans le cas opposé, lorsqu'on est capable d'identifier la source, on essaiera de la comprendre et de la gérer. Il est à noter que l'influence de ce type d'incertitude peut se traduire dans certaines circonstances par un risque inévaluable lorsqu'une décision doit être prise.

La variabilité des phénomènes

Certains phénomènes sont supposés aléatoires ou subissent une variabilité trop importante (tirage de numéros de loterie ou distribution spatio-temporelle du vent sur un aéroport par exemple) ; dans ce cas les incertitudes qui leur sont associées ne peuvent être réduites, il faudra se contenter de les prendre en considération dans les éventuels modèles qui les intègrent. Parfois une distribution de probabilité illustrant un échantillon statistique représentatif de l'évènement à modéliser peut être réalisée.

V.1.2 Les quatre dimensions de l'incertitude

En excluant les cas précédents, l'incertitude peut revêtir plusieurs dimensions ; un article de l'UVED [80] propose le classement suivant : incertitudes techniques (inexactitude),

méthodologiques (manque de fiabilité), épistémiques (ignorance), et sociales (robustesse sociale).

L'incertitude de manière générale est associée à la notion d'erreur de calcul ou de variabilité d'un phénomène (précision de capteurs, dispersion des données). Elle représente souvent l'intervalle de confiance sur la précision d'un résultat. Ce dernier peut être issu de mesure directe ou d'une méthode de calcul (résultat d'une modélisation). Cette vision se limite à l'**incertitude technique**, traduisant globalement une inexactitude du résultat.

Dans les méthodes de calcul et de modélisation de la connaissance, une seconde dimension de l'incertitude apparaît, l'**incertitude méthodologique**. Le besoin de modéliser un phénomène, passe par la pose d'un nombre d'hypothèses plus ou moins important. Chacune d'elles possède un domaine de validité précis qui est, habituellement, mal connu. Cette dimension illustre un manque de fiabilité.

La connaissance d'une situation peut être nulle, partielle, ou manquer de précision. On parlera alors d'**incertitude épistémique** associée aux imperfections de la connaissance. Dans cette dimension, Curt et Boissier proposent quelques définitions de ces imperfections de la connaissance appliquées à l'évaluation de la performance structurelle de barrages [77] (ces notions sont reprises dans la taxonomie de l'incertitude épistémique (Figure 10) :

- *L'imprécision* : elle est associée à un énoncé approximatif de la connaissance, une difficulté à l'exprimer clairement, soit parce que les données numériques sont mal connues, soit parce que des termes du langage sont utilisés pour qualifier, de façon vague, une caractéristique du système. Par exemple « un léger tassement ».
- *Incomplétude* : qui est l'absence de connaissances ou l'existence de connaissances partielles. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements (plans, documents) ou à un problème au moment de la prise de données (capteur en panne).

Enfin la dimension sociale de l'incertitude est importante. Un manque de reconnaissance d'une étude scientifique par le public peut apparaître si ce dernier juge l'analyse ou l'évaluation de la situation comme confuse ou biaisée car elle ne repose pas sur des hypothèses tangibles et compréhensibles. Un effort de transparence et de communication est nécessaire afin de réduire ces incertitudes sociétales. On parlera de « **robustesse sociale** ».

Ces quatre dimensions de l'incertitude – technique, méthodologique, épistémique et robustesse sociale proposés par l'UVED [80] – montrent l'étendu de la portée de l'incertitude dans son approche globale. Ce découpage n'est pas fermé, et les différentes incertitudes rencontrées lors d'une situation peuvent appartenir à plusieurs dimensions, voir évoluer au cours du temps. On peut également distinguer les incertitudes quantitatives (techniques), limitées aux données et aux paramètres, des incertitudes qualitatives, appartenant plutôt aux réflexions sur le manque de fiabilité, la connaissance et la robustesse sociale.

V.1.3 La gestion de l'incertitude

L'incertitude dans un processus de modélisation de la connaissance peut s'exprimer à deux niveaux : la propagation de l'incertain (manque de données, imprécisions, erreurs...) sur les informations transitant dans des modèles de calcul jusqu'à leurs sorties sous la forme d'indicateurs, et l'appréciation du risque dans la définition d'un choix (comment doit-on modéliser l'incertitude pour quelle permette à un individu de juger au mieux une situation).

Le manque de connaissances : incertitudes et imprécisions épistémiques

Le manque de connaissance peut être réduit, voir dans certains cas levé. Les incertitudes qui lui sont associées sont préjudiciables lorsqu'elles impactent une démarche prospective d'aide à la décision. L'ignorance, l'incomplétude, l'imprécision sont des facteurs qui doivent être traités le plus en amont possible lors d'une opération de choix. Lorsque le manque d'une information est réalisé, deux options s'offrent au décisionnaire : juger que cette information n'est pas importante car elle n'aura pas d'impacts – a priori – sur la décision, ou rechercher les éléments de réponse à ce manque (documentation, échanges avec des professionnels, utilisation d'outils).

Les indicateurs, une source d'incertitudes supplémentaires

Les incertitudes liées à l'utilisation d'indicateurs (performance énergétique, indice de confort, échelle de prix...) peuvent provenir de diverses sources. Pour ceux représentants des données quantitatives, l'idéal est de pouvoir utiliser directement des données brutes (mesures *in situ*) car les incertitudes se limiteraient : aux erreurs systématiques sur les appareils de mesures, celles liées à l'opérateur, et celles associées au protocole de mesures. Par exemple, les métrés dans la caractérisation du bâtiment ou la mesure des débits de systèmes de ventilation en fonctionnement nominal.

Cependant la plupart du temps, les mesures brutes ne suffisent pas à matérialiser ce que l'on souhaite. La solution est alors de modéliser les critères demandés en indicateurs par l'utilisation de méthodes de calcul (fonctions logiques, équations mathématiques, statistiques, empiriques, etc.). Là, entre en jeu la propagation des incertitudes liées aux données, au périmètre d'application du modèle de calcul, mais aussi liées aux hypothèses présumées comme valides par l'expert qui les pose (retours d'expérience, documentation).

La prise de risque, une notion subjective

Doit-on se fier uniquement à des modèles de calcul, des algorithmes mathématiques pour évaluer une situation ? Parfois oui, mais la plupart du temps la recherche de précision sur une information quantitative construite à partir de nombreuses connaissances incertaines ne suffit pas. L'expertise qualitative d'une situation par un expert permet de pallier partiellement les limites des modèles classiques en intégrant les retours d'expériences et des avis techniques.

V.2 Les représentations de l'incertitude

L'incertitude peut se présenter à l'utilisateur final, au travers d'indicateurs, de différentes façons. Les plus courantes sont les suivantes :

- **Indice de confiance ou de fiabilité** (ex : météo) : de la forme d'une note sur une échelle réduite de valeurs, elle permet de traduire un niveau de confiance en fonction des différentes incertitudes et imperfections de l'information rencontrées préalablement dans le processus d'évaluation.
- **Intervalle de confiance** : sous forme de valeurs limites minimale et maximale entre lesquelles le résultat recherché est présent avec certitude (à 90 %, 95 %, voire 99 % près).
- **Marge de sécurité (coefficient de sûreté)** : souvent utilisées quand il s'agit de dimensionner des structures porteuses, les marges de sécurité permettent de s'assurer que l'installation remplisse son rôle, même si les conditions d'utilisation nominales sont en deçà de ce qui a été prévu, afin de couvrir les situations exceptionnelles ou improbables (surpoids dû à la neige sur un toit par exemple).

- **Distribution de probabilité** : un résultat peut être donné sous la forme d'une distribution de probabilité afin de couvrir tout le champ du possible et laisser l'utilisateur final faire son choix.
- **La mise en place d'alternative(s)** : la traduction du doute, de l'incertitude, de l'expert vis-à-vis des risques ou de la bonne évaluation de la performance globale d'une solution, peut se faire par la mise en place d'une alternative, un plan B, pour palier à toutes éventualités non connues ou non prises en compte dans l'analyse. Ce type de raisonnement n'est pas une représentation de l'incertitude en soit, mais plutôt une stratégie de préparation à la crise visant la réduction d'un risque.

V.3 Les méthodes d'analyses et de propagation de l'incertain dans les modèles

Il faut faire la distinction entre les méthodes d'*analyse de sensibilité* et d'*analyse des incertitudes*. Les premières ont pour finalité d'observer la contribution des paramètres d'entrée d'un modèle à la variation des sorties du modèle, les secondes quant à elles permettent de caractériser la réponse d'un modèle dans un intervalle de confiance en connaissant les incertitudes sur les paramètres d'entrées d'après Spitz [81]. Nous allons à travers cette partie de l'état de l'art, nous intéresser à ses deux notions ainsi qu'aux méthodes de modélisation possibiliste et probabiliste de l'incertitude sur les paramètres d'entrées jugés sensibles. Ensuite nous ferons le point sur les autres méthodes de propagation de l'incertitude, notamment la logique floue et les probabilités bayésiennes.

V.3.1 Analyses de sensibilité

L'analyse de sensibilité (consiste à étudier comment des variations sur les paramètres d'entrée d'un modèle engendrent des variations sur les paramètres de sortie. L'analyse de sensibilité permet d'améliorer la compréhension du comportement d'un modèle par l'étude des influences des paramètres d'entrée sur la ou les sorties visées. Ce type d'analyse est souvent utilisé sur des modèles de calcul assimilés à des « boîtes noires ». Les résultats d'une analyse de sensibilité peuvent servir à : identifier les paramètres les plus influents, simplifier des modèles en transformant les paramètres les moins influents en constantes, calibrer la plage de fonctionnement d'un modèle, mieux comprendre les corrélations entre les paramètres.

Il existe trois catégories de méthode d'analyses de sensibilité applicables en fonction du niveau de complexité et du domaine d'application visé d'après Jacques dans [82] :

- **les méthodes de screening** : elles permettent l'analyse qualitative des variables d'entrée sur les sorties d'un modèle. L'objectif est d'identifier rapidement les paramètres les plus influents sur les sorties étudiées afin de réduire leur nombre lors d'études plus approfondies [83, 84].

La plus connue des méthodes de screening est la méthode de Morris [85, 86]. Elle consiste à répéter r fois un plan OAT³² aléatoirement dans l'espace des entrées, en discrétisant chaque entrée en un nombre convenable de niveaux (dépendant du nombre r de répétitions que l'on veut faire). Aléatoirement signifie que l'on tire au hasard le point de départ de l'expérience OAT et la suite de directions pour lesquelles on évalue séquentiellement les nouvelles expériences (voir Figure 11). La méthode de Morris permet alors de classer les variables d'entrée en trois catégories :

³² OAT : One At Time, signifie que l'on fait varier une seule et unique variable d'entrée à la fois, pour étudier son incidence sur la ou les sorties d'un modèle étudié.

- Entrées ayant des effets négligeables
- Entrées ayant des effets linéaires et sans interaction
- Entrées ayant des effets non linéaires et/ou avec interactions

Calcul de l'effet élémentaire $E_i^{(j)}$:

Chaque entrée x_i possède une plage de variation propre $\{v_{min}; v_{max}\}$. Pour appliquer la méthode de Morris, cette plage est normalisée, $x_i \in \{0; 1\}$, puis discrétisée en p -valeur (p représente le nombre de valeurs équidistantes que peut prendre l'entrée X_i sur sa plage de valeur normalisée $\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\}$). Dans le calcul de l'effet élémentaire $E_i^{(j)}$, Δ est un multiple de $1/(p-1)$ pour la plage de valeur normalisée $\{0; 1\}$ de l'entrée x_i .

$$E_i^{(j)} = \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_k) - y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)}{\Delta}$$

Chaque répétition j ($j=1\dots r$) permet d'évaluer l'effet élémentaire $E_i^{(j)}$ sur chaque sortie étudiée par l'entrée X_i . L'ensemble du plan d'expériences (r répétitions) fournit un r -échantillon des effets pour chaque entrée X_i , dont sont issus les indices de sensibilité $\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |E_i^{(j)}|$ (moyenne des valeurs absolues des effets) et σ_i^{33} (écart-type des effets). Ainsi, plus μ_i^* est importante, plus l'entrée X_i contribue à la dispersion de la sortie (donc est un paramètre influent et inversement). σ_i mesure le degré d'interaction et/ou de linéarité de l'entrée X_i sur le modèle étudié. Plus sa valeur est élevée, plus cette entrée interagit avec les autres.

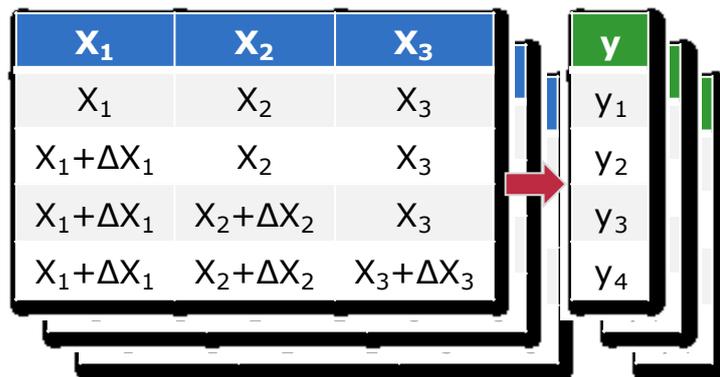


Figure 11 – Exemple de plan d'expérience OAT pour l'évaluation de l'influence des entrées (X_i) sur les sorties (Y_i) d'un modèle avec la méthode de Morris

Dans la Figure 11, chaque couche de plan d'expérience OAT des entrées (trois couches visibles ici) correspond à un profil de référence pris aléatoirement dans l'espace des valeurs des entrées qui composent le modèle. La force de ce type d'analyse est d'identifier quelles entrées sont influentes, indépendamment du profil de référence pris. À contrario, sa faiblesse est de limiter l'analyse de sensibilité à l'influence relative des entrées sélectionnées, les unes par rapport aux autres.

- **les méthodes d'analyse de sensibilité locale** : elles reposent sur le calcul d'un indice de sensibilité – basé sur les dérivées partielles – représentant la variation d'une sortie du modèle suite à une faible variation d'un paramètre d'entrée par rapport à sa valeur

³³ $\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r (E_i^{(j)} - \mu)^2}{r}}$ calcul de l'écart-type σ_i avec μ la moyenne des effets élémentaires de l'entrée i .

nominale [87]. Chaque variable d'entrée possède une valeur de référence. L'analyse consiste à faire varier la valeur d'un paramètre d'entrée à la fois (méthode « One-At-a-Time ») ; cela exclue toute étude des interactions entre les paramètres. L'indice de sensibilité S_i lié à la sortie y par rapport à une variable x_i , peut s'écrire de la manière suivante :

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

Cette méthode permet d'identifier les plages de valeurs d'un paramètre d'entrée où la variation de la sortie du modèle est importante. Généralement, les variations sur les valeurs nominales des paramètres d'entrées oscillent entre $\pm 5\%$ et $\pm 10\%$. Cependant les densités de probabilité (ou distribution) de ces paramètres d'entrée ne sont pas prises en compte, comme l'interaction entre variables d'entrée. Il est également important de noter que ce type de méthode nécessite l'identification d'un profil de référence (profil nominal servant de point de départ à l'analyse de sensibilité). À noter que l'utilisation d'indice de sensibilité – appelé aussi Standardized Regression Coefficient (SRC) – nécessite un faible temps de calcul [88].

Les méthodes d'analyse de sensibilité locales et de type screening sont peu adaptées au mix de données numériques continues, numériques discrètes, et non numériques), mais permettent d'identifier les dépendances entre certaines données d'entrées.

- **les méthodes d'analyse de sensibilité globale** : elles s'intéressent à quantifier l'influence des différents paramètres d'entrées sur la variation du ou des paramètres de sortie. Elle permet d'identifier les paramètres les plus impactant, les interactions entre paramètres, de prendre en considération des densités de probabilité de chaque variable d'entrée (à condition qu'elles soient connues), mais aussi de faire varier les valeurs de tous les paramètres de manière simultanée. Ces méthodes ont pour inconvénient de nécessiter un nombre de simulations important ainsi qu'un temps de calcul élevé.

Parmi ces méthodes on trouve dans la littérature de nombreuses références [79, 89] sur l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo à échantillonnage aléatoire et sa variante à échantillonnage pseudo-aléatoire utilisant les Latin Hypercube Sampling (LHS).

Monte Carlo est une méthode de tirage qui permet d'introduire une approche statistique de l'incertitude à partir de calculs de la propagation d'erreur, notamment, dans les résultats de simulation. Elle consiste à identifier un certain nombre de variables clés et de leur affecter une distribution de probabilité (§V.3.2.1). On effectue un ensemble de calculs aléatoires afin d'identifier la probabilité d'occurrence des résultats proposés [80]. Cette méthode jugée robuste, est coûteuse en temps et CPU car elle nécessite un nombre de simulations important afin de couvrir l'étendu des distributions de probabilité associées à chaque variable d'entrée du modèle testé [79, 90].

Étapes de la méthode d'Analyse Monte-Carlo (MCA) :

1. Identifier les entrées supposées incertaines
2. Codifier les incertitudes qui leur sont associées sous la forme de distributions de probabilité (le travail de Saucier dans ce domaine est remarquable [90])
3. Générer aléatoirement (ou pseudo-aléatoirement) des jeux d'entrées pour le modèle (1 jeu d'entrée par simulation/tirage) en piochant une valeur sur chaque distribution de probabilité des entrées incertaines
4. Effectuer un grand nombre de simulations sur le modèle (n tirages aléatoires)
5. Agréger les résultats des n tirages pour obtenir une distribution de probabilité sur la ou les sorties étudiées.

Le principal problème de ces méthodes, outre l'important temps CPU nécessaire à leur mise en œuvre, est la difficulté de se procurer les informations (valeurs des paramètres d'entrées) nécessaires au bon fonctionnement du modèle. Même dans les cas où elles sont connues, il est extrêmement rare d'obtenir une distribution de probabilité sur les valeurs de ces paramètres. Certains pallient ce problème en modélisant les dires d'experts : par exemple, la loi normale est souvent utilisée pour représenter la composante aléatoire d'une incertitude de mesure. [79, 88]. Macdonald affirme [91] que pour un large nombre de simulations effectuées avec la méthode de Monte-Carlo, les paramètres de sorties prennent souvent une distribution Gaussienne, quelles que soient les distributions de probabilité des paramètres d'entrée. Ces informations si elles sont systématiquement identiques, peuvent ne pas aider suffisamment lors d'un problème de décision reposant sur un tel résultat.

V.3.2 Méthodes de quantification et propagation de l'incertitude

Pour réaliser des analyses de sensibilité globale ou bien quantifier les impacts qu'ont les incertitudes associées aux paramètres d'entrées sur les valeurs des sorties d'un modèle, il est essentiel de s'intéresser à la manière dont l'incertitude sur les paramètres d'entrées à étudier est codée.

V.3.2.1 Quantification de données d'entrées incertaines

L'incertitude sur une donnée d'entrée, lorsqu'elle est quantifiable, peut être définie comme : un intervalle (valeur minimale / valeur maximale) autour d'une valeur moyenne (connue ou non), ou une distribution de valeurs discrètes ou continues. Ces distributions peuvent reposer sur les données statistiques, dans ce cas nous parlerons de distributions probabilistes, dans d'autres cas, lorsque les données manquent ou que les profils de répartitions sont déterminés par des experts, nous parlerons de distributions possibilistes.

- **Les distributions de probabilité**

Ces distributions sont produites à partir d'un échantillon statistique représentatif. Elles permettent de déterminer la répartition probabiliste d'une valeur par rapport à son domaine de définition. Les plus couramment illustrées dans la littérature sont les distributions uniformes et normales (Figure 12).

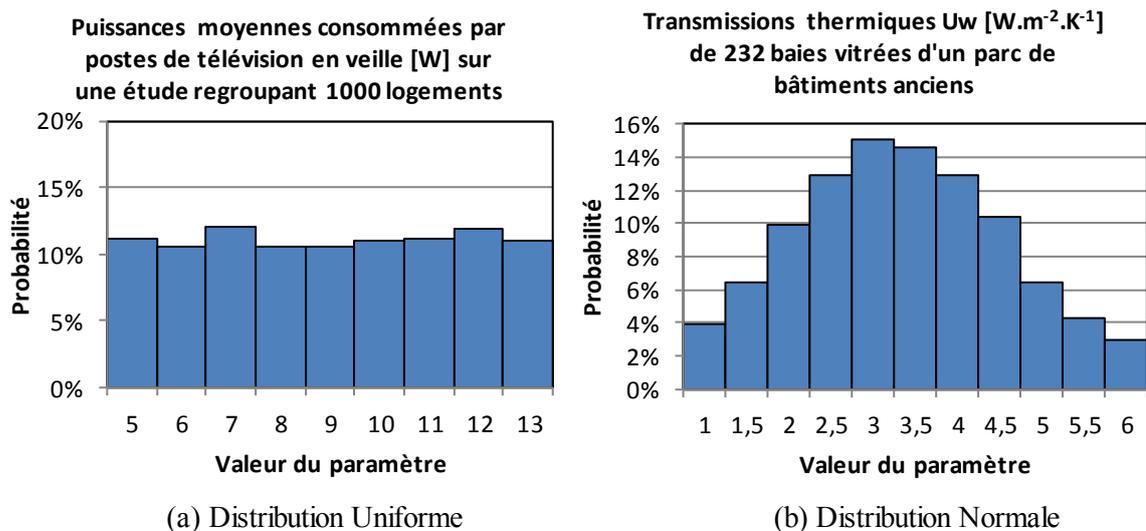


Figure 12 – Exemples de distributions de probabilité uniforme à gauche (a) et normale à droite (b)

- **Les distributions de possibilité**

Par analogie avec une distribution de probabilité qui permet de représenter une information relative à une grandeur dont la valeur dépend du hasard (variabilité aléatoire) ou d'un échantillon statistique suffisamment représentatif d'une situation (grande quantité de données disponible), une distribution de possibilité permet de représenter une information qui est incomplète ou imprécise [92, 93].

Une distribution de possibilité permet d'affiner et d'enrichir la notion d'intervalle min-max par l'expression de préférences au sein de cet intervalle. C'est une des bases de la théorie de la logique floue (voir page 65). Ce type de distribution est propice à la représentation d'un jugement d'expert. Les distributions peuvent prendre diverses formes (normales, gaussiennes, triangulaires, trapézoïdales...) [90].

Il faut donc garder à l'esprit que ces distributions possibilistes sont subjectives et par conséquent discutables, mais elles permettent néanmoins de modéliser l'incertitude sur une donnée numérique imprécise [94].

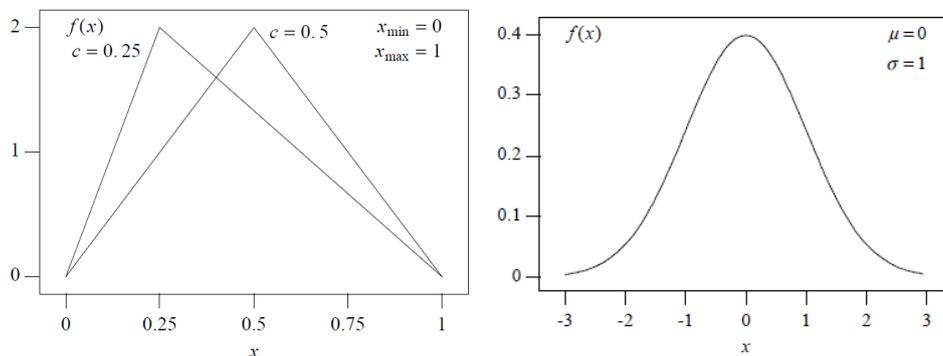


Figure 13 – Exemple de distributions de possibilité triangulaires à gauche, normale à droite d'après [90]

De nombreux travaux de recherche ont été menés sur la conversion de jugements d'experts en échelle de probabilité (ou possibilité). Les travaux de Lichtenstein & Newman en 1967 ont permis la construction d'une échelle comparative permettant d'attribuer à chaque modulation d'avis (certain, possible, rare...) un intervalle de probabilité d'occurrence et une valeur moyenne (Figure 14). Ce travail a été repris par Hillson [95] qui a gardé cette idée, mais a également analysé plusieurs études similaires et soumis ces échelles à de nombreuses personnes afin de ré-étalonner ces probabilités d'occurrence (Tableau 8).

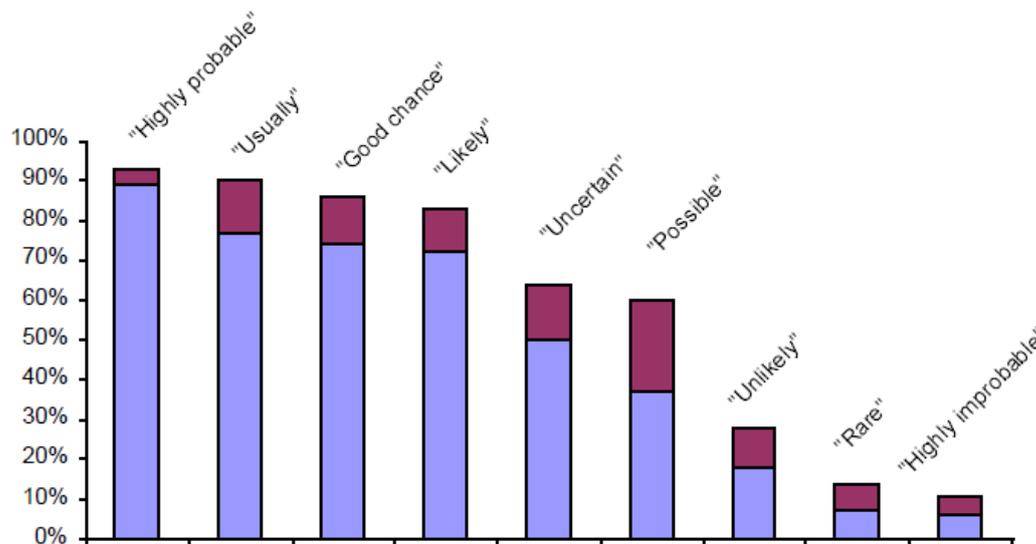


Figure 14 – Correspondance entre appréciations qualitatives et probabilités (échelle de Lichtenstein et Newman)

Tableau 8 – Équivalence linguistique (en langage naturelle) des échelles de probabilités de réalisation d'un évènement, tableau repris de [95]

Termes	Hillson 2005	Boehm 1989	Hamm 1991	Lichtenstein & Newman 1967	Conrow 2003
	Moyenne (min/max)	Mode (gamme)	Valeur proposée	Mode (gamme)	Médiane (quartiles)
Certain	100				
Presque certain	79 (74-84)	90 (85-99)	95	-	95 (85-95)
Hautement probable	71 (64-78)	-	90	89 (60-99)	85 (75-85)
Bonne change	65 (54-74)	75 (60-90)	75	74 (25-96)	-
Vraisemblable	59 (50-68)	60 (55-85)	-	72 (25-99)	75 (65-85)
Assez vraisemblable	59 (52-66)	-	80	79 (30-99)	-
Probable	57 (48-67)	70 (55-85)	-	71 (1-99)	75 (65-85)
Mieux que l'égalité	57 (47-66)	52 (50-60)	60	58 (45-89)	65 (55-65)
Possible	43 (29-58)	-	-	37 (1-99)	55 (35-65)
Improbable	18 (11-25)	20 (15-45)	-	12 (1-40)	15 (15-25)
Peu vraisemblable	17 (10-23)	5 (0-15)	10	9 (1-50)	15 (5-15)
Invraisemblable	14 (7-20)	30 (15-45)	-	18 (1-45)	15 (15-25)
Assez rare	12 (6-17)	-	15	16 (1-47)	-
Rare	8 (4-12)	-	5	7 (1-30)	-
Impossible	0				

Il faut garder à l'esprit que la transformation d'opinions d'experts exprimées en langage naturel sous forme probabiliste est une chose difficile car grandement subjective. Même si de nombreuses passerelles existent, comme celle présentée en Tableau 8, ce travail d'appréciation pourra toujours être remis en question.

V.3.2.2 Méthodes de propagation de l'incertitude

Une fois l'incertitude sur les entrées quantifiée, des méthodes telles que Monte-Carlo (utilisée également en analyse de sensibilité globale), la logique floue, les réseaux bayésiens permettent de propager l'incertitude des entrées jusqu'aux sorties des modèles de calcul usités.

A. Logique flou

Les approches possibilistes sont bien adaptées aux données entachées d'imperfections, imprécisions ou incertitudes car elles permettent de traiter les dires d'experts sans pour autant passer par des méthodes de propagations de l'incertitude par tirage aléatoire (méthode Monte-Carlo notamment) coûteuses en temps de calcul. Cette théorie comporte trois phases principales : fuzzication, propagation dans le modèle d'évaluation de la performance, défuzzication.

1. *Fuzzication* : La première étape du traitement consiste à modéliser chacune des entrées imparfaites du système par des courbes ou formes géométriques simples (i.e. triangulaire, trapézoïdale, intervalle précis, note précise (Figure 15) donnant les degrés d'appartenance à différents états identifiés pour ces entrées (appelées également distributions de possibilité). Ce formalisme permet d'intégrer l'incertitude sur des informations ou un jugement lorsque qu'une appréciation d'expert n'est pas précise, ou lorsque des distributions de probabilité ne sont pas disponibles par manque de données statistiques (voir page 62).

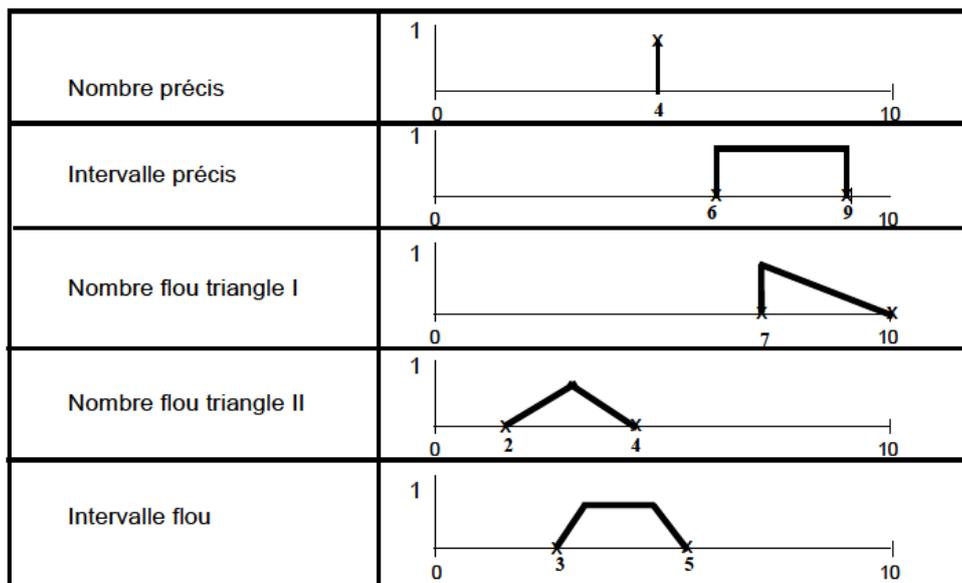
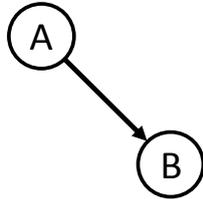


Figure 15 – Différentes distributions de possibilités [77]

2. *Propagation dans le modèle d'évaluation de la performance* : les imperfections de la connaissance représentées par les distributions de possibilité sont ensuite propagées dans des modèles analytiques simples en mettant en œuvre le principe d'extension de Zadeh qui permet d'étendre les opérations entre nombre réels aux opérations correspondantes entre sous-espaces flous. Nous renverrons les lecteurs intéressés par ce type d'approche vers les publications suivantes [77, 93, 96, 97].
3. *Défuzzication* : Elle permet d'obtenir une note précise à partir d'une distribution de possibilité quand les experts sont amenés à communiquer les résultats.

B. Probabilités bayésiennes

En théorie des probabilités, le théorème de Bayes présente certaines propriétés des probabilités conditionnelles (appelé à l'origine «probabilité des causes»). Ce théorème permet de déterminer la probabilité de A sachant B, si l'on connaît les probabilités de A, de B et de B sachant A (A et B étant deux évènements d'une relation causale) [48] :



$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

- $P(A)$ est la probabilité a priori de l'évènement A. Elle est «antérieure» au sens qu'elle précède toute information sur B.
- $P(A|B)$ est appelée la probabilité a posteriori de A sachant B. Elle est «postérieure», au sens qu'elle dépend directement de B.
- $P(B|A)$, pour un B connu, est appelée la fonction de vraisemblance de A. Elle est appelée également, la probabilité de B sachant A).
- $P(B)$ est appelée la probabilité marginale ou a priori de B.

En termes de modélisation probabiliste de la connaissance, une probabilité est interprétée comme une traduction numérique d'un état de connaissance (le degré de confiance accordé à une hypothèse, par exemple).

On nomme *inférence bayésienne* la démarche logique permettant de calculer ou réviser la probabilité d'un événement. En d'autres termes, si on connaît dans le détail les causes possibles d'une conséquence observée, l'observation des effets permet de remonter aux causes. Ce mécanisme, de mise à jour de la connaissance, permet lors d'un diagnostic de déduire des symptômes ou autres pathologies, les causes les plus probables à l'origine de leurs apparitions. De manière plus applicative :

S'il existe une relation causale de A vers B, toute information sur A peut modifier la connaissance que j'ai de B, et, réciproquement, toute information sur B peut modifier la connaissance que j'ai de A. [98]

L'utilisation de la théorie des probabilités pour apprendre automatiquement, raisonner et prendre des décisions dans un univers incertain à partir de perceptions (avis d'experts, recueil d'informations non vérifiables, intuition,...) est une piste intéressante. Les probabilités peuvent représenter un degré de croyance pour un agent intelligent [99].

Un chapitre plus fonctionnel sur l'utilité du théorème de Bayes, appartement au courant des théories probabilistes, est développé plus loin dans ce document. Son utilisation sous forme de réseaux bayésiens permet de modéliser l'information en tenant compte de l'incertain sous forme de probabilités conditionnelles, ainsi que de propager cette incertitude sous la forme de distributions de probabilité.

L'aide à la décision et l'étude des incertitudes sont indissociables. La capitalisation, la formalisation et la transformation des connaissances à l'aide d'outils de modélisation, nécessaires à l'argumentation des choix formulés, sont toutes des étapes empreintes d'incertitudes. Au cours de l'examen des méthodes utilisées dans ce domaine, nous avons constaté l'existence de nombreuses techniques d'analyse, de codification et de propagation de connaissances incertaines. La plupart de ces techniques ne sont malheureusement pas mises en œuvre (hors du monde académique) dans les outils actuels de conception et d'évaluation des performances dédiés aux opérations de construction ou de rénovation. Ce constat peut s'expliquer par différentes raisons plus ou moins fondées : augmentation du temps de calcul, adaptation complexe des outils déjà existant, profonds changements nécessaires dans la manière de communiquer sur un résultat...

Dans l'optique de concevoir une méthode d'aide à la décision pour la prescription de scénarios de rénovation, la voie des techniques manipulant des distributions de probabilité paraît intéressante. En effet, ce type de formalisation de l'incertain est aussi bien adapté à la codification d'incertitudes sur des données numériques que sur des jugements experts.

VI. Représentations et utilisations de connaissances

Nous avons vu à travers les précédents chapitres de la traversée de l'état de l'art que l'aide à la décision pour la prescription de scénarios de rénovation ne peut se faire sans l'exploitation de connaissances expertes préalablement capitalisées pour orienter les choix techniques au regard des spécificités de l'existant (contraintes de mises en œuvre à respects, prérequis techniques...) d'une part et l'évaluation des performances multicritères d'assemblages de solutions de rénovation d'autre part. À ces deux exigences, s'ajoute la nécessité de raisonner dans l'incertain pour gérer les inconnues partielles issues d'un diagnostic lors d'une phase de capitalisation des informations spécifiques à une opération de rénovation.

L'ensemble de ces contraintes nous pousse à orienter le travail d'investigation vers les méthodes d'intelligence artificielle permettant d'exploiter des connaissances expertes (quantitatives et qualitatives) et de raisonner avec des informations spécifiques ou génériques, certaines ou probabilisées. Cette partie de l'état de l'art a pour objectif de présenter les approches de modélisation de l'information experte les plus courantes en vue d'en identifier une susceptible de remplir le cahier des charge de notre future méthodologie d'aide à la décision.

VI.1 Grands principes

L'inférence est une action ou un processus consistant à obtenir des conclusions logiques à partir de prémisses (postulats, hypothèses, faits). L'étude des mécanismes d'inférence est souvent associée à la logique, aux pensées rationnelles, et à l'intelligence artificielle.

VI.1.1 Types d'usage et familles de modélisation

Le besoin de modéliser un phénomène, un système ou un processus, répond souvent à une impossibilité d'expérimenter. Que ce soit pour des raisons d'échelles physiques (phénomènes gravitationnelles, aérodynamisme d'ouvrage d'art, etc.), d'échelles de temps (fissions nucléaires, brassage génétique, etc.), de coûts (tests destructifs, automatisation de processus, évaluations et optimisations paramétriques, etc.) ou de santé (robotiques, automates), la modélisation devient incontournable. Elle permet d'évaluer les impacts de choix, de déduire des informations nouvelles, d'optimiser des processus sans passer par l'étape expérimentation.

La modélisation est généralement associée aux phénomènes physiques (thermique, aérodynamique, mécanique...) mais d'autres voies existent comme la modélisation de connaissances (graphes relationnels) couplée à des systèmes de traitement de l'information (pilotage d'automates, raisonnement artificiel). La force principale de cette modélisation alternative est sa capacité à pouvoir fusionner des informations de natures diverses (données statistiques, équations physiques, jugements d'experts, etc.) en un modèle unique.

La modélisation de connaissances métiers et les mécanismes d'inférence permettent d'assister et d'automatiser de nombreux processus : décision, diagnostic, évaluation, optimisation, prédiction, pilotage d'automates.

Dans le cas plus spécifique de processus décisionnels se basant sur la confrontation des préférences et de la connaissance d'un système étudié, deux grandes familles de modélisation du raisonnement s'offrent à nous d'après Sedki dans [100].

- **Les modèles graphiques** : Arbres décisionnels, Diagrammes cognitifs, Réseaux Bayésiens, Diagramme d'Influence, Réseaux de Pétri
- **Les modèles logiques** : Systèmes experts, CP-net, PQCL

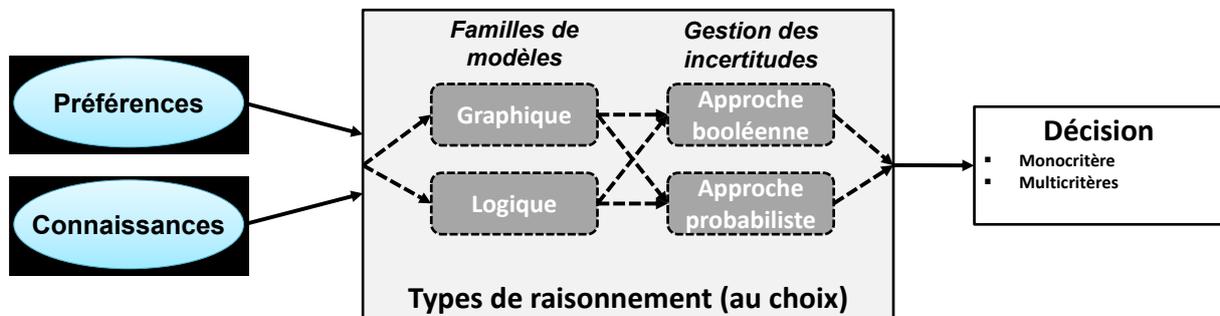


Figure 16 – Modèles logique et graphique pour l'aide à la décision

Nous allons voir dans les parties suivantes quels sont les grands principes de l'inférence, les familles de modélisation de la connaissance, pour enfin présenter quelques techniques de modélisation couramment utilisées dans l'industrie, l'informatique et la gestion des risques.

VI.1.2 Circulation d'information

Avant de présenter les différents systèmes de modélisation du savoir, il convient de définir certains termes techniques dédiés aux différents modes d'inférence de la connaissance. Au sein d'un raisonnement logique ou graphique, il existe trois types de propagation possible de la connaissance :

- **Le chaînage avant** : Le chaînage avant est une méthode de déduction qui applique des règles d'inférence en partant des prémisses (observations, faits) pour en déduire de nouvelles conclusions. Ces conclusions enrichissent la mémoire de travail et peuvent devenir les prémisses d'autres règles.
- **Le chaînage arrière** : Le chaînage arrière est une méthode d'inférence (inductive) permettant de partir d'un effet ou d'une solution et de tenter de remonter la chaîne afin de déterminer les causes les plus probables de cet effet (observations, faits). Ce type de propagation de l'information est notamment utilisé dans les systèmes de diagnostics automatisés.

- **Le chaînage mixte** : Le chaînage mixte, ou chaînage hybride, combine les 2 chaînages précédents : il fonctionne comme le chaînage avant dans le but de déduire une solution à partir de faits donnés ; mais applique également un chaînage arrière sur chaque fait identifié afin de déterminer les paramètres les plus probables et les plus optimisés. Ce mécanisme permet l'ouverture sur de nouvelles combinaisons encore non envisagées par les règles d'inférence et de déterminer les facteurs discriminants lors de la recherche d'une solution.

En fonction de la technologie de modélisation des connaissances utilisée (voir §VI.2), un ou plusieurs types d'inférence sont possibles. La plupart des technologies permet le raisonnement par chaînage avant (par exemple, les arbres décisionnels, les systèmes experts).

VI.1.3 Approches booléennes, probabilisées

La gestion des incertitudes, autant sur les connaissances (partielles, incertaines, imprécises...) que sur les relations entre ces connaissances (incertitudes dans les mécanismes de chaînage, extrapolations statistiques, fusions de données...), peut être également pris en compte dans les mécanismes d'inférence.

- les **approches booléennes** ne tiennent généralement pas compte de ces caractères incertains. Ce sont les approches les plus simples et les plus utilisées dans l'industrie ;
- les **approches probabilistes** intègrent une partie des incertitudes précédemment mentionnées. Elles sont plus souvent rencontrées dans les outils de *Datamining* et certains outils d'aide à la décision. Elles utilisent le plus souvent des très grosses bases de connaissances pour modéliser l'incertitude sous la forme de distributions statistiques.

VI.2 Les techniques de modélisation de la connaissance

Nous allons voir dans ce sous-chapitre, les principales technologies de modélisation de l'information rencontrées lors de ces recherches bibliographiques, qui permettent l'automatisation, et lorsque cela est possible l'optimisation, d'un processus décisionnel.

VI.2.1 Modélisations arborescentes

Les modélisations arborescentes sont des représentations graphiques plus ou moins complexes de situations sous la forme d'arbres. Elles sont modélisées par des nœuds représentant des décisions intermédiaires, et des branches représentant le « chemin entre deux nœuds ». Le résultat final apparaît sous forme d'extrémité d'une branche. Ce type de modélisation peut se décliner pour différents usages : arbres décisionnels (modélisation de connaissances avec pour finalité une aide à la prise de décision), arbres de causes (modélisation Bottom-Up ayant pour but de générer de la connaissance), arbres de défaillances (utilisés dans une perspective d'analyse de risques), etc.

Les arbres décisionnels sont souvent utilisés dans les domaines tels que la sécurité ou la médecine. Ils sont adaptés à la représentation de systèmes statiques où le résultat final ne dépend généralement pas de l'ordre des décisions intermédiaires (Figure 17).

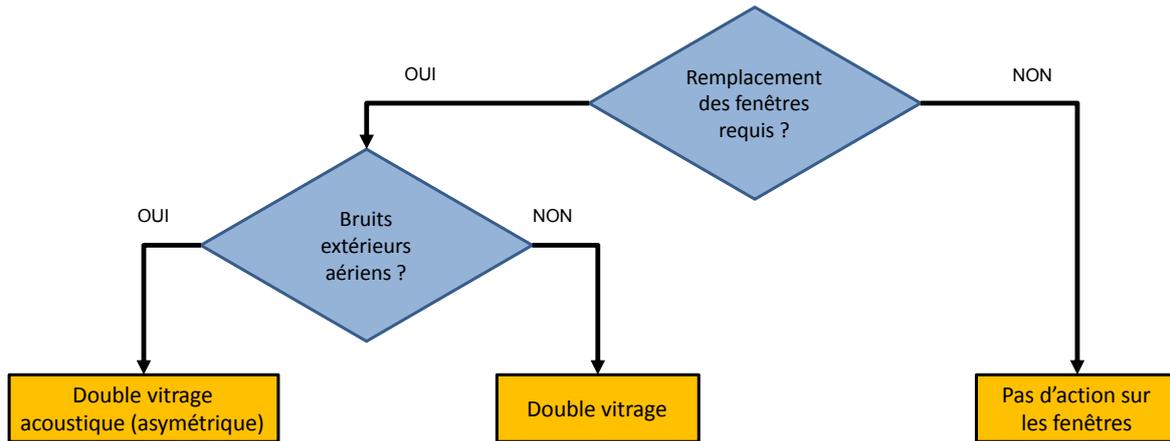


Figure 17 – Exemple d'arbre de décision

Les *arbres de causes* et les *arbres de défaillances* sont des représentations graphiques et probabilistes spécifiques au domaine de l'analyse des risques. Dans ces derniers, des coefficients de probabilité sont associés à chaque chemin décisionnel et des portes logiques « ou » et « et » peuvent venir complexifier le cheminement de l'information.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Pratique pour la recherche de la solution optimale • Avec ou sans probabilités 	<ul style="list-style-type: none"> • La taille de l'arbre devient vite énorme • Informations souvent redondantes parmi les branches • Modélisation peu adaptée aux mécanismes d'inférence

VI.2.2 Systèmes experts

Un Système Expert a pour finalité de reproduire le raisonnement d'un expert lors de la résolution d'un problème, en s'appuyant sur une méthodologie constituée de quatre composants : une base de connaissance (règles décisionnelles fournis par des experts), une base de faits (données récupérées lors d'un diagnostic ou d'un questionnaire), un moteur d'inférence (algorithmes permettant d'appeler les règles en fonction des faits établis pour déduire de la connaissance, et une interface homme-machine (le tout représenté dans la Figure 18). L'objectif est de codifier et d'intégrer le savoir des experts dans un outil informatique afin de rendre cette connaissance utilisable par un non spécialiste.

Les règles sont des assertions données sous forme d'implications (fonctions logiques) utilisant des conditions :

Exemple 1 : **Si** <condition>, **alors** <action>
 Exemple 2 : **Si** <condition 1> et <condition 2>, **alors** <action>

Parmi les systèmes experts les plus connus, le système de diagnostic médical MYCIN développé dans les années 1970 fut le plus célèbre [101]. Embarquant plus de 600 règles, ce système expert permettait d'identifier le type de bactéries causant de sévères infections à un patient, dans une optique de lui prescrire les bons antibiotiques avec un dosage adapté à sa physiologie.

De manière classique un système expert est constitué d'assertions causales certaines. Cette nécessité d'affirmer que telle condition entraîne à coup sûr telle conclusion, empêche les experts de se prononcer, de peur de se tromper ou d'omettre des facteurs influents peu probables. Une solution est alors d'associer à chaque règle, un facteur de croyance (CF :

Certainty Factor). Dans certains cas, le théorème de Bayes (présenté en page 66) permet de déduire les CF d'une action sachant les CF des actions ou faits antécédents. L'interprétation des probabilités dans [102] donne une méthode pour convertir les CF d'une assertion causale en valeur de probabilité conditionnelle.

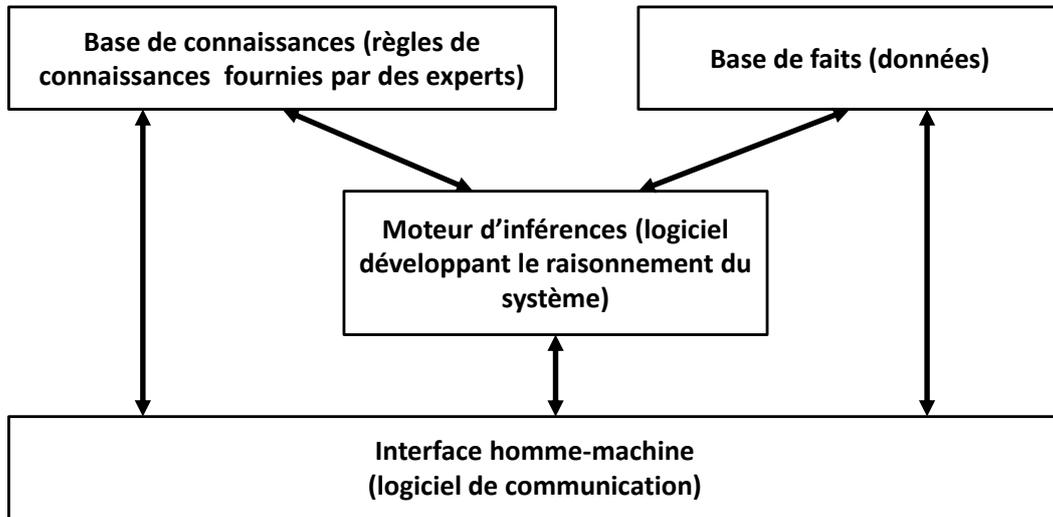


Figure 18 – Modélisation d'un système expert d'après [103]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> Fonctionne directement avec une base de règles, par chaînage avant, et/ou dans certains cas par chaînage arrière 	<ul style="list-style-type: none"> Absence de représentation graphique facilitant la compréhension Modélisation procédurale limitant la syntaxe de formalisation des connaissances sous la forme « si... alors... »

VI.2.3 Réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens reposent sur un formalisme basé sur la fusion des théories des probabilités et des graphes. Ils permettent à un ou plusieurs experts de formaliser leur connaissance sous forme d'un modèle graphique de relations causales (causes → effets) indiquant les dépendances entre les variables. Cette description graphique est transformée ensuite en loi de probabilité équivalente afin de prendre en compte les aspects incertains.

Concrètement, un réseau bayésien est le rassemblement de deux aspects conceptuels :

- un aspect graphique, appelé graphe orienté sans circuit (DAG³⁴ en anglais), qui structure la dépendance et la causalité entre les variables sous forme de nœuds et d'arcs orientés ;
- un aspect quantitatif, appelé espace probabilisé fini, qui décrit cette dépendance entre les variables sous forme de tables de probabilités conditionnelles.

Un réseau bayésien est donc un graphe relationnel auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente.

L'utilisation première d'un réseau bayésien est l'inférence de connaissances. Une révision des observations sur un système modélisé permet de mettre à jour dynamiquement les

³⁴ DAG : Directed Acyclic Graph

tables de probabilités de tous les nœuds du réseau afin de réviser potentiellement son jugement. Il permet donc de voir comment le système évolue au regard d'un complément d'observation, mais aussi d'identifier quels nœuds d'observation sont les plus critiques et donc de focaliser l'action ou la recherche d'informations complémentaires sur ces derniers.

La propriété fondamentale des réseaux bayésiens, basée directement sur le théorème de Bayes, établit que la probabilité conditionnelle d'une valeur d'une variable X_i sachant la valeur d'une autre variable X_j peut être calculée par l'équation suivante :

$$P(X_i|X_j) = \frac{P(X_j|X_i).P(X_i)}{P(X_j)}$$

Par ce principe, les réseaux bayésiens permettent de représenter d'une manière compacte une distribution de probabilité jointe, associée à l'ensemble des variables en utilisant la notion d'indépendance. La distribution de probabilité jointe est décomposée sous forme d'un produit des distributions de probabilités locales selon la règle de chaînage suivante :

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | pa(X_i))$$

où $pa(X_i)$ représente l'ensemble des parents du nœud X_i dans le graphe. En d'autres termes, la probabilité d'une observation (un nœud) dépend des probabilités des observations parentes (nœuds parents).

Par rapport aux outils d'inférence fonctionnant à base de règles logiques, le plus souvent utilisés sans les systèmes experts, les réseaux bayésiens permettent d'intégrer l'incertitude dans le raisonnement, aussi bien au niveau des observations que dans les règles conditionnelles. La quantification de l'incertain sous forme de probabilités permet d'associer à chaque décision, un coefficient ou indicateur de risque, très utile selon la nature de la décision à prendre.

Les réseaux bayésiens permettent de rassembler au sein d'un même modèle graphique des données de nature différente (observations, expertises, réglementations, retours d'expérience) pour en extraire des connaissances utiles à la prise de décision, mais aussi contrôler ou prévoir le comportement d'un système, ou encore diagnostiquer les causes d'un phénomène.

Ce type de modélisation de la connaissance est utilisé dans de nombreux domaines : santé (diagnostic, localisation de gènes), industrie (contrôle d'automates ou de robots), informatique et réseaux (agents intelligents), marketing (data mining, gestion de la relation client), banque et finances (scoring, analyse financière), management (aide à la décision, knowledge management, gestion du risque), etc. [98].

L'exemple de structure graphique bayésienne, en Figure 19, montre comment des connaissances expertes génériques [volontairement simplifiées pour l'exemple] sont codifiées pour modéliser le risque potentiel d'apparition de pathologies de l'enveloppe lié à un excédent d'humidité dans une maison individuelle. Chaque nœud représente un paramètre intervenant dans le modèle ; chaque flèche les relations entre ces paramètres. Les états des nœuds sans parents « Fenêtres, Isolation thermique de l'enveloppe, ventilation », sont probabilisés à l'aide de lois de probabilités marginales (ex : $P(\text{Fenêtre} = \text{simple vitrage}) = 0.6$). Les relations entre ces nœuds et les autres nœuds, qui possèdent des nœuds parents « Enveloppe étanche à l'air, Risques de pathologies liées à l'humidité », sont quantifiées à l'aide de tables de probabilités conditionnelles (TPC) permettant de lier et probabiliser la connaissance capitalisée.

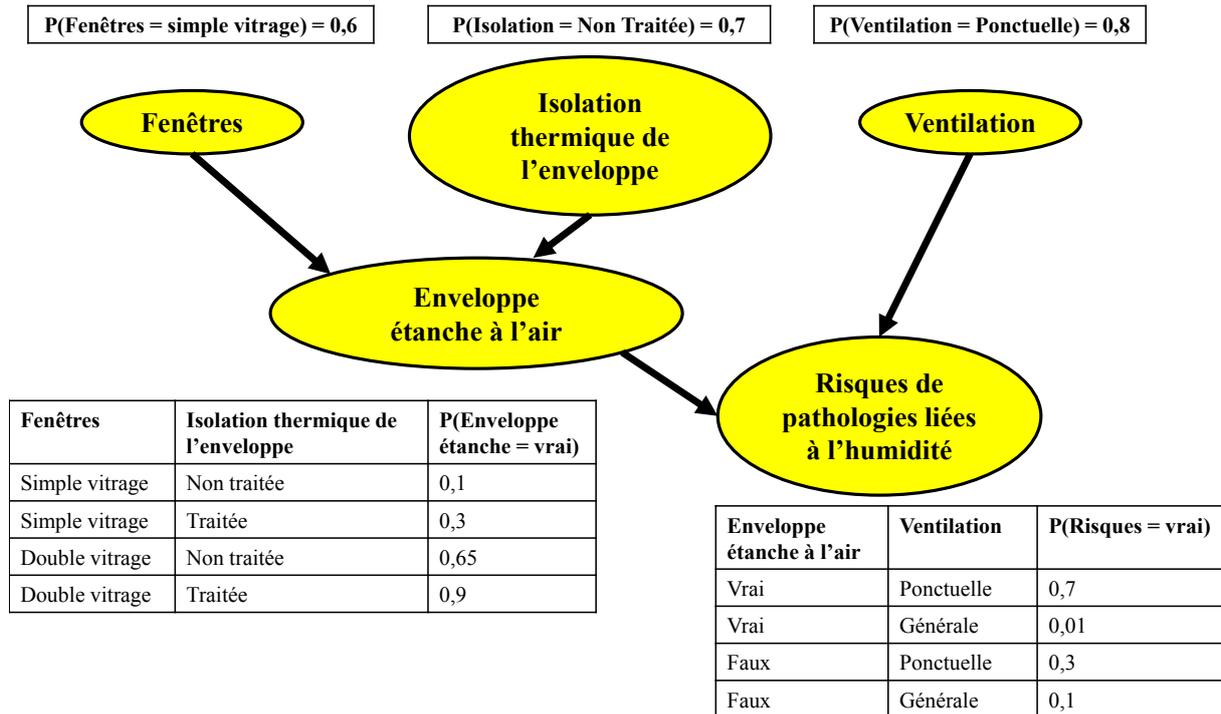


Figure 19 – Exemple simplifié de réseau bayésien utilisé pour détecter un risque de pathologie lors de la conception d'une opération de rénovation d'après [104]

Une présentation plus complète de cette technologie de modélisation et d'inférence de connaissances est proposée dans l'Annexe B. Le lecteur y trouvera principalement des informations sur les étapes de construction d'un réseau, sur les algorithmes d'inférence probabiliste utilisés pour réviser et propager de nouvelles informations, et enfin une liste de logiciels permettant d'utiliser ce type de représentations de connaissances incertaines.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de fusionner des connaissances de natures diverses dans un même modèle (retour d'expérience, expertise, observations, réglementation, etc.) • La lisibilité d'une représentation causale graphique • Un réseau bayésien est polyvalent, il permet à partir d'un même modèle : d'évaluer, de diagnostiquer, d'optimiser des solutions • Possibilité de transposer une base de règles en graphe relationnel • Permet d'inférer de la connaissance par chaînage mixte • Possibilité d'apprentissage de structures et d'apprentissage de paramètres 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité des algorithmes d'inférence, peu adaptés aux réseaux de grosses tailles • Ne gèrent pas nativement les données continues (nécessité d'établir une discrétisation par palier) • Absence de sémantique propre aux réseaux bayésiens pour aider à l'élaboration des modèles et garantir leur cohérence [105] → Analyses de robustesse nécessaire

VI.2.4 Diagrammes d'influence

Les diagrammes d'influence, dédiés à la résolution de problèmes décisionnels, sont une extension des réseaux bayésiens avec deux types de nœuds supplémentaires, les *nœuds de décisions* et les *nœuds d'utilité*. Les *nœuds de chance* (appelés *nœuds d'observation dans les réseaux bayésiens*), représentent les informations connues ou non sur le système.

Les nœuds de décision représentent les alternatives qui s'offrent au décideur. Chaque nœud comporte un nombre fini d'alternative. Ils sont représentés généralement dans les réseaux bayésiens sous la forme de carrés. L'utilisation de diagramme d'influence n'est donc possible que si la liste exhaustive des alternatives (options de choix) est disponible [106], ce qui bride l'évolution du système en rendant les mises à jour des alternatives très complexes.

Les nœuds d'utilité possèdent une table de valeurs contenant toutes les combinaisons possibles de valeurs de ses nœuds parents (cette table est appelée fonction d'utilité³⁵). Les utilités représentent le gain potentiel d'une décision au regard des informations collectées (valeurs des nœuds décision et valeurs des nœuds chance du diagramme d'influence) ou encore un risque d'évènement redouté. Ils sont représentés généralement dans les réseaux bayésiens sous la forme de losanges.

Un diagramme d'influence peut être utilisé de deux manières différentes :

- Les valeurs de chaque nœud de décision ne sont pas déterminées par les probabilités « a priori » ou conjointes de leurs parents (comme dans un réseau bayésien), mais imposées par l'agent extérieur (le preneur de décision) afin de quantifier les impacts de ses décisions sur les nœuds d'utilité (qui peuvent être comparés à des critères d'évaluation). Cela permet de valider ou non la pertinence d'un choix, de maximiser des profits, de minimiser des risques.
- Le décideur impose des valeurs aux nœuds d'utilité, et les tables de probabilité des différents nœuds du réseau sont révisées par inférence bayésienne pour déterminer sous forme de distribution de probabilité, quelles sont les décisions à prendre pour atteindre ces niveaux d'utilité. En formulant autrement, l'inférence dans le diagramme d'influence permet de calculer l'utilité espérée associée à chaque alternative. Ce calcul permet de trier les alternatives par ordre décroissant de satisfaction générale [106].

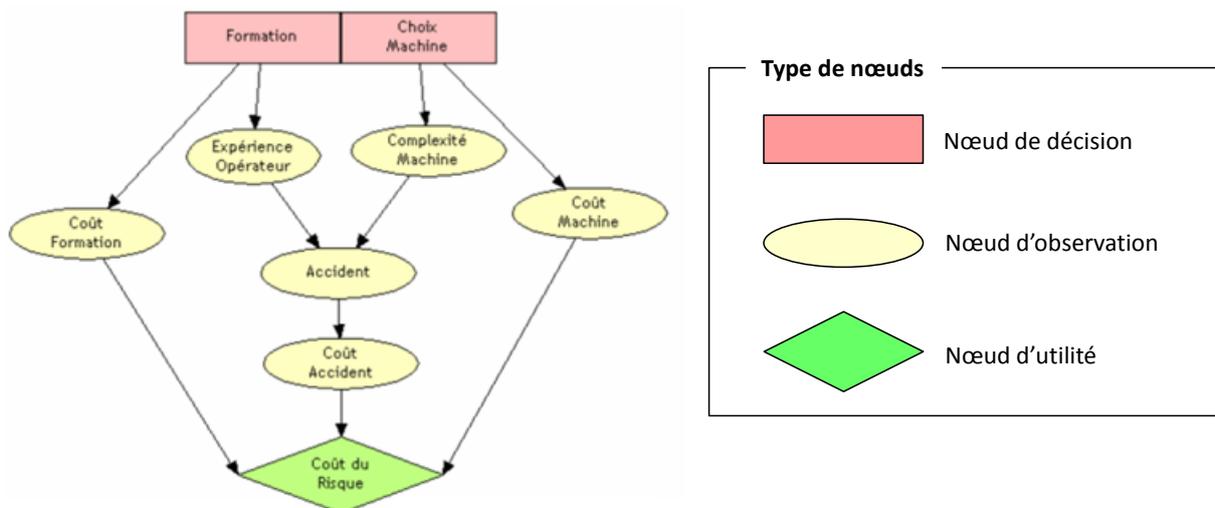


Figure 20 – Exemple classique de Diagramme d'Influence

³⁵ On peut également l'assimiler à une fonction de coût

De manière analogue à l'élaboration d'un réseau bayésien, les étapes d'identification des variables et de leurs espaces d'états, et de structuration du réseau, sont les premières étapes de la construction d'un diagramme d'influence (voir l'Annexe B). Il convient ensuite de classer chaque nœud du réseau bayésien (futur diagramme d'influence) dans une des familles suivantes : décisions, observations (ou chance), et utilités.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Idem réseaux bayésiens • Technologie spécialisée dans l'aide à la décision 	<ul style="list-style-type: none"> • Idem réseaux bayésiens • Nécessite d'explicitier l'exhaustivité des alternatives qui s'offre au décideur sous la forme d'un ou plusieurs nœuds de décision • Nécessité de hiérarchiser l'ordre des nœuds de décision

VI.2.5 Processus de décision markovien

Les modèles de décision markoviens sont issus de la théorie de la décision et de la théorie des probabilités. Ils sont souvent utilisés en robotique, dans la thématique de l'intelligence artificielle, en offrant un formalisme pour modéliser et résoudre des problèmes de planification dans l'incertain. La finalité d'un processus de décision markovien est de maximiser une fonction de gain.

Un processus de décision markovien repose sur la propriété fondamentale des chaînes de Markov qui consiste à dire que les probabilités de transitions d'un état vers un autre du système modélisé, ne dépendent que des n états précédents. Cette modélisation permet de prendre des décisions dans un environnement :

- lorsque l'on a une certitude sur l'état dans lequel on se trouve ;
- en présence d'incertitude sur l'effet des actions.

Un processus de décision markovien est défini par un quadruplé « S, A, T, R ».

- $S = [s]$: un ensemble fini d'états de l'environnement parfaitement identifiables ;
- $A = [a]$: ensemble fini d'actions ;
- $T: S \times A \times S' \rightarrow P(S)$: fonction de transition entre états.
On note $T(s, a, s') = P(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$ la probabilité de passer de l'état s à l'état s' en effectuant l'action a .
- $R: S \times A \times S' \rightarrow P(R)$: fonction de récompense qui permet de déterminer le but à atteindre et les éventuelles zones dangereuses de l'environnement. Cette fonction peut être définie de différentes manières, suivant le problème à résoudre.

Propriété fondamentale d'un processus stochastique markovien

$$\forall (s', r, S_t, a_t) : P(S_{t+1} = s', r_{t+1} = r | S_t, a_t)$$

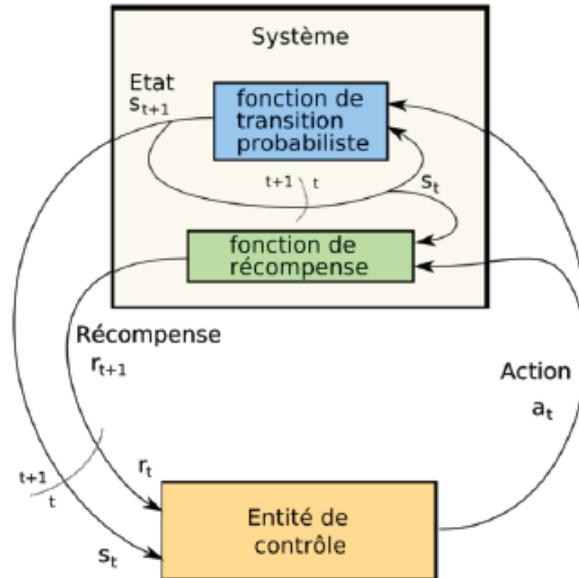


Figure 21 – Processus de décision markovien

C'est un processus stochastique, par conséquent, il est important de noter que l'effet de ces actions sur le système est probabiliste : l'action entreprise peut avoir l'effet escompté ou un tout autre effet.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation dynamique d'un processus • Intégration des incertitudes probabilistes et des préférences décisionnelles • Fonction d'utilité à maximiser 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle stochastique • Nécessite une connaissance précise des paramètres modélisés • Nécessite une validation du modèle par apprentissage • Limité à des très petits modèles

VI.2.6 Réseaux de Pétri

Un réseau de Pétri est un modèle mathématique servant à représenter divers systèmes (informatiques, industriels,...) travaillant sur des variables discrètes. C'est un moyen de modélisation du comportement de systèmes dynamiques à événements discrets. Son formalisme repose sur la description des relations existantes entre des conditions et des événements.

Une première application des réseaux de Pétri est la modélisation de processus de fabrication de systèmes industriels (communication entre automates notamment) et manufacturiers. Une seconde application est l'analyse de performance (temps de réponse, temps d'attente) et le comportement de systèmes technologiques lorsqu'une expérimentation n'est pas viable (trop coûteuse en temps, ressources financières, etc.).

Un réseau de Pétri se représente par un graphe biparti (composé de deux types de nœuds et dont aucun arc ne relie deux nœuds de même type) orienté (composé d'arcs ayant un sens) reliant des *places* et des *transitions* (les nœuds) [107].

Chaque place contient un nombre entier positif ou nul de **marques** ou **jetons**. Le marquage définit l'état du système décrit par le réseau à un instant donné. Une transition est franchissable lorsque toutes les places qui lui sont en amont (ou toutes les places d'entrée de la transition) contiennent au moins un jeton.



Figure 22 – Exemple de réseaux de Pétri avant franchissement (gauche) et après franchissement (droite)

Dans l'industrie, le formalisme des réseaux de Pétri, issu de la thèse de Carl Adam Pétri en 1962, a donné naissance plus tard au langage *GRAFSET* (langage de programmation graphique) mondialement utilisé dans la modélisation et la prévention du comportement des chaînes de production. En biologie, on retrouve également les réseaux de Pétri pour modéliser des interactions génétiques.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Approche intuitive pour décrire un fonctionnement ou un comportement complexe (modélisation dynamique d'un processus) • Représentation graphique • Modèle exact sans approximations. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variables discrètes uniquement • Approche peu adaptée à la représentation et à la manipulation de connaissances.

VI.2.7 Réseaux de neurones artificiels (réduction de modèles, automates...)

Les réseaux de neurones ou réseaux neuronaux sont des modèles de calcul optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistiques, probabilistes ou bayésiennes. Ce ne sont pas des modèles de raisonnements logiques, mais bien des automates assimilables à une imbrication de multiples fonctions de transfert. Leur puissance repose sur le phénomène d'apprentissage, leur capacité de généralisation, et leur rapidité d'exécution.

Les réseaux de neurones sont constitués d'un nombre finit de *neurones formels* interconnectés. Chaque neurone formel est conçu comme un automate doté d'une fonction de transfert qui transforme ses entrées en sorties selon des règles précises. L'efficacité de la transmission des signaux d'un neurone à l'autre peut varier : on parle de « *poids synaptique* », et ces poids peuvent être modulés par des règles d'apprentissage (ce qui mime la plasticité synaptique des réseaux biologiques). Dans un modèle de réseaux de neurones formels, apprendre revient donc à déterminer les coefficients synaptiques les mieux adaptés à classer les exemples présentés.

Les réseaux de neurones ont besoin de cas réels servant d'exemples pour leur apprentissage (on appelle cela la *base d'apprentissage*). Ces cas d'exemples doivent être d'autant plus nombreux que le problème est complexe et que sa topologie est peu structurée. Cet apprentissage consiste à imposer des résultats connus à un jeu de données d'entrées.

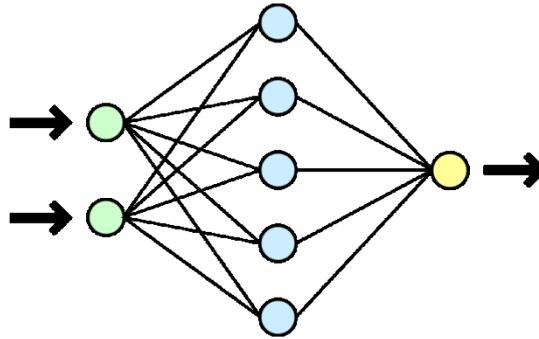


Figure 23 – Exemple schématique d'un réseau neuronal. En vert les entrées, en jaune la sortie, en bleue les neurones assurant le transfert entre les deux couleurs précédentes

Par confrontation avec des situations ponctuelles, ils infèrent un système de décision intégré dont le caractère générique est fonction du nombre de cas d'apprentissage rencontré et de leur complexité par rapport à la complexité du problème à résoudre.

Les réseaux de neurones sont couramment utilisés dans de nombreux champs d'application : reconnaissance optiques de caractères (OCR), classification d'espèces animales par analyse ADN, approximation de fonction inconnue.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Très rapide à l'exécution • Idéal pour la classification 	<ul style="list-style-type: none"> • Basé sur l'apprentissage par expérience • Nécessite des données statistiques de qualité • Performance basée sur la qualité de la base d'apprentissage

VI.2.8 Analyses des avantages et limites de chaque technologie

Nous avons eu au travers de cette section, un bref aperçu des systèmes de modélisation de la connaissance à des fins d'aide à la décision. Chaque technologie a ses avantages et inconvénients. Patrick Naïm propose une comparaison générale de plusieurs techniques de modélisation de la connaissance à des fins décisionnelles définies précédemment dans [98]. Son analyse synthétique et reprise et mise à jour pour nos besoins dans le Tableau 9.

Tableau 9 – Synthèse des propriétés des différentes technologies de modélisation de la connaissance à des fins d'aide à la décision

Méthodes	Arbres décisionnels	Système expert	Réseaux Bayésiens	Diagrammes d'Influence	Réseaux neuronaux	Chaînes de Markov	Réseaux de Pétri
Type	Logique	Logique	Probabiliste	Probabiliste	Statistique	Probabiliste	Logique
SYSTÈME							
Dynamique						X	X
Statique	X	X	X	X			
Apprentissage		X	X		X	X	
ACQUISITION							
Expertise seulement		X					
Données seulement	X				X		
Mixte	X		X	X	X	X	X
Données incomplètes			X	X	X		
REPRESENTATION							
Graphique	X		X	X			X
Facilité d'usage	X				X		X
Incertitude			X	X		X	
Utilisation							
Performances			X	X	x	X	X
Utilité économique			X	X	x		
Requêtes élaborées		X	X	X			

Les techniques présentées dans cette partie du document ont pour objectif de montrer comment l'organisation de la connaissance experte à des fins décisionnelles peut être faite. Le Tableau 9 n'a pas pour vocation d'être exhaustif, mais représente un bon aperçu des usages actuels, autant sur un plan académique que sur une utilisation plus opérationnelle.

Le problème majeur rencontré avec la modélisation de l'information reste l'acquisition et la formalisation de cette connaissance métier auprès des experts. Outre le fait que ces étapes requièrent de nombreux échanges (processus très chronophage), le transfert de connaissance depuis l'expert vers un modèle informatique est souvent perçu comme une perte de sa valeur-ajoutée au sein de l'entreprise : « *on peut très bien se passer de lui si un automate peut le remplacer* ». Cette perception, qu'elle soit vraie ou fausse, bride considérablement l'acquisition de connaissance. Enfin, par soucis de n'omettre aucune possibilité, l'expert rechigne à formaliser son expertise sous un format simplifié, seul format pouvant être assimilé par les technologies précédemment présentées. Malgré ces verrous, certaines technologies, comme les réseaux bayésiens, semblent adaptées à la modélisation de connaissances hétérogènes (données numériques et qualitatives, relations logiques, informations génériques et spécifiques) et incertaines (manipulations de données imprécises ou incomplètes). De plus, leur capacité à pouvoir raisonner par chaînage mixte autorise la manipulation connaissances dans un modèle unique pour remplir des tâches aussi diverses que variées (ex : outil de diagnostic, outil de prescription, et outil d'évaluation).

VII. L'analyse multicritère

L'analyse multicritère est une vaste discipline englobant l'ensemble des techniques permettant d'aider à la formalisation d'un cadre structuré pour répondre à un besoin de prise de décision (sélection, tri, rangement) parmi un ensemble d'options possibles. Dans la littérature, le terme d'*analyse multicritère* se réduit souvent à l'utilisation de méthodes d'aide à la décision multicritère (ADMC), mais nous préférons y adjoindre d'autres thématiques indissociables à ce domaine et qui sont : les méthodes d'aide à la formalisation des préférences (nécessaire à la définition d'une problématique) et les méthodes d'optimisation (pour identifier et réduire un espace de solutions potentielles efficace). En effet, la plupart des méthodes d'aide à la décision multicritère partent du postulat que l'ensemble des options à comparer est déjà clairement identifié et surtout que la définition des préférences d'un décideur est déjà actée. Or ces deux points, primordiaux, sont une partie intrinsèque du processus décisionnel, et nécessitent une attention particulière.

VII.1 Définition des enjeux, formalisation des préférences

Le besoin de recourir à des outils d'analyse multicritère né, initialement, d'une problématique complexe à résoudre. D'après Vanderpooten dans [59], nous avons d'un côté le « décideur » qui apporte sa problématique et ses préférences avec son langage propre (enjeux, objectifs opérationnels...); de l'autre nous avons un « homme d'étude » capable de traduire les attentes du premier protagoniste en un format d'objectifs performantiels (poids, valeurs-cibles ou valeurs-seuil), compatibles avec les entrées des méthodes d'analyse multicritère. Le passage d'un langage à l'autre n'est pas trivial et il n'est pas rare de mal interpréter les souhaits d'un décideur lorsque les échanges entre les deux personnes mentionnées sont insuffisants ou que l'homme d'étude ne comprends pas correctement une demande parfois mal formulée.

À l'issu de ce travail de thèse, très peu de méthodes permettant de passer du premier langage au second ont été répertoriées. Une première voie a été initiée avec la démarche HQE® où une matrice experte permet d'aider un décideur à transposer des enjeux environnementaux en niveaux-cibles sur les 14 cibles du référentiel [108]. Cette première méthode souffre néanmoins du fait que les enjeux proposés sont trop globaux pour être en adéquation avec les attentes spécifiques exprimées par un maître d'ouvrage. Une autre publication propose également une méthode d'analyse matricielle pour quantifier, par dires d'experts, les corrélations existantes entre plusieurs impacts environnementaux ciblés par les pouvoirs publics de la ville de Taïwan [109]. Cette approche offre un cadre intéressant pour la collecte d'une expertise métier multicritère auprès d'un panel de spécialistes d'un domaine. Cependant, dans cet exemple, il manque toujours l'idée de transposition d'un ensemble d'enjeux spécifiques en données performantielles interprétables par des outils d'optimisation ou d'aide à la décision multicritère (fonction-objectifs, poids, valeurs-seuils, etc.).

L'examen de ces méthodes montre que le besoin de traduire des préférences exprimées dans un langage opérationnel (celui du décideur) en un langage performantiel (celui assimilable par des outils d'aide à la décision) peut se faire par de l'acquisition et de la formalisation d'analyses expertes issues d'échanges avec des spécialistes d'un domaine d'étude (dans notre cas, celui de la rénovation de bâtiments). Bien qu'aucune approche satisfaisante n'existe à ce jour pour pallier ce vide méthodologique, les pistes énoncées semblent prometteuses.

Les méthodes de la modélisation des préférences directement sur des critères de décision, au niveau performantiel, sont quant à elles nombreuses. L'examen des approches existantes sur ce point précis est abordé à la section §VII.3.1.4 en page 86.

L'absence de méthodes existantes pour aider à la traduction des préférences exprimées par un décideur en données d'entrées nécessaires à la manipulation d'outil d'analyses multicritères (i.e. méthodes d'optimisation, méthodes d'aide à la décision multicritère) est un frein à l'utilisation de ces dernières.

VII.2 Méthodes d'optimisation

Une méthode d'optimisation permet de résoudre un « problème d'optimisation » c'est-à-dire qu'elle permet de trouver une solution qui minimise ou maximise un critère particulier. Le critère que l'on cherche à optimiser est souvent représenté par une fonction dite fonction d'objectif [110]. Lorsque la méthode d'optimisation cherche à optimiser une solution sur plusieurs critères, on parle alors de méthode d'optimisation multicritère et de fonction multi-objectifs.

Les méthodes d'optimisation, monocritère ou multicritère, consistent à rechercher parmi un ensemble d'action le plus souvent finies, par recherche combinatoire, le front de Pareto³⁶ d'un problème : c'est-à-dire l'ensemble de solutions non-dominées. Elles visent à réduire le champ de solutions potentielles à un problème pour ne garder que les meilleures sur au moins un des critères utilisés.

Dans le monde du bâtiment, les méthodes d'optimisation sont souvent utilisées comme des méthodes d'aide à la conception se basant sur la recherche de solutions les plus efficaces par itération de simulations numériques de bâtiment, à partir de configurations prédéfinies [22, 110].

VII.2.1 Optimums locaux et optimums globaux

On distingue deux types de solutions à un problème d'optimisation monocritère : les optima locaux et les optima globaux. D'après [110],

- Un optimum global x_0 est un point qui vérifie : $\forall y \neq x_0, f(x_0) < f(y)$
- Un optimum local x_0 est un point qui vérifie : $\forall y \neq x_0, y \in V(x) f(x_0) < f(y)$ où $V(x)$ est un voisinage de x

En fonction des propriétés des méthodes d'optimisation utilisées, on peut calculer soit des optimums locaux soit des optimums globaux.

VII.2.2 Familles de méthodes

Goldberg distingue trois familles de méthodes [111] : les méthodes énumératives, les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Nous allons aborder, de manière rapide, chacune de ces approches.

VII.2.2.1 Méthodes énumératives

Ce type de méthode est applicable pour les espaces de recherche finis ou infinis mais discrétisés. Un algorithme est alors utilisé pour évaluer la valeur de la *fonction objectif* pour chacun des points de l'espace de recherche préalablement délimité. Cette approche est

³⁶ Également appelé surface de compromis, elle délimite deux ensembles possibles de solutions à un problème.

- *ensemble de solutions dominées* : il est possible d'augmenter la performance sur un critère sans réduire celle des autres.
- *ensemble de solutions non-dominés* : l'augmentation de la performance d'un critère implique la réduction de la performance d'au moins un autre critère.

simple à mettre en œuvre mais ne convient pas aux problèmes de grandes tailles. Elle peut être coûteuse en temps de calcul et peu efficace.

VII.2.2.2 Méthodes déterministes

Appelées également méthodes systématiques ou exactes, les méthodes déterministes reposent sur la notion stricte de l'optimum mathématique et ne peuvent être appliquées le plus souvent que si la *fonction objectif* est continue et dérivable sur le domaine de recherche. Elles utilisent un gradient de la fonction objectif qu'il faut optimiser. Elles permettent la recherche d'optimums locaux.

Il existe deux catégories de méthodes déterministes : les méthodes d'exploration directes et les méthodes d'exploration indirectes. La première catégorie repose sur une *optimisation sans dérivées* qui vise à se déplacer dans le domaine de recherche dans une direction qui dépend du gradient de la fonction-objectif. La seconde, cherche à atteindre des extrema locaux en résolvant des systèmes d'équations obtenus en annulant le vecteur gradient d'une fonction étudiée.

La méthode de programmation linéaire du SIMPLEXE (appelée aussi méthode du polytope) est l'une des *méthodes déterministes directes* les plus couramment utilisées. Elle consiste, à partir un polytope initial (une figure géométrique à $n+1$ points, n étant la dimension du problème), à rechercher par itérations successives des solutions permettant de minimiser une fonction multi-objectifs. À chaque itération, des opérations algébriques simples (réflexions, contractions, expansion, rétrécissement...) permettent de calculer de nouveaux points du polytope qui peuvent être acceptés ou rejetés [112].

VII.2.2.3 Méthodes stochastiques

Ce type de méthodes rassemble les algorithmes basés sur une évolution probabiliste des solutions au problème posé [110] : *les algorithmes évolutionnaires*. Les algorithmes d'optimisation de ce type utilisent des procédures aléatoires ou pseudo-aléatoires. Les procédures aléatoires reposent sur une exploration du domaine de recherche et une mémorisation des meilleurs éléments retenus. Elles sont peu efficaces et peu robustes. Les procédures pseudo-aléatoires utilisent des choix aléatoires pour *guider* une exploration intelligente du domaine de recherche. Les méthodes d'optimisation utilisant l'approche stochastique sont généralement coûteuses en temps de calcul, mais permettent, sous certaines conditions de convergence, l'atteinte d'optima globaux.

A. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont couramment utilisés pour rechercher des optimums globaux à des problèmes mono ou multicritère de conception de bâtiments à haute performance énergétique [21, 113]. Leur fonctionnement repose sur le principe d'évolution des espèces de Charles Darwin : la sélection naturelle. Les solutions potentielles au problème d'optimisation sont codées sous la forme de chromosomes et les caractéristiques de ces solutions sous la forme de gènes (sur ces chromosomes). Un algorithme d'optimisation va alors explorer en parallèle l'espace de recherche en effectuant des recombinaisons génétiques des meilleures solutions via le phénomène de brassage de gènes lors de la reproduction d'une population sexuée (opérateurs génétiques sur les chromosomes : mutations aléatoires, inversions, croisements). L'inconvénient majeur de ce type de méthodes reste l'important temps de calcul nécessaire à l'obtention d'un résultat robuste (très souvent supérieur à la journée, voire la semaine) sur un cas d'étude standard³⁷.

³⁷ Fonction du nombre de gènes codés

B. Optimisation par essais particuliers

Le principe de cette méthode repose sur l'évolution d'un ensemble de particules caractérisées par une position et une vitesse, qui cherche à maximiser une fonction dans un espace de recherche donnée. L'analogie porte sur le comportement d'essaim d'abeilles et les interactions sociales entre individus devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun [114, 115].

C. Autres méthodes stochastiques

De nombreuses autres méthodes d'optimisation par approches stochastiques existent. Parmi les plus utilisées nous pouvons évoquer les méthodes du recuit simulé [116], de la recherche tabou [117] et des colonies de fourmis [118]. *Ce domaine n'étant pas le cœur de ces travaux de recherche, nous réorienterons le lecteur vers des ouvrages scientifiques centrés sur les méthodes d'optimisation appliquées à la réhabilitation de bâtiment [22, 110].*

VII.2.3 Optimisation sous contraintes

La plupart des problèmes d'optimisation comporte des contraintes à respecter (coûts économiques, lois de la physique, incompatibilités diverses). On parle alors de problèmes d'optimisation sous contraintes.

Les contraintes sont le plus souvent représentées comme des fonctions d'inégalité à respecter, faisant intervenir des valeurs-seuils. La violation de ces contraintes peut être sanctionnée de différentes façons (peine de mort, pénalités...) et de nombreuses méthodes existent pour les intégrer au processus d'optimisation. Nous allons par la suite, aborder brièvement les techniques de gestions de contraintes les plus connues.

- Peine de mort : Technique la plus simple et la plus couramment utilisée. Elle consiste à rejeter les solutions non-admissibles identifiées par l'algorithme de recherche de solutions optimales. Le critère de non-admissibilité est par nature, la violation d'au moins une contrainte programmée.
- Fonctions de pénalités : les solutions ne respectant pas une contrainte exprimée voient leur performance pénalisée. L'attribution de l'intensité de la pénalité sur la performance reste la plupart du temps un exercice empirique souvent discutable.
- Contraintes transformées en objectifs [119] : les contraintes sont converties en fonctions-objectifs. Le problème est alors assimilé à un système sans contraintes. L'inconvénient majeur est la possibilité d'obtenir, en sortie du problème d'optimisation, des solutions efficaces mais non-admissibles car elles ne respectent pas les contraintes. Une variante de cette approche consiste à introduire comme fonction-objectif non pas les contraintes mais le nombre de contraintes violées.
- Optimisation par contraintes successives : Elle consiste, contrairement aux autres types d'optimisation sous contraintes à traiter les contraintes de manière indépendante et chronologique. Au fur et à mesure que les contraintes sont appliquées, les solutions non admissibles sont rejetées ou pénalisées. Le challenge consiste à bien choisir l'ordre d'application des contraintes (souvent de la plus contraignante à la plus souple) et à bien définir le critère d'arrêt de l'algorithme pour obtenir au moins une solution admissible. Cette approche se rapproche le plus du principe de programmation par contraintes (Constraint Programming) qui vise plus à rechercher un sous-ensemble de solutions admissibles au regard de leur non-violation des contraintes exprimées qu'à minimiser une fonction-objectif.

Les trois premières techniques de gestions de contraintes présentées sont parfaitement adaptées aux méthodes d'optimisation stochastiques sans contraintes (*les algorithmes génétiques notamment*). La dernière technique est autoportante dans la mesure où elle peut se suffire à elle-même pour solutionner un problème d'optimisation. Elle peut également être utilisée en amont d'un problème d'optimisation sans contraintes pour écarter les solutions non-admissibles.

VII.2.4 Limites des méthodes d'optimisation multicritères

Ce type de méthode ne permet pas de réaliser des classements ou des choix sur des solutions lorsque plusieurs critères sont étudiés. Ils donnent uniquement des sous-ensembles de solutions admissibles non-dominées (ex : fronts de Pareto). Leur recours est le plus souvent nécessaire lorsque le travail d'élaboration de solutions est automatisable par optimisation combinatoire et que le domaine de recherche est important. Pour le travail d'analyse multicritère restant à effectuer sur les solutions retenues par les méthodes d'optimisation, les méthodes d'aide à la décision multicritères sont les candidates les plus adaptées.

Les méthodes d'optimisation multicritère permettent de dégrossir un domaine de recherche important en ne retenant que les solutions admissibles maximisant une fonction-objectif. Elles sont adaptées aux problèmes combinatoires mais sont souvent coûteuses en temps de calcul. Leur recours ne se substitue pas aux méthodes d'aide à la décision multicritère qui permettent d'identifier, parmi les meilleures solutions retenues, celles qui correspondent le mieux aux préférences d'un décideur.

VII.3 Méthodes d'aide à la décision multicritère

L'aide à la décision à, comme son nom l'indique, pour finalité d'aider un décideur à prendre une décision. Cette « aide » consiste principalement à collecter et formaliser un maximum d'information pertinente sur le sujet traité, identifier quels sont les leviers d'actions possibles, définir et évaluer des critères permettant de comparer les différentes actions envisageables. Nous allons aborder dans cette partie de l'état de l'art différents points : les prérequis à l'Aide à la Décision Multicritère (ADMC), les méthodes existantes pour formaliser ses prérequis et traiter différents types de problématiques décisionnelles, la place des incertitudes dans les processus automatisables d'aide à la décision, pour enfin porter un regard critique sur le fonctionnement et la finalité de ces méthodes.

VII.3.1 Prérequis à l'aide à la décision multicritère

L'aide à la décision est une approche scientifique traitant des problèmes de décision. Elle réunit deux acteurs principaux qui sont le décideur et l'homme d'étude d'après Vanderpooten [120]. Le premier apporte la problématique, les enjeux qui lui sont associés et ses préférences. Le second intervient sur la modélisation du problème de décision ou sur l'adaptation d'une procédure d'exploitation du modèle.

L'aide à la décision multicritère base son analyse sur plusieurs critères de décision. Chaque critère représente une facette d'une même problématique (ex : coûts financiers, temps de mise en œuvre, amélioration du confort...). À l'inverse d'une approche monocritère qui recherche un optimum, l'approche multicritère recherche quant à elle un compromis.

Un problème requérant l'utilisation de n'importe quelle méthode d'aide à la décision multicritère doit réunir 4 prérequis pour être traité :

1. Définir le type de problématique à traiter (Choix, Tri, Rangement...)
2. Réunir un ensemble d'actions potentielles à comparer (décisions, solutions, plans, variantes, alternatives...)
3. Construire des critères pour évaluer l'intérêt de chaque action sur un ou plusieurs aspects. Les critères manipulés peuvent être quantitatifs (issus de mesures, calculs) mais aussi qualitatifs (avis d'experts).
4. Définir les préférences d'un ou plusieurs décideurs (pondération des critères, attributions de seuils, actions de référence...).

La plupart des méthodes d'aide à la décision multicritère ne permettent que de comparer un nombre limité d'actions proposées pour répondre à un problème posé. La génération de ces actions et leur évaluation multicritère sont des prérequis essentiels. Dans certains cas – problèmes combinatoires notamment – des méthodes d'optimisation multicritères peuvent être utilisées pour mettre en évidence un sous-ensemble acceptable de « bonnes actions » à comparer.

Nous allons maintenant explorer chacun de ces 4 prérequis.

VII.3.1.1 *Problématiques décisionnelles*

D'après Roy [60], quatre types de problématiques décisionnelles peuvent être traités par les méthodes d'aide à la décision multicritère. En fonction de la problématique à traiter, certaines méthodes sont plus adaptées que d'autres.

Tableau 10 – Différentes problématiques décisionnelles selon Roy

Problématique	Objectif	Processus	Exemple de méthodes
α	sélection de la meilleure action	Choix / Sélection	ELECTRE I (1968) ELECTRE II (1972)
β	affectation de l'action dans une catégorie	Tri / Affectation	ELECTRE TRI (1991)
γ	hiérarchisation des actions	Rangement / Classement	ELECTRE III (1977)
δ	description des actions	Procédure cognitive	-

VII.3.1.2 *Actions à comparer*

Appelées aussi décisions, solutions, plans, variantes, candidats, alternatives, scénarios, etc. les actions à comparer représentent l'espace de solutions du problème décisionnel. Cette espace de solutions, pour la plupart des méthodes d'aide à la décision multicritère, doit être finis et comprendre un nombre raisonnable d'actions. En effet, la majorité des algorithmes permettant de résoudre les différentes problématiques décisionnelles mentionnées précédemment, reposent sur des calculs arithmétiques plus ou moins nombreux. Plus l'espace de solutions est grand, plus le temps de calcul et l'allocation mémoire nécessaire sera important.

Pour les problèmes combinatoires (où chaque action à comparer est composée de plusieurs sous-actions interconnectés ou indépendantes), l'utilisation de méthodes d'optimisation multicritères est conseillée (voir section §VII.2 en page 81). Cela afin de préalablement réduire l'espace de solutions potentielles en un sous-ensemble de *bonnes actions* à comparer.

Nous utiliserons dans la suite de ce document, aussi bien les dénominations alternatives, scénarios ou actions pour mentionner les actions à comparer dans un problème d'aide à la décision multicritère.

VII.3.1.3 Critères de décision

Des critères de décision sont utilisés pour évaluer l'intérêt des actions potentielles sur plusieurs aspects. Les critères sélectionnés par le décideur doivent être exhaustifs, non-redondants et compréhensible par tous. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs (voir le sous-chapitre IV.2.1 de l'état de l'art). On privilégiera une définition des critères sur des échelles finies de valeurs cardinales ou au moins ordinales, quel que soit les unités manipulées (-, %, €, kg, m²...).

Au-delà d'un certain nombre de critères (> 10 à dire d'experts), l'interprétation des résultats perd peu à peu de son sens. Il est souvent préférable de garder un sous-ensemble de critère considéré comme les plus importants pour le décideur.

VII.3.1.4 Modélisation des préférences

Les préférences des décideurs peuvent être modélisées de deux manières différentes dans les méthodes d'aide à la décision multicritère d'après Bertsch [121] : la voie inter-critères et la voie intra-critères. La première, représentée généralement par un jeu de poids relatifs associés aux critères, vise à modéliser les interactions entre critères. La seconde, utilisant plutôt des valeurs ou des fonctions de valeurs³⁸, modélise les préférences intrinsèques à chaque critère (i.e. celles-ci sont calibrées indépendamment d'un critère à l'autre). Les deux types de préférences représentés à titre d'exemple dans le Tableau 11, peuvent ou non être utilisés dans une même méthode d'aide à la décision multicritère.

Tableau 11 – exemples de paramètres intra et inter-critère sur trois critères

Critères	Paramètres inter-critères	Paramètres intra-critères				
	Poids relatifs [%]	Borne « Min »*	Borne « Max »*	Seuils bas	Seuils hauts	Valeurs cibles
Coût [k€]	65	2	100	5	50	-
Énergie [kWh _{EP} .m ⁻² .an ⁻¹]	25	0	600	30	120	80
Confort [-]	10	0	5	2	5	4

* Bornes « min » et « max » de l'intervalle de valeurs possibles

A. Paramètres inter-critères : les poids

La définition de l'importance relative des critères utilisés pour argumenter une analyse, prendre une décision est une étape primordiale pour Moura dans [58]. Les poids attribués reflètent le point de vue des décideurs, définissent leurs préférences (systèmes de valeurs, convictions, opinions). Diverses méthodes de pondération de critères existent d'après Wang dans [61] et leurs résultats peuvent grandement influencer le résultat final d'une analyse. Les poids peuvent être déterminés par des méthodes dites « objectives » [122] (se basant sur le principe d'entropie de l'information plus que sur les préférences du décideur), par des méthodes d'évaluation directe, comme le classement simple ou la méthode de comparaisons successives [123] ou encore des méthodes indirectes,

³⁸ Comme les notions de seuils des méthodes ELECTRE. Dans ces méthodes, les seuils ne représentent pas des valeurs de critères mais des écarts de valeurs entre paires d'actions comparées sur un même critère (voir le principe de fonctionnement des méthodes de surclassement en page 88).

comme la méthode AHP [124]. Il est important de garder à l'esprit que les poids attribués à chaque critère ont une influence considérable sur le résultat de méthodes d'aide à la décision. En ce sens, il est fortement recommandé de réaliser des analyses de sensibilités sur ces paramètres afin de vérifier la robustesse d'une analyse.

▪ Méthode de pondération AHP

Saaty 1980 propose une méthode de pondération indirecte basée sur la comparaison de critères. Un jugement est émis par le décideur sur l'importance relative de chaque critère comparé deux à deux. Une matrice d'importance par paire de critères est alors constituée ; puis des scores sont calculés pour obtenir des poids relatifs attribués à chaque critère. Un indice de cohérence est également calculé pour vérifier si le principe de transitivité des degrés d'importances données par couple de critère est plus ou moins respecté [124]. Cette technique devient complexe à utiliser si le nombre de critère devient important.

▪ Méthode de pondération par l'entropie

Proposée par Zeleny en 1982 [122], cette méthode permet de déterminer les poids associés aux critères de décision en se passant de l'implication directe et active du décideur [125]. L'importance d'un critère, par rapport aux autres, est déterminée en fonction de la variabilité des valeurs calculées pour chaque alternative : si un critère donne souvent une même valeur, alors il est considéré comme peu ou non important dans l'élaboration d'un jugement. Inversement, plus un critère prend des valeurs différentes à travers les alternatives évaluées, plus ce critère aura une chance d'influer sur une prise de décision ; il est alors considéré comme important car il a un pouvoir discriminant. En d'autres termes, lorsque la matrice de performance est constituée pour un problème d'aide à la décision (exemple en Tableau 12), les poids des critères sont calculés, a posteriori, en calculant la variance sur les valeurs de chaque critère : plus la variance est élevée, plus le critère possède un poids important, et inversement.

B. Paramètres intra-critères : les valeurs-seuils

La nature des paramètres dépend du type de modèle utilisé pour représenter le critère. Ici, il n'y a pas de dépendance entre critère, chaque paramètre intra-critère peut être défini indépendamment des paramètres du critère voisin. La définition des valeurs des paramètres intra-critères peut être une étape primordiale dans le recueil des préférences du décideur. Elle consiste à définir les préférences d'un décideur directement sur les échelles de performance des critères manipulés. Ainsi, des niveaux minimaux et maximaux admissibles de performance peuvent être définis par critères (sous la forme de valeurs-seuils), mais aussi des profils de niveaux-ciblés de performance que l'on cherche à atteindre ou encore de profils de référence que l'on utilise pour trier des solutions dans différentes catégories. Par exemple le modèle de pseudo-critère repose sur la définition de 3 seuils appelés respectivement seuil d'indifférence, de préférence et de veto. Malheureusement, aucune méthode généralisable n'a été recensée à ce jour pour aider à la définition de ces seuils.

VII.3.1.5 La synthèse des trois précédents prérequis mentionnés : le tableau des performances

L'aide à la décision multicritère revient toujours à comparer des alternatives potentielles à l'aide de critères d'évaluation et en intégrant les préférences du ou des décideurs. L'ensemble de ces notions est souvent capitalisé dans un tableau de synthèse appelé *tableau des performances* (ou *matrice des performances*). Un exemple générique est proposé en Tableau 12 ; on y retrouve les trois notions citées précédemment :

- alternatives à comparer (A_1, \dots, A_M)
 - critères d'évaluation (C_1, \dots, C_N)
 - préférences du décideur
 - o sous la forme d'une pondération des critères (w_1, \dots, w_N) ; ou/et
 - o sous la forme de profils de référence (B_1, \dots, B_J).
- } permettant d'évaluation des actions (a_{11}, \dots, a_{MN}) ;

Tableau 12 – Tableau des performances (exemple générique)

ALTERNATIVES (↓)	CRITÈRES D'ÉVALUATION (↓)				
	C_1	C_2	C_3	...	C_N
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1N}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2N}
A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3N}
.
.
.
A_M	a_{M1}	a_{M2}	a_{M3}	...	a_{MN}
Poids relatifs (→)	w_1	w_2	w_3	...	w_N
B_1	b_{11}	b_{12}	b_{13}	...	b_{1N}
.
B_J	b_{J1}	b_{J2}	b_{J3}	...	b_{JN}

VII.3.2 Panorama des principales méthodes d'aide à la décision multicritère existantes

La littérature présente de nombreuses méthodes d'aide à la décision multicritère. Roy propose de les classer en trois catégories [60]. La première rassemble les méthodes basées sur l'agrégation de critères en critère unique de synthèse, la seconde regroupe les méthodes de surclassement visant à comparer deux à deux des alternatives, la dernière catégorie regroupe les approches itératives se basant sur l'amélioration pas à pas d'une décision finale.

VII.3.2.1 Critère de synthèse

Courant de pensée de l'école anglo-saxonne, les méthodes d'agrégation en critère de synthèse, consistent à maximiser (ou minimiser) une fonction d'utilité construite à partir des critères définissant chaque action potentielle. Le type d'agrégation le plus courant est la somme (ou la moyenne) pondérée, mais d'autres types sont largement utilisés dans l'industrie et la recherche (produit pondéré, distance pondérée...). Les méthodes MAUT, MAVT, AHP, SMART, TOPSIS sont les plus représentatives de ce courant de pensée [126].

Forme additive d'un critère de synthèse

$$g(a) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot g_i(a)$$

Avec

a : une action (alternative)

p_i : poids du critère i ($k_i > 0$)

g_i : fonction du critère i

g : critère unique de synthèse

Ces modèles ont l'inconvénient d'être totalement compensatoires. Ainsi, un profil avec une valeur très pénalisante sur un critère important peut être jugé comme très performant si les valeurs sont élevées sur de nombreux autres critères : l'information-clé est noyée par l'agrégation pondérée des performances sur chacun des critères contributeurs.

VII.3.2.2 Méthodes de surclassement

Dans cette approche, les méthodes de surclassement ou d'agrégation partielle, consistent à comparer les alternatives deux à deux et à vérifier si, selon certaines conditions préétablies, l'une des deux alternatives surclasse l'autre. À partir de toutes ces comparaisons, on tente ensuite de construire une solution en fonction de la problématique décisionnelle [127].

Les méthodes de surclassement ont l'avantage de permettre une évacuation partielle du phénomène de compensation entre critères lors de la traditionnelle étape d'agrégation. L'agrégation se fait ici sur les différences de performances sur chaque critère entre paire d'alternatives (principe de la relation de surclassement) et non directement sur les performances des critères pour chaque alternative. Les méthodes de ce type ont également l'avantage de prendre en compte l'incomparabilité des alternatives, entre-elles, lorsque leurs performances sur certains critères sont trop disparates [128].

Ce type de méthode tire sa particularité du fait que leur analyse se focalise plus sur les résultats des comparaisons entre alternatives que sur l'analyse des alternatives même. Néanmoins, le processus de pondération des critères – traduisant les préférences des décideurs – reste nécessaire.

Ces principales méthodes de surclassement sont les méthodes ELECTRE [60, 129], PROMETHEE, ORESTE et QUALIFLEX.

VII.3.2.3 Jugements itératifs

Appelées méthodes d'itérations essai-erreur ou d'agrégations locales itératives, elles sont principalement destinées aux études disposant d'un très grand nombre d'alternatives, voir infini. La technique est alors de partir d'une solution de départ (aussi bonne que possible) et de voir "autour" de cette solution s'il n'y en a pas de meilleure, et cela de manière itérative. Cette approche s'apparente plus à un travail d'optimisation que d'aide à la comparaison. Ces méthodes nécessitent une forte interaction entre l'homme d'étude et le décideur. Elles se décomposent en trois phases d'après Ben Mena dans [127] :

- une phase de recherche : l'homme d'étude exploite les informations recueillies au cours de l'itération précédente afin de se faire une meilleure idée des préférences implicites du décideur
- une phase de réinitialisation : l'homme d'étude "repart à zéro" sur base de toutes les informations en sa possession et met au point une nouvelle proposition pour la soumettre au décideur

- une phase de réaction : le décideur émet un avis sur la dernière proposition et l'homme d'étude injecte cette nouvelle information dans une nouvelle itération

VII.3.3 Synthèse et discussion sur les familles de méthodes d'aide à la décision multicritère

Le Tableau 13 reprend de manière synthétique les différents avantages et périmètres d'utilisation des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère présentées précédemment. Ce travail de synthèse peut aider un homme d'étude à s'orienter vers un type de méthodes en fonction des caractéristiques de sa problématique.

Tableau 13 – Présentation synthétique des avantages et faiblesses des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère

	Critère de synthèse	Surclassement	Jugements itératifs
Taille des ensembles d'actions à comparer	Petite à très grande	Petite à modérée	Très grande à ∞
Compensation entre critères	Totale	Partielle	-
Modulation des préférences	paramètres inter-critères (poids) et intra-critères (seuils)		-
Prise en compte des incertitudes sur les valeurs des critères	Possible	Oui	-
Détection des conflits (incomparabilités)	Non	Oui	-
Niveau des interactions avec le décideur	Faible	Moyenne	Élevé
Complexité des calculs	Faible	Moyenne à importante	Souvent importante
Automatisation du processus	Oui	Oui	Au cas par cas

Nous avons vu à travers ce bref état-de-l'art sur les méthodes d'aide à la décision multicritère que le choix d'une méthode dépend du type de problématique décisionnelle souhaité. Les obstacles principaux à l'utilisation de toutes les méthodes énoncées sont la nécessité d'évaluer systématiquement toutes les alternatives à comparer avec le même jeu de critères de décision, ainsi que d'interpréter et formaliser avec le plus grand soin les préférences du décideur. Ce travail préparatoire s'avère souvent long et fastidieux.

Ces méthodes souffrent également de quelques défauts. Le premier est lié au fait que ce sont des modèles statiques : une fois le système posé, l'intégration de nouvelles données devient lourde et complexe. Le second défaut est lié à leur complexité : pour le décideur, les mécanismes calculatoires permettant de passer du tableau des performances au résultat final sont souvent perçus comme un système opaque. On ne comprend pas bien leur fonctionnement et la légitimité du résultat obtenu peut être discutée.

La plupart des méthodes d'aide à la décision multicritère sont des outils permettant l'automatisation rationnelle des processus de comparaisons de solutions. Elles permettent de comparer intelligemment des actions, d'argumenter un choix, de communiquer sur des potentialités, mais ne se substituent en aucun cas à la prise de décision finale qui reste parfois peu rationnelle.

VII.3.4 Prise en compte de l'incertain

Trois différents types d'incertitudes sont à considérer dans les problématiques d'aide à la décision multicritère [130]. Prises séparément ou de manière combinées, elles peuvent considérablement impacter sur les sorties recherchées (classements, tris, choix...) :

- Incertitude sur les données : les données recueillies ne sont pas parfaites ; beaucoup d'entre elles peuvent se montrer imprécises.
- Incertitude sur les paramètres : pour n'importe quelle méthode utilisée, des paramètres définissant les préférences (seuils, poids) sont manipulés. Ils peuvent être difficiles à définir.
- Incertitude sur la méthode : différentes méthodes utilisant les mêmes paramètres et les mêmes données peuvent fournir des résultats différents. Il peut être donc utile de répondre à la problématique posée avec au moins deux méthodes. [131].

La pratique d'analyse de robustesse sur les deux premiers types d'incertitudes est très fortement recommandée pour renseigner le décideur sur la confiance qu'il peut accorder au résultat obtenu. Le recours à plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritère peut s'avérer une piste intéressante lorsque l'interprétation des résultats obtenus pose problème.

L'analyse multicritère réunit les deux domaines d'études complémentaires que sont l'optimisation et l'aide à la décision multicritère. Ils permettent respectivement de rechercher les solutions les plus performantes, contraintes ou non, pour résoudre une problématique énoncée, et d'aider à leur comparaison en les confrontant aux préférences des décideurs.

L'utilisation de méthodes d'analyse multicritère nécessite au préalable la collecte de nombreuses informations sur une problématique formulée. Une part de ces informations est dénuée de toute subjectivité (*l'évaluation des critères pour chaque alternative constituée*), l'autre correspond à la modélisation des préférences des décideurs (*poids, seuils, etc.*).

Les méthodes d'optimisation permettent de rechercher ou constituer intelligemment des sous-ensembles de solutions performants au regard des préférences et contraintes modélisées par les décideurs. Elles sont adaptées aux problèmes de grandes tailles (combinatoires, heuristiques) mais souffrent d'une assez grande complexité qui freine considérablement leur démocratisation. Il faut cependant garder à l'esprit que les méthodes d'optimisation ne se substituent pas aux méthodes d'aide à la décision multicritère.

Les méthodes d'aide à la décision multicritère ont, quant à elles, pour objectif d'aider à la comparaison rationnelle de solutions pour mettre en lumière celles qui répondent le mieux à la problématique exprimée. Elles permettent l'argumentation structurée d'un choix pour un décideur ou devant des tierces personnes (outil de conviction) mais le plus souvent, la logique de choix final reste non rationnelle (enjeux politiques non exprimées ou autres...).

La limite principale à toutes ces méthodes est la définition des valeurs de paramètres matérialisant les préférences des décideurs. Ces dernières sont très impactantes sur le résultat attendu (classement, tri...) et le décideur, qui est rarement un homme d'étude, est rarement aidé dans l'attribution de valeurs sur ces paramètres-clés. Il doit généralement collaborer avec une personne maîtrisant ces outils pour pouvoir transposer ses besoins en « préférences » interprétables par les outils manipulés.

VIII. La naissance d'une problématique

La traversée de l'état de l'art nous a permis d'investiguer le niveau actuel de connaissances de la communauté scientifique sur de nombreuses thématiques centrées ou à l'interface « science du bâtiment / sciences de la décision ». Les études typologiques sur le parc de logements français ont montré l'importance du gisement d'économies d'énergie potentielles associé aux constructions de la période 1945-1974. Les bâtiments de cette époque cumulent les avantages : nombreux bâtiments, typologies clairement identifiées, performance énergétique exécration, conditions de confort ne répondant plus aux normes actuelles, esthétique démodée. De plus, les politiques publiques, aux travers d'incitations financières et plans de rénovation d'envergures, encouragent à la rénovation énergétique de ces logements. Dans le cas spécifique des maisons individuelles, la contrainte économique reste bien évidemment un véritable obstacle au déclenchement de l'acte de rénovation mais n'explique pas systématiquement le manque de passage à l'acte. Les offres actuelles d'aide à la rénovation, aussi bien sous la forme d'outils que de mécanismes financiers, limitent leur analyse à la dimension technico-énergétique et sont parfois associées à des choix de travaux génériques ne correspondant pas forcément aux attentes des maîtres d'ouvrage. Toujours pour le secteur de la maison individuelle, la phase de conception d'une opération de rénovation reste by-passée par un manque d'expertise. La maîtrise d'ouvrage, souvent incarnée par le propriétaire occupant, n'a ni le budget pour recourir à des maîtres d'œuvre spécialisés dans la conception (ex : architectes, bureaux d'études...), ni les compétences pour remplacer ces acteurs. Elle a le plus souvent recours à des professionnels qui maîtrisent un ou deux-type de travaux mais manquent la vision globale de l'opération (impacts multicritères associés à une solution, compatibilités entre solutions, etc.). Toutes ces raisons expliquent notre intérêt marqué pour aider à la rénovation de ce type de bâtiment : les maisons individuelles de la période 1945-1974.

Une fois la cible de notre analyse établie, nous nous sommes intéressés aux méthodes et outils actuels d'aide à la conception et la prescription de travaux pour la rénovation énergétique de bâtiments. L'offre actuelle ne répond pas à la demande du secteur : 1) les enjeux spécifiques associées à un projet de réhabilitation ne sont jamais intégrés aux phases de conception des stratégies de rénovation ; 2) peu d'analyses multicritères sur les impacts associés à n'importe quel choix sont proposées aux utilisateurs ; 3) les nombreuses incertitudes liées à la caractérisation du bâti existant ne sont pas pris en compte dans les mécanismes d'aide la décision. Ces constats nous ont poussés à parfaire l'état de l'art sur ces trois axes. L'examen détaillé du premier axe sera abordé plus tard dans notre analyse. Le second axe, quant à lui, nous a permis de faire un tour d'horizon sur les différentes bases de données, bases de connaissances, référentiels d'analyses multicritères et d'indicateurs de performance existants autour de la sphère « bâtiment / aide à la décision ». L'offre actuelle est riche et foisonnante mais les connaissances proposées sont disséminées à travers différents supports (guides spécialisées, bases de données, auditions de spécialistes) et sous de nombreux formats (données numériques, analyses qualitatives, retours d'expériences...) ne facilitant pas le processus d'aide à la décision via une approche globale. Le besoin de capitaliser ces analyses au travers d'un modèle unique et polyvalent nous poussera par la suite à nous intéresser aux outils d'intelligence artificielle. Du côté des incertitudes, la traversée de l'état de l'art nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les techniques actuelles de gestion de l'incertain dans les modèles numériques et de manipulation des connaissances. Nous retiendrons les approches probabilistes, adaptées aux problématiques de capitalisation de connaissances hétérogènes, pour codifier et propager les incertitudes potentiellement associées à une opération de rénovation. Ce type de techniques permet d'uniformiser la codification de connaissances quantitatives et qualitatives en un seul format ; les propriétés particulières du théorème de Bayes permettent ensuite de propager des informations imprécises sous la formes de probabilités conditionnelles. Ces recherches bibliographiques nous ont ensuite poussés vers les techniques de modélisation de connaissances (appartenant au domaine de l'intelligence

artificielle) permettant de formaliser des connaissances génériques hétérogènes pour réaliser de l'inférence à partir d'informations spécifiques associées à des opérations de rénovation réelles. La recherche menée nous a orientés vers une technologie permettant à la fois de manipuler des données probabilisées ainsi que de réaliser de l'inférence par chaînage avant (déduction) et chaînage arrière (induction) : les réseaux bayésiens. Cette technologie prometteuse permettrait de répondre à tous nos besoins, à la condition de pouvoir préalablement capitaliser et formaliser en son sein, les connaissances expertes génériques associées à deux thématiques : les règles expertes permettant de vérifier que les conditions nécessaires à la mise en œuvre des solutions de rénovation retenues soient respectées, ainsi que réaliser une évaluation multicritère de ces mêmes solutions.

Le domaine de recherche principal de ces travaux de thèse restant l'aide à la décision, l'examen des méthodes actuelles d'optimisation et d'aide à la décision multicritères a soulevé l'absence d'outils permettant de traduire les attentes (i.e. enjeux et préférences) exprimées par une maîtrise d'ouvrage en un format compatibles avec les entrées de ces méthodes (jeux de poids et/ou seuils). Cette absence représente un frein à l'utilisation de ces méthodes qui restent par conséquent réservés aux hommes d'études qui à eux seuls, savent les paramétrer et interpréter les résultats obtenus. À ces exceptions près, la revue des outils existants d'analyse multicritères nous a permis d'identifier des méthodes intéressantes comme les *algorithmes d'optimisation par contraintes successives* permettant de rechercher des assemblages de solutions de rénovation à la fois compatibles avec des prérequis (contraintes techniques) et avec des niveaux de performances exigées (contraintes performantielles), ainsi que des méthodes d'aide au classement multicritères tenant compte de paramètres incertains comme la méthode ELECTRE III.

À l'issu de l'examen de cet état de l'art, le principal constat est le manque de méthodes permettant la prescription de scénarios d'améliorations énergétiques via une approche multicritère. Cette tâche, principalement réservée à l'homme d'étude en charge d'une opération, nécessite de nombreuses connaissances techniques ainsi qu'une grande capacité à comprendre et reformuler les attentes exprimées par la maîtrise d'ouvrage. Les outils informatiques existant sont calibrés pour l'évaluation des performances, soit dans une optique de conception, soit dans une optique d'évaluation/certification ; alors que l'aide à la prescription de solutions techniques reste un domaine plutôt délaissé. Cela peut s'expliquer par les manques actuels pour pallier les problématiques suivantes mises en évidence au cours de la traversée de l'état de l'art :

- *La définition et l'intégration des préférences de la maîtrise d'ouvrage dans le processus d'élaboration des alternatives de rénovation*

Au niveau des outils d'aide à la décision, l'approche classique consiste à définir les préférences de la maîtrise d'ouvrage sous la forme de poids et/ou valeurs-seuils lorsque le problème multicritère a été préalablement posé. Néanmoins, les méthodes existantes sont souvent trop complexes pour être utilisées directement par la maîtrise d'ouvrage ; d'autant plus que cette dernière ne partage pas le même vocabulaire que les professionnels de la rénovation. D'un côté nous avons la maîtrise d'ouvrage qui maîtrise rarement le langage technique du bâtiment, et de l'autre nous avons le professionnel qui doit cerner des besoins exprimés le plus souvent sous la forme d'objectifs opérationnels par la maîtrise d'ouvrage. Cette discontinuité entre la formalisation d'un besoin et la complexité des méthodes d'analyse multicritère constitue un obstacle à leur utilisation. De rares travaux ont été menés pour piloter par objectifs l'orientation possible des travaux de rénovation permettant d'améliorer la performance énergétique de logements ; cependant les rouages permettant de passer des enjeux aux bouquets de solutions restent limités à une optimisation énergétique (monocritère) [20] ou bi-critère (coût / énergie) [2] et n'intègrent pas les problématiques de compatibilité technique.

- **Formalisation d'une expertise diffuse et hétérogène**
L'automatisation du processus de prescription est difficile dans la mesure où il n'existe pas deux opérations similaires et que l'éventail de solutions techniques potentielles ratisse l'ensemble des vues métiers du bâtiment (isolation, menuiseries, chauffage, ventilation, régulation...). Chaque solution se caractérise différemment les unes des autres et possède des prérequis à leur mise en œuvre qui leur sont propre. Ce « savoir métier », indispensable à la prescription de solutions, est hétérogène et ventilé sur plusieurs familles de métiers. La génération d'alternatives de rénovation (i.e. bouquets de solutions techniques) compatibles avec les spécificités de l'existant, efficaces au regard des préférences de la maîtrise d'ouvrage n'en devient que plus complexe.
- **Un processus empreint d'incertitudes liées à la connaissance de l'existant**
L'acte de rénover se fait nécessairement dans des environnements incertains (données techniques et architecturales d'origine souvent manquantes, impossibilité de recourir à des sondages intrusifs, manque de traçabilité sur les travaux antérieurs de rénovation). De nombreux outils et méthodes permettent de réduire, codifier et propager ces incertitudes. Cependant la plupart se limitent au calcul et à la modélisation d'indicateurs de performance pour des scénarios de rénovation déjà préétablis par des hommes d'études. Le processus d'aide à la décision, assisté ou non par des outils, se limite au tri-classement-sélection de ces scénarios sur la base de l'analyse de critères intégrant ou non les incertitudes propagées. La question de l'élaboration de scénarios de rénovation reste un domaine réservé à l'homme d'étude qui propose des orientations techniques en fonctions des informations qu'il possède.

Ces trois constats constituent les verrous scientifiques et techniques qui peuvent probablement expliquer le manque actuel d'outils d'aide à la décision permettant d'aider à la prescription de scénarios d'amélioration énergétique pour des bâtiments existants. L'absence de méthode existante répondant à ces trois verrous peut, en soit, être compensée par les connaissances expertes d'un homme d'étude missionné par la maîtrise d'ouvrage pour réaliser cette tâche pour de grandes opérations de rénovation (logements collectifs, bureaux, ouvrages d'art...). Cependant, lorsque l'on s'intéresse plus précisément au secteur du logement individuel, où le professionnel qui intervient réalise à la fois les études de conception et la réalisation des travaux, l'utilité d'une telle méthode prend tout son sens. Comment lui apporter des outils permettant de pallier certaines lacunes techniques et l'assister dans l'élaboration de stratégies efficaces et compatibles ? C'est pour répondre à cette problématique que ce travail de thèse a été engagé.

L'état de l'art nous a montré des pistes intéressantes pour essayer d'apporter des réponses à ces trois types de verrous. Pour ce qui est de la formalisation de connaissances hétérogènes dans une logique d'aide à la décision, le recours aux méthodes d'inférence probabilistes – *comme les réseaux bayésiens* – semble la voie la plus adaptée. Leur prédisposition à manipuler des connaissances génériques hétérogènes et d'informations spécifiques permet, à partir d'un même modèle, d'en faire des outils de diagnostic, de prescription et d'évaluation. À notre connaissance, aucun autre travail de recherche n'a été entrepris pour adapter cette technologie d'intelligence artificielle au domaine de la rénovation énergétique de bâtiment.

Pour ce qui est de l'intégration des incertitudes épistémiques dans les processus d'aide à la caractérisation techniques de l'existant, de prescription et de d'évaluation multicritère des scénarios de rénovation, deux axes sont minutieusement étudiés. Le premier reste les outils d'inférences probabilistes précédemment mentionnées : les réseaux bayésiens ; ils permettent de raisonner dans l'incertain, ce qui répond à la problématique fixée. Le second cible plus précisément le classement préférentiel des nombreuses alternatives de rénovation pouvant être proposés à la maîtrise d'ouvrage. Ces scénarios sont évalués à l'aide

d'indicateurs de performance ayant chacun une plage d'incertitudes. Par conséquent, la méthode d'aide au classement multicritère à mettre en œuvre devra intégrer ce type d'incertitudes. Nous nous intéressons plus particulièrement aux méthodes ELECTRE qui ont l'avantage, en plus d'avoir largement été utilisées dans le secteur de l'industrie et les sciences de l'environnement, de tenir compte des incertitudes associées données mais aussi aux préférences de la maîtrise d'ouvrage.

Enfin, pour répondre au besoin d'aide à la formalisation des préférences du maître d'ouvrage dans le processus d'élaboration des alternatives de rénovation, l'état de l'art ne nous a pas permis de trouver un axe particulièrement pertinent. Pour pallier ce manque, nous proposerons une méthode innovante basée sur l'analyse experte (multicritère et générique) collectée auprès de spécialistes de la rénovation et formalisée sous la forme d'une matrice à deux dimensions. Cette dernière consiste à convertir des enjeux potentiels de rénovation en poids relatifs et niveaux-cibles de performances, interprétables par des outils d'analyse multicritère (optimisation et aides au classement).

Nous comptons, à travers ce travail de thèse, repousser l'état de l'art existant sur la thématique de l'aide à la prescription d'améliorations énergétiques pour les opérations de rénovation de logements individuels. Les trois verrous mentionnés précédemment constituent à la fois le prisme d'attaque de la problématique et les aspects innovants de cette démarche. Nous verrons à travers les deux parties suivantes de ce mémoire si nous parvenons à surmonter ces obstacles pour proposer une méthode d'aide à la décision fonctionnelle.

Troisième partie : Méthode proposée

I. Cahier des charges	98
II. Présentation générale de la méthodologie d'aide à la décision développée	99
II.1 Présentation générale du principe de fonctionnement de la méthodologie.....	99
II.2 Entrées/sorties des 4 phases opérationnelles de la démarche	101
II.3 Présentation sommaire des 6 sous-modèles de la méthodologie.....	102
III. Description détaillée des sous-modèles	107
III.1 M1 : Décomposition fonctionnelle d'un bâtiment et structuration des alternatives .	107
III.2 M2 : Capitalisation et formalisation des connaissances métiers.....	113
III.3 M3 : Système d'évaluation des performances.....	121
III.4 M4 : Système d'aide à la formalisation des préférences du décideur	148
III.5 M5 : Évaluation multicritère et optimisation sous contraintes des alternatives.....	163
III.6 M6 : Tableau de bord, classement multicritère automatisé & pilotage manuel	185
IV. Conclusion sur la méthode complète proposée	196

Cette partie du document est découpée en quatre sous-parties. La première consiste à exprimer un cahier des charges pour la future méthodologie d'aide à la décision pour la rénovation en intégrant les attentes formulées lors de la définition de la problématique. La seconde présente de manière générale la méthodologie développée et son fonctionnement. La troisième détaille en profondeur chaque sous-modèle technique qui compose le processus décisionnel. Enfin, la quatrième propose une analyse synthétique des travaux effectués.

I. Cahier des charges

À travers l'état de l'art développé et les problématiques mises en évidence sur le thème de l'aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique appliquée au bâtiments résidentiels, un cahier des charges pour la méthodologie à développer s'est profilé.

Périmètre

La méthodologie visée doit principalement aider à la prescription d'assemblages de solutions de rénovation et aider à la décision pour les opérations de rénovation légères et moyennes de maisons individuelles construites sur la période 1945-1974. Les acteurs et utilisateurs de cette méthodologie sont principalement le professionnel en charge de l'opération pour les volets techniques du processus, ainsi que la maîtrise d'ouvrage, incarnée le plus souvent par le propriétaire occupant du bien à rénover, pour les étapes de définition des enjeux et des préférences. En faisant l'analogie avec un processus global de conception-réalisation d'opérations de rénovation, la méthodologie à développer doit positionner au niveau de la phase *d'études préalables*, et plus particulièrement au niveau des études d'opportunité.

Points essentiels à traiter

Au regard des ambitions formulées à la fin de la partie traitant de l'état de l'art, la méthodologie à développer doit à minima :

- Intégrer les enjeux que la maîtrise d'ouvrage associe à une opération (approche multicritère à partir d'enjeux exprimés en langage naturel), et les rendre compatibles avec les outils d'analyses multicritères qui seront par la suite manipulés (jeux de poids et de seuils, fonction multi-objectifs).
- Proposer une structuration de la connaissance experte générique, préalablement capitalisées auprès de diverses sources (ouvrages spécialisés, bases de données, retours d'expérience...), dans un modèle unique.
- Ce modèle unique doit permettre l'inférence par chaînage mixte (chaînage avant + chaînage arrière) et raisonner en milieu incertain (probabilisation des informations incertaines) à partir de données spécifiques capitalisées lors d'une phase de diagnostic d'opération de rénovation (ex : caractérisation du bâti existant, contraintes de mises en œuvre identifiées...). Le tout en vue de servir de support à l'évaluation multicritère de situations avant ou/et après rénovation (inférence par chaînage avant) et de support à la recherche d'assemblage de solutions de rénovation optimaux en milieu contraint (inférence par chaînage arrière).

Entrées requises

Certaines informations, spécifiques à chaque opération de rénovation, doivent être renseignées par l'utilisateur dans la méthodologie qui sera développée afin de pouvoir proposer des stratégies de réhabilitation compatibles, pertinentes et efficaces. A minima, le futur modèle devra comprendre :

- une phase dédiée au renseignement des objectifs spécifiques attendus par la maîtrise d'ouvrage pour une opération de rénovation traitée ;
- une phase de diagnostic, pour collecter les informations spécifiques à l'opération traitée (informations techniques disponibles sur le bâti existant, identification des entrées nécessaires à l'évaluation des performances initiales du bien) afin de pouvoir élaborer des scénarios compatibles et pertinents.

Résultats attendus

La méthodologie à développer doit permettre à un utilisateur de traiter une opération de rénovation rentrant dans le périmètre fixé pour fournir en sortie une interface capable de présenter, au regard des données saisies, un classement multicritère de scénarios de rénovation compatibles (avec les spécificités du bâti existant) et efficaces (au regard des enjeux exprimés par la maîtrise d'ouvrage) générés automatiquement et de lui laisser

l'opportunité de tester ses propres scénarios. En d'autres termes, l'outil doit offrir une interface de restitution des résultats compréhensibles : classements de scénarios, pilotage manuel d'assemblage de solutions.

II. Présentation générale de la méthodologie d'aide à la décision développée

Ce chapitre commence par présenter globalement le principe de fonctionnement de la méthodologie qui doit nécessairement répondre au cahier des charges énoncé. Après, de manière schématique, sont décrites ses quatre phases opérationnelles ainsi que ses entrées/sorties utilisateurs. Ensuite nous rentrons dans le cœur méthodologique de ce travail de recherche et exposons toujours schématiquement les 6 sous-modèles techniques contribuant au processus global d'aide à la décision. Enfin, la finalité et le fonctionnement de chaque sous-modèle technique sont définis de manière succincte.

II.1 Présentation générale du principe de fonctionnement de la méthodologie

Sur le plan opérationnel, la méthodologie développée peut être vue comme un processus en 4 phases, permettant tour à tour : (1) de définir les enjeux de rénovation spécifiques à une opération donnée, (2) de réaliser un diagnostic rapide de l'existant, (3) d'évaluer les performances multicritère de la situation initiale puis de constituer les alternatives de rénovation compatibles et efficaces, et les évaluer, (4) de proposer une interface sous la forme d'un tableau de bord permettant d'afficher un classement préférentiel des meilleures alternatives de rénovation retenues ainsi que de laisser à l'utilisateur l'opportunité de tester ses propres compositions de solutions de rénovation.

Pour chaque opération de rénovation traitée, le processus décisionnel se fera en suivant ces 4 phases, détaillées ci-après :

- (1) Définition des enjeux : Le professionnel en charge du projet de rénovation (artisan, entrepreneur...) demande à la maîtrise d'ouvrage (propriétaire de maison individuelle) de sélectionner, parmi une liste d'enjeux de réhabilitation les plus courants, ceux correspondant à ses attentes. Ensuite, les enjeux sélectionnés sont priorisés grâce à l'utilisation de la méthode de pondération AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Une fois les enjeux sélectionnés pondérés, deux profils de préférences sont calculés à l'aide d'une matrice d'analyse multicritère experte permettant de croiser enjeux de réhabilitation de indicateurs de performances. *Ces profils sont par la suite utilisés pour optimiser la recherche d'assemblages de solutions de rénovation pertinents aux yeux de la maîtrise d'ouvrage et paramétrer les outils de tri et classements multicritères utilisés pour organiser la restitution des sorties finales aux utilisateurs de la méthodologie.*
- (2) Diagnostic global : Cette phase consiste à collecter les informations nécessaires et disponibles pour réaliser une évaluation multicritère de la situation initiale (avant rénovation) et renseigner les entrées connues permettant de déclencher différentes règles expertes – codifiées dans le moteur de raisonnement probabiliste³⁹ – pouvant privilégier ou écarter certaines solutions de rénovation. *L'évaluation multicritère proprement dite est réalisée dans la phase suivante. Seules les entrées requises sont capitalisées ici.*
- (3) Élaboration automatisée et classement multicritère des alternatives de rénovation les plus performantes : Cette phase représente le cœur du processus d'évaluation multicritère et d'élaboration des alternatives de rénovation compatibles (vis-à-vis des

³⁹ Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur à la page 105.

informations saisies lors de la phase de diagnostic) et efficaces (au regard des enjeux sélectionnés et priorisés). Cette phase est assimilée à une « boîte noire », dans la mesure où les mécanismes calculatoires sont masqués à l'utilisateur.

- (4) Tableau de bord : interface de pilotage de la méthodologie, la phase appelée Tableau de bord, permet plusieurs choses. À l'issue du diagnostic et des opérations de calcul masquées à l'utilisateur, un classement préférentiel est proposé. Seules les meilleures alternatives compatibles avec les spécificités connues du bâti existant sont proposées. L'utilisateur peut sélectionner n'importe quelle alternative de rénovation de ce classement pour connaître en détail les informations relatives aux solutions de rénovation la constituant (performances multicritères, risques pathologiques, règles expertes déclenchées...). Une autre utilisation possible de cette phase est la composition personnalisée d'une alternative de rénovation à partir de solutions modélisées dans le moteur d'inférence probabiliste. Dans ce cas spécifique, l'utilisateur peut vérifier en temps réel : la compatibilité du jeu de solutions sélectionnées avec son bâti, la présence de risques pathologiques potentiels, les performances multicritères associées à cette stratégie.

II.2 Entrées/sorties des 4 phases opérationnelles de la démarche

Maintenant que le principe de fonctionnement de la méthodologie organisée autour des 4 phases opérationnelles est décrit, voici dans le Tableau 14, le détail des entrées/sorties de l'approche qui est proposée⁴⁰.

Tableau 14 – Entrées / Sorties des 4 phases opérationnelles de la méthodologie

Schéma de fonctionnement du processus décisionnel	Entrées	Sorties	Descriptions des entrées/sorties
<p>Légende</p> <p>☐ Phases de la méthode développée</p> <p>⊗ Entrées ou sorties</p> <p>↕ Interactions entre les différentes phases opérationnelles</p>	A		<i>Enjeux de rénovation (objectifs et contraintes externes) à sélectionner parmi une liste de choix finie</i>
	B		<i>Priorisation des enjeux sélectionnés 2 à 2 (matrice triangulaire supérieure nécessaire à la méthode de pondération AHP)</i>
	C		<i>Procédés techniques génériques décrivant le mieux la situation avant rénovation</i>
	D		<i>Notation par la maîtrise d'ouvrage du niveau de performance ressenti sur les indicateurs de types « confort » (thermique, acoustique, etc.) et « usage »</i>
	E		<i>Check-list technique permettant de renseigner</i> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Les Caractéristiques Techniques de l'existant (agissant comme un filtre sur les procédés de rénovation) ➢ Les Spécificités Techniques de l'existant (influençant la performance attendue sur certains indicateurs)
	F		<i>Performance multicritère à l'échelle du bâti de la situation avant rénovation (visualisable sous la forme d'histogrammes ou de diagrammes radar)</i>
	G		<i>Classement multicritère automatisé des alternatives générées</i>
	H		<i>Sélection d'une alternative de rénovation (générée automatiquement) parmi le classement affiché</i>
	I		<i>Élaboration « manuelle » d'une alternative de réhabilitation (en sélectionnant un ou plusieurs procédés de rénovation parmi des listes)</i>
	J		<i>Fiche détaillée d'une alternative sélectionnée (faisabilité technique, performances multicritères intrinsèques et globales, contraintes et recommandations de mises en œuvre pour chaque procédé de rénovation la constituant)</i>

⁴⁰ Chaque point technique sera abordé dans le sous-chapitre suivant dédié à la présentation sommaire des sous-modèles techniques contribuant à notre processus décisionnel.

II.3 Présentation sommaire des 6 sous-modèles de la méthodologie

Six sous-modèles ont été développés pour faire fonctionner le processus d'aide à la décision en milieu incertain. Certains sont génériques et n'ont pas besoins d'informations spécifiques issue d'un projet de rénovation particulier, on parlera de sous-modèles génériques. D'autres se nourrissent et génèrent des informations propres à chaque projet de rénovation (préférences de la maîtrise d'ouvrage, contraintes et caractéristiques spécifiques au bâti étudié), nous les nommerons sous-modèles spécifiques. Il est important de préciser que le processus de traitement des informations spécifiques de ce dernier type de sous-modèle est transposable à n'importe quel projet de rénovation répondant au périmètre fixé de notre étude (défini en page 20) ; la méthode reste la même, seules les informations qui l'alimentent varient d'un projet à l'autre.

Ci-après, chacun des six sous-modèles est présenté sommairement. Une vision schématique des interactions entre sous-modèle est proposée en page 106.

M1 : Décomposition fonctionnelle d'un bâtiment et structuration des alternatives de rénovation	
Type	Module générique
Description	<p>Ce sous-modèle a pour principal objectif d'organiser la description technique d'un bâtiment pour la rendre adaptée à un processus de réhabilitation énergétique. Cette description est structurée à l'aide d'une arborescence à quatre niveaux (lots, approches fonctionnelles, familles de procédés, procédés techniques). Les deux derniers niveaux sont caractérisés par une base de données de solutions techniques génériques assurant aussi bien la description d'un bâtiment <i>avant rénovation</i> qu'un bâtiment <i>renové</i>. Ainsi, un bâti est décrit comme un assemblage de procédés techniques. Par extension de cette définition, un scénario de rénovation, appelé par la suite <i>alternative de rénovation</i>, sera décrit comme un assemblage de procédés techniques doté à minima d'un procédé technique dit « de rénovation ». Par jeu combinatoire à partir des procédés retenus dans la méthode, 345 600 alternatives potentielles de rénovation sont théoriquement possibles. Les autres sous-modèles sont présents, en partie pour dégrossir et orienter les assemblages de procédés de rénovation en fonction des préférences exprimées (M4) et des caractéristiques d'une opération spécifique traitée (M5).</p> <p><i>Travail préliminaire sur des connaissances expertes génériques, réalisé une fois pour toute</i></p>
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Une modélisation en 4 niveaux de description • Un espace de solutions théoriques constitué de 345 600 alternatives potentielles de rénovation • 11 approches fonctionnelles et 38 familles de procédés (subdivisées en 153 procédés techniques)

M2 : Capitalisation et formalisation des connaissances métiers	
Type	Module générique
Description	<p>La possibilité de mise en œuvre de certains procédés techniques de rénovation est conditionnée par les caractéristiques et spécificités techniques de chaque bâti existant. Plusieurs types de règles ont été mis en évidence par un panel de spécialistes de la rénovation (opportunités de couplage avec des actions de maintenance programmées, contraintes techniques et réglementaires, risques d'apparition de pathologies, etc.). Elles ont été construites sous forme de relations causales (logiques ou probabilistes), compatibles avec des outils d'intelligence artificielle (système expert, moteur d'inférence probabiliste). Cette base de règles, réutilisable pour n'importe quel projet de rénovation, permet de réduire le champ du possible lors de la recherche d'alternatives de réhabilitation spécifiques à chaque situation.</p> <p><i>Travail préliminaire sur des connaissances expertes génériques, réalisé une fois pour toute</i></p>
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation des connaissances sous la forme de relations causales lorsque cela est possible • 5 notions conceptuelles décrites • 6 catégories de règles expertes relationnelles • 17 règles filtrantes sur les familles de procédés décrites

M3 : Système d'évaluation des performances	
Type	Module générique
Description	<p>La performance globale d'un bâtiment peut être vue comme la fusion de deux aspects : l'aspect systémique (ensemble de procédés techniques interconnectés) et l'aspect multicritère (intégration des différentes dimensions de la performance : énergie, environnement, confort...). En ce sens, un jeu d'indicateurs de performance construits à partir de connaissances expertes a été sélectionné. Chaque procédé technique et chaque spécificité technique ayant une influence sur au moins un indicateur manipulé ont été évalués de manière intrinsèque (évaluation relative par procédé appartenant à la même approche fonctionnelle). Ensuite, un système d'agrégation des performances multicritères intrinsèques a été construit à l'aide de fonctions d'utilité ; permettant ainsi d'attribuer un niveau de performance à l'échelle du bâtiment pour chaque indicateur défini et pour chaque combinaison de procédés techniques (situation avant et après rénovation).</p> <p><i>Travail préliminaire sur des connaissances expertes génériques, réalisé une fois pour toute</i></p>
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • 38 familles de procédés + 5 spécificités techniques évaluées sur au moins un indicateur de performance • 25 indicateurs de performance rassemblés en 8 cibles • 4 indicateurs de risques potentiels • Évaluation multicritère à l'aide d'attribution, par jury d'experts, de notes et de fonctions d'agrégation de type « somme pondérée + seuils d'affectation »

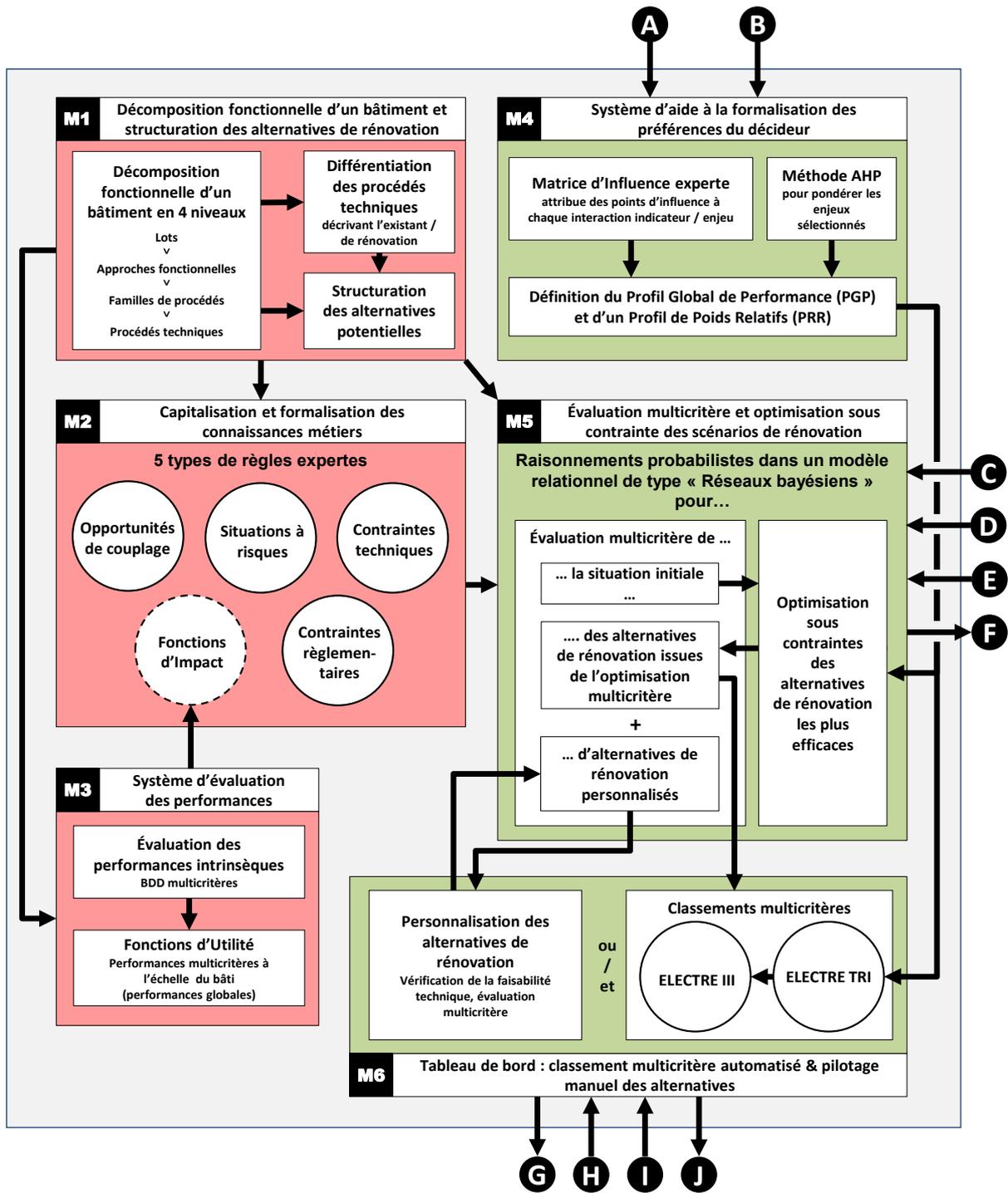
M4 : Système d'aide à la formalisation des préférences du décideur	
Type	Module spécifique
Description	Les enjeux associés à un projet de rénovation sont différents d'une opération à l'autre. Ils dépendent des attentes et préférences de la maîtrise d'ouvrage. Le plus souvent, ces dernières s'expriment avec un vocabulaire différent de celui des professionnels (enjeux multiples et très pragmatiques versus analyse technico-économique). Nous avons construit un sous-modèle d'aide à la formalisation des préférences basé sur l'utilisation d'une matrice d'influence experte, la méthode de pondération AHP (Analytical Hierarchy Process) et un système de manipulation de scores. Il permet, pour chaque projet spécifique de rénovation, de construire un Profil Global de Performance (PGP) donnant les niveaux de performance attendus sur chaque indicateur de performance manipulé et un Profil de Poids Relatifs (PPR) sur ces mêmes indicateurs, à partir de la sélection et de la priorisation d'enjeux de rénovation pré-listés. Ces profils multicritères permettent dans la suite de la méthodologie de rechercher les combinaisons de procédés techniques de rénovation énergétique permettant de répondre au mieux aux préférences de la maîtrise d'ouvrage et de faire fonctionner des méthodes de classement multicritère.
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Matrice experte générique croisant les influences de 33 enjeux de réhabilitation avec 25 indicateurs de performance • Utilisation de la méthode de pondération AHP pour attribuer, pour chaque opération de rénovation traitée, une importance relative à chaque enjeu sélectionné • Établissement d'un Profil de Poids Relatifs (PPR) spécifique à chaque opération • Établissement d'un Profil Global de Performance (PGP) spécifique à chaque opération

M5 : Évaluation multicritère et optimisation sous contraintes des scénarios de rénovation	
Type	Module spécifique
Description	Les réseaux bayésiens sont une technologie d'inférence de la connaissance (i.e. intelligence artificielle). Nous les utilisons ici pour rassembler dans un même modèle probabiliste les procédés techniques, les indicateurs de performance, les caractéristiques et les spécificités techniques des bâtiments existants. Ces notions sont reliées par des relations causales probabilisées (les fonctions d'utilités et règles métiers énoncées dans les sous-modèles précédents). Ce modèle unique, transposable à n'importe quel projet de rénovation, permet lorsqu'il est alimenté par des informations spécifiques à un projet (procédés et caractéristiques techniques décrivant l'existant, ressenti du confort des occupants) de remplir plusieurs tâches : évaluation multicritère d'un projet avant rénovation, recherche des alternatives de réhabilitation compatibles et pertinentes au regard des spécificités de l'existant (contraintes, PGP), évaluation multicritère des alternatives de réhabilitation retenues. Un autre avantage de cette technologie est la possibilité de raisonner en milieu incertain : plus une situation sera connue avec précision, plus les informations déduites par le modèle bayésien seront précises et inversement. Les incertitudes sont représentées sous forme de distributions de probabilités.
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau d'inférence probabiliste (réseau bayésien) permettant de raisonner en milieu incertain • Évaluation multicritère en présence d'inconnues partielles possibles • Optimisation multicritère par application successive de contraintes (contraintes techniques, puis contraintes performantielles) • Établissement automatisé d'un jeu d'alternatives de rénovation efficaces

M6 : Tableau de bord, classement multicritère automatisé & pilotage manuel des alternative	
Type	Module spécifique
Description	Un sous-modèle de catégorisation puis de classement multicritère a été développé. Il utilise successivement les méthodes de surclassement multicritères ELECTRE TRI et ELECTRE III pour distiller les alternatives de réhabilitation retenues et évaluées par le réseau bayésien pour chaque projet spécifique de rénovation. Des analyses sur la robustesse des catégorisations et classements obtenus ont été réalisées grâce à des études paramétriques sur les éléments sensibles des méthodes ELECTRE. En parallèle, une interface de pilotage manuel d'élaboration et d'évaluation d'alternatives de rénovation personnalisées a été conçue pour laisser les professionnels tester leurs propres scénarios à partir de la base de procédés retenue dans le sous-modèle M1.
Notions-clés	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de la méthode ELECTRE TRI pour réduire le nombre d'alternatives de rénovation à classer par la suite • Utilisation de la méthode ELECTRE III pour classer les meilleures alternatives de rénovation retenues par ordre de préférence • Fonctionnalité permettant de tester ses propres compositions de solutions de rénovation

Il est important de préciser que l'ensemble des sous-modèles développés est avant tout méthodologique ; par conséquent ces derniers sont parfois interchangeables avec d'autres approches et peuvent être réutilisés pour des applications autres que celles touchant à la réhabilitation énergétique de logements.

Le schéma suivant, présenté en Figure 24, expose les 6 sous-modèles techniques qui, une fois interconnectés aux entrées-sorties définies précédemment, permettent de dérouler le processus d'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique. Les sous-modèles génériques sont représentés sur fond rouge, les sous-modèles spécifiques sur fond vert. Chaque sous-modèle est décrit de manière détaillée dans le chapitre §III.



Les entrées-sorties, numérotées de A à J, sont définies dans le Tableau 14 à la page précédente.

Figure 24 – Architecture fonctionnelle des 6 sous-modèles techniques et des entrées/sorties de la méthodologie développée

III. Description détaillée des sous-modèles

Chacun des six sous-modèles techniques introduits dans le chapitre II.3 est détaillé ci-après.

III.1 M1 : Décomposition fonctionnelle d'un bâtiment et structuration des alternatives de rénovation

Nous avons vu jusqu'à maintenant que les solutions techniques (leur fonctionnalités, leurs performances, les prérequis à leur mises en œuvre) jouent un rôle central dans un projet de rénovation. La rénovation énergétique peut être alors vue comme un assemblage de solutions techniques remplissant chaque fonction élémentaire d'un bâtiment (isolation, chauffage, ventilation, etc.). Nous partons de ce constat pour proposer un découpage fonctionnel du bâtiment.

III.1.1 Décomposition fonctionnelle d'un bâtiment d'habitation

La décomposition du bâtiment se fait en 4 niveaux de description, allant dans le sens croissant du niveau de détail⁴¹. Les deux premiers niveaux illustrent le découpage conceptuel du bâtiment en *lots* (Niveau 1) et *approches fonctionnelles* (Niveau 2). Les deux suivants se focalisent sur un découpage technique des solutions constructives et systèmes énergétiques : nous parlons de *familles de procédés* (Niveau 3) dans lesquelles nous retrouvons les *procédés techniques génériques* (Niveau 4) composés d'un ou plusieurs *attributs techniques*. Tous ces différents niveaux granulométriques de caractérisation d'un bâtiment sont illustrés synthétiquement dans la Figure 25, puis définis dans la section suivante.

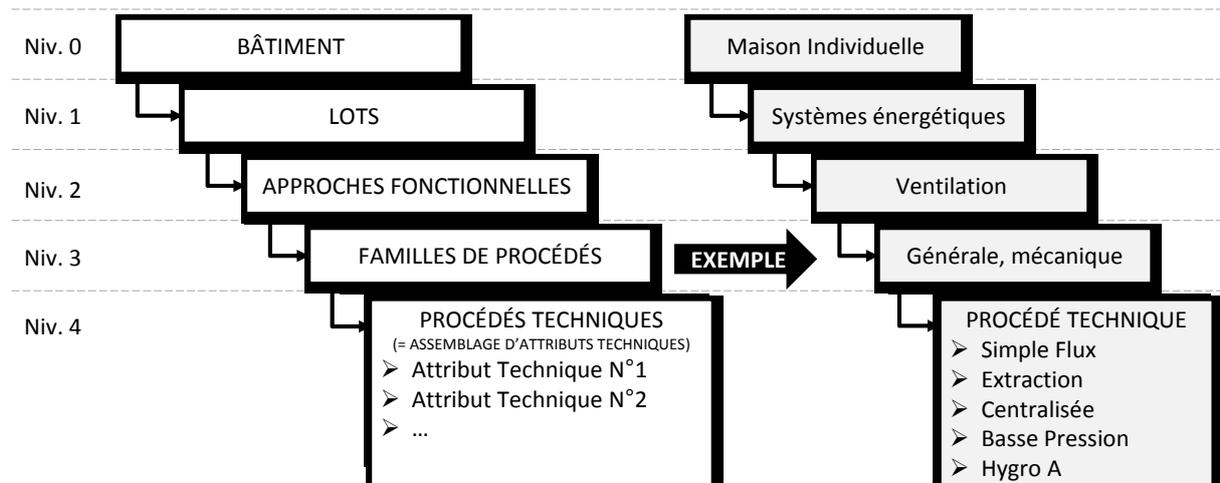


Figure 25 – Décomposition fonctionnelle des procédés de réhabilitation

Nous allons maintenant définir chaque niveau de décomposition dans la Figure 25 de manière plus détaillée.

⁴¹ Le vocabulaire choisi pour nommer ces 4 niveaux est arbitraire et spécifique à l'étude menée. Ne pas chercher un quelconque sens différent de celui exprimé ici.

Niveau 0 : Bâtiment

Les bâtiments représentent le plus haut niveau de notre approche. Dans ce travail de recherche, la rénovation énergétique cible les bâtiments résidentiels et plus particulièrement la maison individuelle.

Niveau 1 : Lots

Les approches fonctionnelles, décrites ci-dessous, sont classées en deux lots distincts qui n'interviennent dans l'étude, que comme éléments de classification (aucune propriété fonctionnelle ou technique ne leur est attribuée). Ces lots sont :

- l'enveloppe chauffée ;
- les systèmes énergétiques.

Niveau 2 : Approche fonctionnelle

Les approches fonctionnelles constituent le point d'entrée de la description des procédés techniques. Elles rassemblent les familles de procédés répondant à un même besoin conceptuel, indépendamment de la technologie utilisée. Nous avons répertorié 11 approches fonctionnelles permettant de « ranger » l'ensemble des familles de procédés techniques servant à décrire aussi bien l'existant que les futures alternatives de réhabilitation :

- isolation des parois opaques verticales ;
- isolation des planchers bas ;
- isolation des toitures ;
- baies vitrées ;
- protections solaires ;
- portes extérieures ;
- étanchéité à l'air (actions spécifiques) ;
- chauffage ;
- eau chaude sanitaire ;
- ventilation ;
- panneaux photovoltaïques.

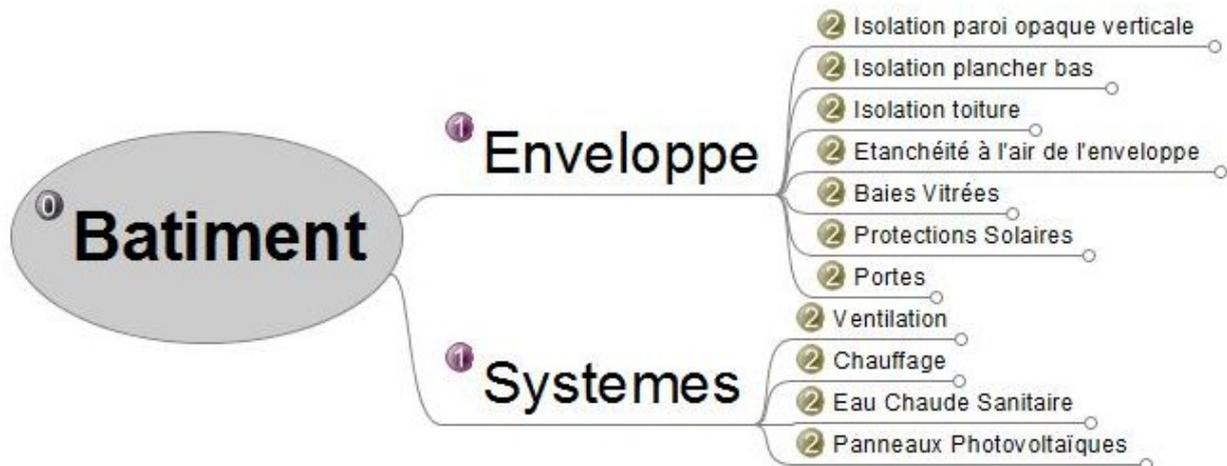
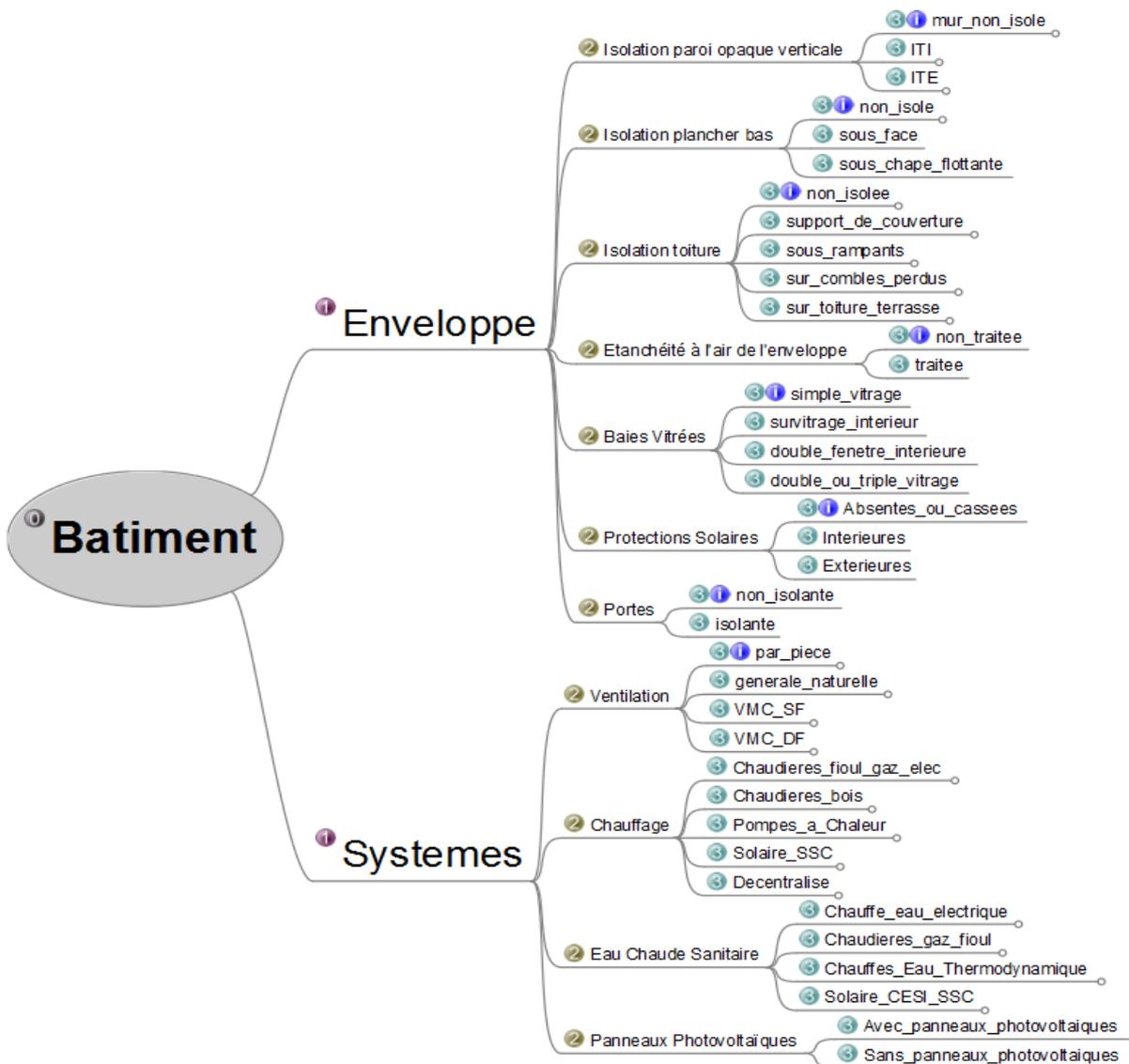


Figure 26 – Approches Fonctionnelles

Niveau 3 : Famille de procédés

Chaque famille de procédés réunit en son sein, les procédés techniques répondant à la même approche fonctionnelle et partageant un certain nombre de propriétés communes (approche technologique, contraintes de mises en œuvre...). Nous avons répertorié 38 familles de procédés réparties sur les 11 approches fonctionnelles décrites précédemment.

La mise en œuvre de certaines familles de procédés requiert des prérequis (consulter le sous-modèle M2 traitant des règles expertes pour en apprendre plus). Chaque famille de procédés est évaluée sur au moins un indicateur de performance décrit dans le sous-modèle M3. Certaines familles de procédés ne peuvent être utilisées que pour caractériser les situations avant rénovation car elles ne « contiennent » que des procédés techniques anciens, ne respectant plus les normes d'hygiène ou de performances minimales autorisées par les réglementations du bâtiment en vigueur en France en 2014.



Légende des signes



Niveaux de décomposition

Familles de procédés utilisables uniquement pour décrire l'existant

Tableau 15 – Familles de procédés génériques

Niveau ④ : Procédé technique générique

Le procédé technique générique représente la brique élémentaire de l'évaluation de la performance des alternatives. Chaque procédé technique appartient à une unique famille de procédés et répond à une approche fonctionnelle précise. Il peut posséder des contraintes de mise en œuvre – hérités de la famille de procédés ou spécifiques à ce dernier – mais doit impacter au moins un indicateur de performance défini à l'échelle du projet de rénovation (§III.3). Deux catégories de procédés techniques génériques sont définies :

1. les procédés utilisés uniquement pour caractériser un bâti existant (ayant des performances en deçà des exigences réglementaires actuelles, ou considérés comme trop peu performant pour être intégré à des alternatives de réhabilitation) ;
2. les procédés dits « de rénovation » permettant à la fois de caractériser le bâti existant et le bâti rénové.

Ces procédés techniques sont obligatoirement rattachés à une unique famille de procédés. Leurs propriétés (contraintes et performances intrinsèques) sont définies pour la configuration d'attributs techniques spécifiques qui les caractérisent.

Par exemple, pour les procédés techniques intégrant la famille de procédés « VMC SF⁴² » de l'approche fonctionnelle « Ventilation », 10 procédés techniques génériques sont définis : un procédé pour chaque cheminement possible d'attributs techniques présenté dans la Figure 27. Dans cette même figure, le cheminement d'attributs techniques caractérisant le procédé de ventilation simple flux « **Extraction + Centralisée + Basse Pression + Hygro A** » est surligné en rouge.

Ce niveau de décomposition du bâti, dans le cadre de ces travaux de thèse, n'a été réalisé que pour un nombre limité de familles de procédés tant les ressources expertes⁴³ nécessaires à la description de ce niveau de détail sont rares et l'exercice chronophage. En tant que démonstratifs, les familles de procédés des approches fonctionnelles « Isolation paroi opaque verticale », « isolation toiture », « ventilation », « chauffage » et « E.C.S. » ont été décrites sur ce quatrième niveau de description (arborescences finalisées disponibles dans l'ANNEXE B). Le complément ou le développement de l'ensemble des procédés techniques des familles restantes peut être poursuivi en ayant recours à différents spécialistes. Pour la méthode d'aide à la décision développée, la prescription de solutions de rénovation s'arrête au niveau 3 de la décomposition fonctionnelle du bâtiment.

⁴² VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée, SF : Simple Flux

⁴³ Mobilisation de spécialistes de chaque approche fonctionnelle pour décrire et évaluer chaque procédé technique.

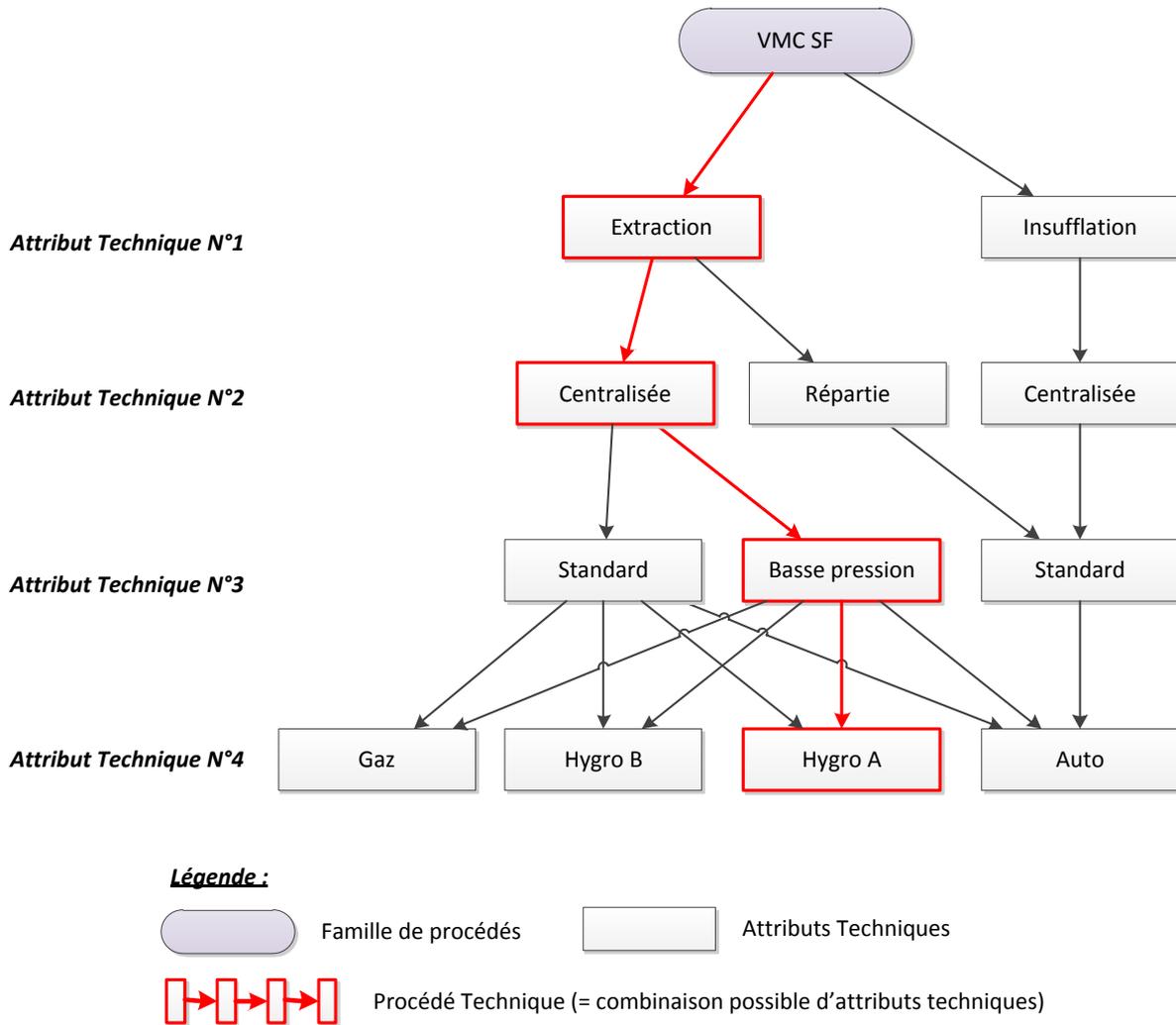
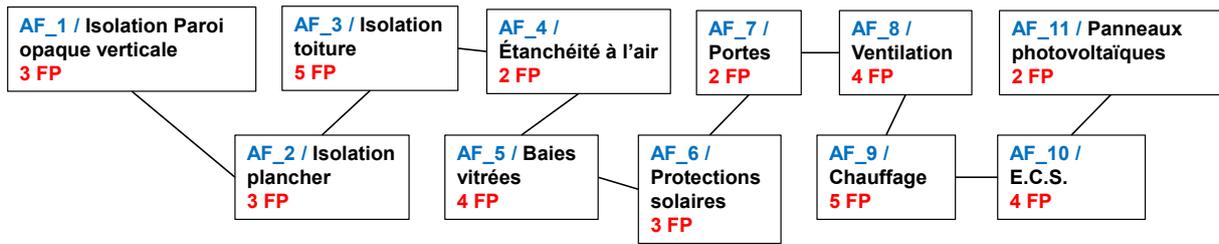


Figure 27 – Définition d'un Procédé Technique comme une combinaison d'attributs techniques

III.1.2 Bouquets de travaux d'amélioration considérés

En raisonnant au niveau de description des familles de procédés – regroupées en approches fonctionnelles – et en partant du principe qu'un bâtiment peut être vu, d'un point de vue « scénarios de rénovation », comme un assemblage de 11 familles de procédés (une par approche fonctionnelle), nous arrivons par jeu combinatoire à 345 600 configurations possibles. À ce nombre, nous retranchons 1 qui correspond à la situation initiale caractérisant le mieux l'existant (Figure 28 et Éq. 1) pour obtenir un nombre théorique d'alternatives⁴⁴ de rénovation de 345 599.

⁴⁴ Alternative : bouquets d'une ou plusieurs actions d'amélioration énergétique



Numéro de l'Approche Fonctionnelle (AF)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nombre de Familles de Procédés par Approche Fonctionnelle (FP)	3	3	5	2	4	3	2	4	5	4	2

Figure 28 – Nombre de Familles de Procédés par Approches Fonctionnelles

$$\text{Nombre de combinaisons} = (3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 2) - 1 = 345\,599 \quad \text{Éq. 1}$$

Cet espace de solutions (i.e. d'alternatives potentielles de rénovation), correspond à un maxima mathématique qui, concrètement, n'est pas envisageable. En effet, certaines combinaisons de familles de procédés sont à proscrire car elles génèrent des risques de pérennité du bâti (ex : associer des baies de type *double vitrage* avec une ventilation naturelle par pièce peut créer des pathologies liées à l'humidité) ou ne sont techniquement pas réalisables pour une opération donnée (ex : pose de systèmes solaires s'il y a des masques en toiture). De la même manière, dans une logique d'aide à la décision multicritère, les préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage de chaque opération traitée permettront également de réduire le champ du possible en tendant vers un sous-espace de solutions plus réduit.

III.1.3 Autres concepts nécessaires à la description d'un bâtiment

Les deux sections précédentes ont permis de poser les bases de notre décomposition fonctionnelle du bâtiment ainsi que de présenter comment sont constituées les alternatives de rénovation utilisées dans la méthodologie d'aide à la décision. Deux autres notions, nécessaires à la description complète d'un bâtiment, restent encore à définir : les spécificités techniques et les contraintes techniques.

- Les **Spécificités Techniques (ST)** sont des configurations techniques ou architecturales d'un bâtiment qui jouent un rôle dans le système d'évaluation des performances du sous-modèle M3. (ex : logements traversant pour le confort thermique estival, murs mitoyens pour la performance énergétique, etc.). Une description plus poussée de ce concept est accessible à la page 116.
- Les **Caractéristiques Techniques (CT)** sont des propriétés techniques ou architecturales d'un bâtiment qui influent sur la possibilité et la pertinence de mise en œuvre de certaines Familles de procédés ou procédés techniques. Elles interviennent dans le déclenchement de règles expertes décrites dans le sous-modèle M2. Nous renverrons le lecteur à la page 115 pour en apprendre d'avantage sur leur utilisation dans la méthodologie.

La décomposition fonctionnelle des logements en combinaisons de familles de procédés ou procédés techniques génériques permet une caractérisation très rapide et intuitive de l'existant ou de scénarios de rénovation. La contrepartie est l'absence de description technique poussée des solutions proposées. Cette absence n'est pas un frein à la méthodologie proposée dans la mesure où l'objectif fixé n'est ni le dimensionnement de systèmes ni la certification d'opérations de rénovation. Par soucis de simplification de la démarche, nous avons également supposé que l'acte de rénovation n'est pas étalé dans le temps (ce qui est souvent le cas dans le monde du logement). Par cette hypothèse forte, aucune planification pluriannuelle des travaux contenus dans les alternatives n'est prise en compte dans le processus de mise en œuvre ou lors de leur évaluation multicritère.

III.2 M2 : Capitalisation et formalisation des connaissances métiers

L'expertise et le retour d'expérience sont des aspects de la connaissance qu'il convient d'inclure dans un processus décisionnel. En effet dans une logique de réhabilitation, la maîtrise d'œuvre a rarement le droit à l'erreur et doit déterminer rapidement, si l'assemblage de procédés techniques de rénovation qu'il souhaite mettre en place dans le bâti génère des risques (sur la pérennité du bâti ou/et la santé des occupants) ou impacte fortement un aspect important de la performance pour la maîtrise d'ouvrage. *Le plus souvent, ce sont les situations à risques et les contre-performances qui sont capitalisées dans les retours d'expérience.* Ce savoir découle souvent de l'expérience et est difficilement formalisable dans des outils informatiques traditionnels, notamment les outils de calcul et de simulation.

Comme l'a montré l'état de l'art, une première mouvance formalisa ce savoir expert sous forme de systèmes experts, une branche de l'intelligence artificielle [101, 132]. Malheureusement ces derniers reposent la plupart du temps sur des relations causales certaines (bases de règles), ne laissant pas de place à la modélisation de la connaissance en milieu incertain. De part cette limite, émergea dans les années 1980, les systèmes de modélisation relationnelle probabilistes et possibilistes, permettant de modéliser l'incertain à l'aide de la théorie des probabilités (réseaux bayésiens, diagrammes d'influence) ou à l'aide de la théorie des possibilités (ensembles flous).

Dans une optique de modéliser l'expertise pluridisciplinaire des acteurs de la réhabilitation énergétique, le formalisme de base de règles pour la collecte brute de l'expertise et l'intuitivité de la représentation causale probabilisée des réseaux bayésiens sont des maillons intéressants pouvant intégrer le processus d'aide à la décision et d'assistance à la maîtrise d'œuvre.

III.2.1 Typologie de règles expertes

Un premier travail de fond a porté sur la recherche de relations causales, appelées ci-après **règles expertes**, permettant de représenter l'influence de certaines actions de rénovation énergétique à partir d'observations sur le bâti existant et issues de projets antérieurs similaires (recueils de retours d'expérience, interviews d'experts, littérature scientifique). Les résultats de ces recherches ont mis en évidence le besoin de classer ces dernières en 6 catégories d'expertise couvrant des applications différentes :

- (1) Les contraintes techniques : configurations particulières de l'existant ou entre procédés de réhabilitation nécessitant des prérequis à la mise en œuvre pour assurer une cohérence technique. Les incompatibilités techniques y sont référencées. *Par exemple, la non pertinence de la mise en œuvre d'une Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) des murs si le bâtiment présente des modénatures complexes ou de nombreux balcons. Cela est techniquement faisable, mais nécessite des compétences métiers élevées pour*

traiter chaque point singulier et risque d'être très chronophage et coûteux pour la maîtrise d'ouvrage qui devrait plutôt réfléchir alors à d'autres techniques d'isolation des murs.

- (2) Les contraintes urbanistiques ou réglementaires : configurations particulières de l'existant ou entre procédés de réhabilitation nécessitant des prérequis à la mise en œuvre pour coller aux réglementations. Les incompatibilités réglementaires et urbanistiques y sont référencées. *Par exemple, les difficultés d'interventions sur l'enveloppe extérieure d'un bâtiment si ce dernier est classé (bâtiment historique) ou situé dans une zone de patrimoine classé. Le Plan Local d'Urbanisme permet alors de savoir quelles sont les actions d'amélioration énergétiques tolérées sans dénaturer l'esthétique extérieure.*
- (3) Les opportunités de couplage avec des actions de maintenance non énergétique programmées : synergies d'actions de réhabilitation (énergétiques et de maintenance programmée) générant des économies d'échelle ou permettant de lever certains verrous techniques. *Par exemple, réaliser une ITE alors qu'un ravalement de façade était programmé ; ou bien coupler une Isolation Thermique par l'Intérieur lorsque qu'une réfection du réseau électrique intérieur est nécessaire (nécessité d'opérer sur les revêtements intérieurs pour tirer des câbles électriques et changer des prises murales).*
- (4) Les fonctions d'impacts : appelées également fonctions de coûts ou d'utilité, elles permettent de formaliser sous forme de coûts performantiels – chiffrés ou non – les impacts positifs et négatifs (directs et collatéraux) potentiellement attribuables à des actions d'amélioration de la performance énergétique ou/et à des spécificités techniques de bâtiments existants. *Par exemple, l'amélioration significative de l'isolement acoustique d'un bâtiment vis-à-vis des bruits extérieurs lors de la mise en œuvre d'une ITE, d'un remplacement de menuiseries par des doubles vitrages asymétriques et du traitement des défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. L'utilité première de ces actions étant la performance énergétique.*
- (5) La mise en évidence de combinaisons à risques : ce type de règles représente les configurations de risques potentiels pouvant générer des pathologies de l'enveloppe (problème d'humidité notamment), de risques sanitaires pour ses occupants (mauvaise combustion, mauvais renouvellement d'air) ou de perte du potentiel d'économie d'énergie sur le long terme. *Par exemple la nécessité absolue de coupler des travaux d'amélioration de l'étanchéité à l'air un bâti avec un système de ventilation permanente (VMC...).*
- (6) Les recommandations de mises en œuvre : enfin les règles difficilement formalisables dans un outil informatique et propre à chaque actions d'amélioration énergétique, les recommandations de mises en œuvre. Elles sont censées être connues des professionnels réalisant ce type de travaux. *Par exemple, disposer de surfaces propres et sèches avant de coller ou fixer des procédés d'isolation thermique sur des parois de l'enveloppe chauffée.*

Chacune de ces règles – à l'exception des recommandations de mises en œuvre – peuvent être intégrées dans des outils informatisés d'aide à la décision. Les trois premiers types permettent d'identifier rapidement si une solution d'amélioration est compatible avec les spécificités de l'existant ou si un type de travaux est à privilégier. Les types suivants de règles (impacts et risques) permettent d'évaluer de manière rapide les performances multicritères découlant de choix techniques. Ces informations sont essentielles lorsque la décision de rénover n'est pas restreinte à la seule dimension énergétique. Nous allons maintenant voir plus en détails quels sont les notions auxquelles sont rattachés ces types de règles pour proposer ensuite un système de modélisation de l'information experte dans un outil d'inférence probabiliste : les réseaux bayésiens.

III.2.2 Notions auxquelles sont rattachées les règles expertes

Chaque typologie de règles énumérées dans la section précédentes s'exprime de manière relationnelle. Il faut donc rattacher ces règles avec les notions auxquelles elles sont reliées (prérequis et objets impactés) : solutions techniques, indicateurs de performance, caractéristiques de l'existant. La Figure 29 présente une vision synthétique de ces relations.

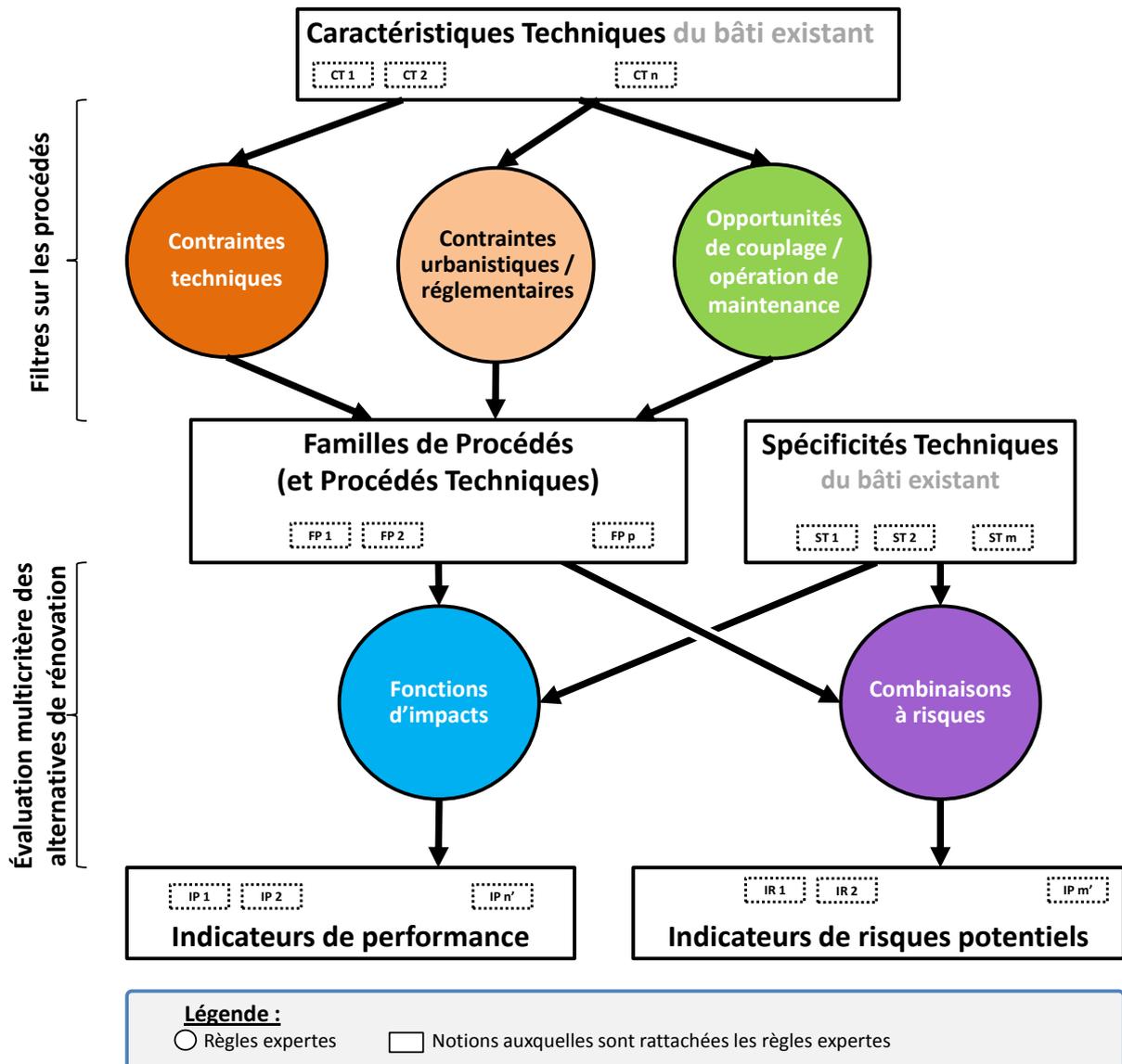


Figure 29 – Raccordement des règles expertes avec les caractéristiques et spécificités techniques, les familles de procédés et procédés techniques, les indicateurs de performances et de risques potentiels

Voici une brève définition des notions auxquelles viennent se greffer les différents types de règles présentés en III.2.1 et que nous retrouvons dans la Figure 29 sous forme d'encadrés.

- (1) Les Caractéristiques Techniques (CT) : caractéristiques particulières de l'existant pouvant influencer sur le choix de mise en œuvre des solutions de rénovation (famille de procédés et procédés techniques). Elles permettent de qualifier un bâtiment existant et de potentiellement déclencher des règles expertes de types « contraintes » et « opportunités ». Elles illustrent implicitement les prérequis nécessaires à la mise en

œuvre de certaines actions ou la nécessité d'en effectuer d'autres. *Par exemple, la présence de modénatures complexes, pouvant déclencher une règle experte de type « contrainte technique ». La solution d'amélioration impactée est alors la famille de procédé ITE.*

- (2) Les Spécificités Techniques (ST) : Elles participent aux règles expertes de type « fonctions d'impacts » en contribuant à l'évaluation de la performance d'un indicateur à l'échelle du bâtiment. Pour chaque spécificité technique renseignée, une note évaluant sa performance intrinsèque est attribuée sur au moins un indicateur de performance (page 139). *Par exemple, la présence d'un logement traversant a une influence positive sur l'indicateur de performance « confort thermique estival » car un logement traversant facilite le cheminement d'air frais lorsque deux ouvrants à orientations cardinales différentes sont ouverts.* De la même manière, certains couplages de familles de procédés avec des ST peuvent impacter des indicateurs de risques.
- (3) Les Familles de Procédés (FP) (et Procédés Techniques (PT)) : ce sont les notions définies dans le sous-modèle M1 auxquelles sont rattachées des règles expertes de tous types. *Par exemple, ITI et ITE sont les Familles de Procédé de l'approche fonctionnelle « isolation paroi opaque verticale ».*
- (4) Indicateurs de Performance (IP) : sorties des règles expertes de type « fonctions d'impacts », ce sont eux qui servent d'échelle de valeurs à l'évaluation des performances multicritères des alternatives potentielles de rénovation (à l'échelle bâtiment) mais aussi à la caractérisation des performances multicritères intrinsèques des familles de procédés et procédés techniques (à l'échelle des solutions génériques d'amélioration énergétique). *Par exemple, facilité d'usage et d'entretien, confort acoustique vis-à-vis des nuisances sonores extérieures, taux de renouvellement d'air intérieur...*
- (5) Indicateurs de Risques potentiels (IR) : sorties des règles expertes de type « combinaisons à risques », ce sont eux qui servent d'échelle de valeurs à l'évaluation des risques potentiels associés à chaque alternative potentielle de rénovation (à l'échelle bâtiment). *Par exemple, perte du potentiel d'amélioration énergétique, pathologies liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide...*

Nous allons maintenant nous intéresser de plus près à la transposition des règles expertes dans des formats compatibles avec des outils de modélisation (i.e. d'inférence) de connaissances : approche relationnelle, filtres booléens et évaluation combinatoire. Le chapitre suivant traite de la transposition en règles logiques des règles de type : « contraintes techniques, contraintes réglementaire ou urbanistiques, opportunités de couplage avec des actions de maintenance non énergétique programmées et combinaisons à risques ». Le pan « fonctions d'impacts » sera abordé dans le sous-modèle M3 au sous-chapitre « Méthode de modélisation et d'évaluation des performances ».

III.2.3 Modélisation des règles expertes sous forme de fonctions logiques

Les règles expertes de types « contraintes », « opportunité » et « risques induits et pathologiques » sont modélisées sous forme de relations logiques simples ou imbriquées. Nous allons décrire ci-après la manière dont nous les avons formalisées.

III.2.3.1 Règles de types contraintes et opportunités de couplage

Ces types de règles sont modélisés sous la forme de relations causales booléennes. Il convient en priorité d'identifier quelle caractéristique technique s'applique à quels procédés techniques (ou familles de procédés techniques). Une fois ces notions identifiées, il faut

créer une fonction causale permettant d'écartier ou de préconiser l'utilisation d'un procédé (ou plusieurs d'entre eux) selon les cas si la caractéristique technique est vérifiée. Dans un souci de pédagogie, un exemple d'application va être présenté pour chacun des deux types de règles modélisées de cette façon.

- **Contraintes techniques et réglementaires ou urbanistiques**

Des études bibliographiques menées et interviews passés avec des professionnels du bâtiment, la règle experte suivante a été mise en évidence :

« La réalisation d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE) n'est pas recommandée pour les façades présentant des modénatures complexes (i.e. ornements ouvragés de façade). Dans ce cas spécifique, un recours à l'isolation thermique par d'intérieur (ITI) des murs est favorable pour limiter les coûts et le temps de mise en œuvre »

Dans un souci de simplification de la règle, nous considérons que la Famille de procédés *ITE* de « l'Approche Fonctionnelle » est à proscrire lorsque les façades sont dotées de modénatures complexes. Sous la forme d'une fonction causale et booléenne nous obtenons :

Si CT(Modénatures complexes) = VRAI alors FP(ITE) = Écartée

Dans l'Approche Fonctionnelle « isolation paroi opaque verticale », trois Familles de Procédés sont théoriquement possibles en l'absence de connaissance sur les caractéristiques techniques d'un bâtiment : parois *non isolée*, *ITI* ou *ITE* (§III.1.1). En rajoutant la règle de type CT énoncée ci-dessus, cela donne le Tableau 16 :

Tableau 16 – Exemple de modélisation d'une règle de type "Contrainte"

Approche Fonctionnelle impactée (→)	AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_4 : Présence de modénatures extérieures (↓)	États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	Autorisé	Autorisée	Écartée
Non	Autorisé	Autorisée	Autorisée

D'autres règles du même type, visant à orienter le choix des familles de procédés génériques modélisées dans cette approche, sont proposées en Annexe G.

- **Opportunités de couplage avec des actions de maintenance non énergétique programmées**

Des études bibliographiques menées et interviews passés avec des professionnels du bâtiment, la règle experte suivante a été mise en évidence :

« L'isolation thermique des murs d'un bâtiment dont le ravalement de façade est programmé incite à privilégier le recours à isolation thermique par l'extérieur afin de faire une économie d'échelle en réalisant les deux actions d'un coup »

Dans un souci de simplification de la règle, nous considérons que si un bâtiment doit subir un ravalement de façade, alors la famille de procédés sur l'approche fonctionnelle « Isolation paroi opaque verticale » à privilégier sera « Isolation Thermique par l'Extérieur ». Cela donne le Tableau 17.

Tableau 17 – Exemple de modélisation d'une règle de type "Opportunité"

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_12 : Ravalement de façade programmé (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles		Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui		Autorisé	Autorisée	Préconisée
Non		Autorisé	Autorisée	Autorisée

Remarque

Nous voyons à travers les deux précédents exemples (Tableau 16 et Tableau 17) que les règles expertes mises en lumière affectent la même approche fonctionnelle et les mêmes familles de procédés qui la composent. Il nous faudra coupler ces règles afin de pouvoir obtenir par jeu combinatoire, l'ensemble des configurations de caractéristiques techniques possibles. Exemple en Tableau 18 :

Tableau 18 – Combinaison des deux exemples de règles précédentes s'appliquant aux familles de procédés de l'Approche Fonctionnelle "isolation paroi opaque verticale"

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales			
CT_4 : Présence de modénatures extérieures (↓)		CT_12 : Ravalement de façade programmé (↓)		États / Familles de procédés (↓)	
Config.	États possibles		Paroi non isolée	ITI	ITE
1	Oui	Oui	Autorisé	Autorisée	Écarté
2	Oui	Non	Autorisé	Autorisée	Écarté
3	Non	Oui	Autorisé	Autorisée	Préconisée
4	Non	Non	Autorisé	Autorisée	Autorisée

III.2.3.2 Règles de type combinaisons à risque

Ce type de règles permet de mettre en lumière les configurations de spécificités techniques de bâtiment et procédés techniques (ou familles de procédés) ou assemblages de procédés techniques (ou familles de procédés), qui favorisent les situations à risques. Sont appelées « combinaisons à risques », les configurations de bâti rénové qui affectent la pérennité du bâti ou ont un impact négatif fort sur la santé des occupants.

Construit sur la forme de combinaisons de « causes » jugées par un panel d'experts comme « risquées », ce type de règles impacte les indicateurs de la cible « risque induits et pathologiques » (page 136). En fonction de la gravité du risque potentiel, une valeur à ces indicateurs est attribuée. Dans le cas de figure où une alternative de rénovation n'est pas listée comme « combinaison à risque », tous les indicateurs de la cible « risques induits et pathologiques » ont pour valeur « faible » signifiant qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter. Le Tableau 19a illustre 3 « combinaisons à risque » pour l'indicateur « Perte du potentiel d'amélioration énergétique » et le Tableau 19b propose 6 « combinaisons à risque » pour l'indicateur « Risques sanitaires liés à la génération de chaleur par combustion ».

À titre pédagogique, nous allons expliquer le *cheminement expert* ayant permis de construire la combinaison n°5 du Tableau 19b :

« Nous souhaitons rénover un bâtiment possédant une étanchéité à l'air faible (souvent le cas lorsque les dormants de menuiseries extérieures sont anciens et que la mise en œuvre n'a pas été soignée), une ventilation naturelle de type « ouverture de fenêtres » et une cheminée ou un poêle à bois sans entrée d'air dédiée. L'alternative de rénovation proposée consiste à réaliser à minima les deux actions suivantes : installer une ventilation générale mécanique simple flux + traiter les défauts d'étanchéité de l'enveloppe chauffée. La combinaison de ces deux actions de rénovation est « risquée » car elle va forcer, par dépression, le cheminement de l'air intérieur des (nouvelles) bouches d'entrées d'air en façade vers l'extracteur du bloc de ventilation mécanique ; or l'absence d'entrée d'air dédiée à la cheminée ou au poêle à bois et la réduction des défauts d'étanchéité de l'enveloppe ne permettront plus d'alimenter correctement ce dispositif de chauffage par combustion. Dès l'allumage du feu, le bâtiment sera enfumé (par dépression de l'enveloppe chauffée) et la combustion, si elle parvient à s'initier, sera incomplète et dangereuse du point de vue sanitaire (production de CO). Il faudra impérativement alerter l'utilisateur de l'outil pour lui expliquer les risques encourus et recommander les bonnes actions à prendre (ici, il faudra soit condamner ce dispositif de chauffage, soit créer une entrée d'air dédiée). »

Ce type de raisonnement est transcrit sous la forme de combinaisons à risque. La valeur du risque encouru dépendra de l'appréciation du panel d'experts qui aura formulé chacune de ces combinaisons.

Tableau 19 – Modélisation des situations impactant les indicateurs de la cible « Risques induits et pathologiques »

IR_1 / Perte du potentiel d'amélioration énergétique					
N°	Isolation paroi opaque verticale	Isolation toiture	Baies Vitrées	Chauffage	Valeurs
1	Mur non isolé	Non isolée	Simple vitrage	Différent de celui d'origine	Importante (1)
2	-	Non isolée	Simple vitrage	Différent de celui d'origine	Importante (1)
3	-	-	Simple vitrage	Différent de celui d'origine	Moyenne (2)
n	Toutes les autres configurations				Faible (3)

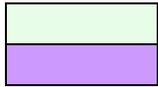
"-" = n'importe quelle autre valeur

(a)

IR_3 / Risques sanitaires liés à la génération de chaleur par combustion				
N°	Étanchéité à l'air de l'enveloppe	Ventilation	Présence de cheminée ou d'un poêle à bois (en volume chauffé)	Valeurs
1	Traitée	Générale naturelle	Oui, sans entrée d'air dédiée	Important (1)
2	Traitée	VMC SF	Oui, sans entrée d'air dédiée	Important (1)
3	Traitée	VMC DF	Oui, sans entrée d'air dédiée	Important (1)
4	Non traitée	Générale naturelle	Oui, sans entrée d'air dédiée	Moyen (2)
5	Non traitée	VMC SF	Oui, sans entrée d'air dédiée	Moyen (2)
6	Non traitée	VMC DF	Oui, sans entrée d'air dédiée	Moyen (2)
n	Toutes les autres configurations			Faible (3)

(b)

Légende des couleurs utilisées



Spécificités Techniques de l'existant (ST)

Approches Fonctionnelles (AF) ayant pour états les différentes Familles de Procédés qui la compose

III.2.4 Probabilisation des règles expertes

Les règles expertes au formalisme énoncées dans la sous-partie §III.2.3 sont les règles logiques encore non probabilisées. Jusqu'à maintenant, il n'y a pas de prise en considération des incertitudes associées à ce savoir. La technologie des réseaux bayésiens nous permet de rajouter une couche probabiliste à cette connaissance déjà codifiée, et cela à deux niveaux : l'incertitude liée à la caractérisation de l'existant et les incertitudes directement intégrées dans les relations causales.

Le premier type d'incertitude est associé au niveau d'informations disponibles, lors d'une phase de diagnostic, sur les différentes entrées nécessaires à la caractérisation initiale d'un bâtiment à rénover ainsi que celles permettant de mettre en œuvre les règles expertes répertoriées (i.e. valeurs sur les nœuds de type ST, CT et FP du modèle de représentation des connaissances). Lorsque les informations sont non disponibles ou incomplètes, les incertitudes qui leurs sont associées peuvent être codifiées sous la forme de distributions de probabilités (à partir d'études statistiques contextuelles si aucune information n'est disponible, ou sous la forme de réponses partielles si l'information recherchée reste connue mais imprécise⁴⁵).

Le second type d'incertitude consiste à probabiliser directement la relation causale. Par exemple, en prenant deux variables booléennes (A et B) et en appliquant la relation causale suivante « *Si A est vrai alors B est vrai* », l'approche logique consiste à dire que si A est vrai, alors B est vrai avec une probabilité de 1. La probabilisation de cette même règle permet de nuancer un jugement, par exemple, toujours avec le même exemple, cette fois-ci, si « *A est vrai, B est vrai avec une probabilité de 0.8* ». Là, nous avons permis d'adapter la relation causale pour y intégrer la part d'incertitude associée à une implication logique. Ce type de raisonnement permet de nuancer les relations causales lorsque les experts souhaitent exprimer le caractère aléatoire ou incertain associé à une règle. Dans le formalisme des réseaux bayésiens, ce type d'incertitude est modélisé sous la forme de « tables de relations conditionnelles ».

La codification de ces deux types d'incertitudes sur les règles expertes est présentées dans le sous-chapitre §III.5.2.2.

Ce sous-modèle, centré sur la modélisation de connaissances métiers, propose un cadre structurant pour la formalisation de connaissances expertes capitalisées auprès de sources diverses et hétérogènes (interviews d'expert, littérature spécialisée, données statistiques...). Ici, seules les connaissances génériques, non associées aux idées de performance, sont traitées en vue de construire des filtres intelligents sur les familles de procédés qui pourront être proposés par la méthode.

⁴⁵ Par exemple, le professionnel en charge du diagnostic d'un bâtiment à rénover affirme qu'il y a 80% de chance que le plancher-bas sur terre-plein soit isolé et 20% qu'il ne le soit pas, au regard des informations qu'il a en sa possession. Cette information n'est pas certaine mais reste plus précise que n'importe quelles autres distributions de probabilité issues d'une étude statistique.

III.3 M3 : Système d'évaluation des performances

Dans une logique de rénovation énergétique, il nous faut des indicateurs de performance pour évaluer de manière synthétique chaque situation (aussi bien la situation avant rénovation que les situations avec les alternatives potentielles de rénovation). Ayant opté pour une approche globale, ces indicateurs doivent autant que faire se peut, couvrir tous les aspects de la performance d'un bâtiment, être compréhensibles par tous et non redondants. Le tout pour être utilisables dans une logique d'aide à la décision multicritère. Les travaux mis en lumière dans ce domaine dans l'état de l'art montrent que les aspects traités peuvent être classés en 9 cibles :

- Énergie
- Économie
- Environnement
- Confort
- Impacts sociaux
- Santé
- Sécurité
- Qualité d'usage
- Risques induits et pathologiques

Chacune de ces cibles peut être caractérisée par un ou plusieurs indicateurs. Par exemple pour la cible confort, il faudra à minima intégrer les dimensions *confort thermique* et *confort acoustique*.

Dans notre logique d'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, nous nous concentrons sur une première étude de prospection (i.e. analyse exploratoire des études d'opportunité pour une opération de rénovation), qui vise à identifier très rapidement quelles sont les orientations technologiques possibles permettant, a priori, de coller aux spécificités techniques d'un logement et de satisfaire les attentes des décideurs au regard d'un panel d'aspects performantiels. En ce sens, le niveau de connaissances disponibles sur n'importe quel projet de rénovation traité reste faible et **il n'est pas envisageable d'utiliser des outils avancés de simulation requérant chacun des centaines d'entrées chiffrées pour automatiser l'évaluation multicritère d'un bâtiment dans son état d'origine puis équipé de ses alternatives de rénovation**. La précision de l'évaluation multicritère n'est pas la finalité de notre démarche, seule l'identification automatisée de scénarios pertinents est recherchée.

L'évaluation multicritère dans un objectif de certification ou de vérification réglementaire⁴⁶ n'est absolument pas visée ici. Des études d'évaluation plus détaillées, utilisant des codes de calcul, pourront par la suite être menées lorsque les principaux choix architecturaux et techniques auront été arrêtés, pour valider les performances multicritères souhaitées.

L'idée retenue dans l'étude est de formaliser l'évaluation des performances multicritères des familles de procédés, modélisées dans le sous-modèle M1 décrit au §III.1, directement dans un outil d'inférence de la connaissance métiers : les réseaux bayésiens. Pour ce faire, notre choix s'est porté sur une évaluation experte de chaque indicateur proposé ci-après. Cette évaluation, qualitative, repose sur la base d'une évaluation intrinsèque, par attribution experte de scores à chaque famille de procédés ainsi qu'un système d'agrégation de ces scores. Le mécanisme d'évaluation est présenté en détail à partir de la page 138 ; il se veut simple d'utilisation (nombre limité d'entrées à saisir sur une opération de rénovation) et rapide d'exécution (<1h).

⁴⁶ Néanmoins, le contexte réglementaire sera traduit par un nombre important de règles agissant comme des filtres sur les procédés techniques de rénovation retenus. Ce type d'analyse est développé dans le chapitre III.2 dédié au sous-modèle M2.

III.3.1 Le choix des échelles de performance ordinales, discrétisées et bornées

Dans ce cadre, et au regard de la précision des informations manipulées (familles de procédés génériques, spécificités techniques), une représentation des performances à l'aide de niveaux discrétisés définis sur des échelles de valeurs ordinales et bornées semble le plus pertinent. De telles échelles d'évaluation des performances, appelées aussi *espaces qualitatifs*, peuvent illustrer une évaluation experte directe (on demande à un jury de spécialistes de se prononcer sur telle ou telle situation) ou une transformation adaptée de sorties de calculs analytiques ou numériques (en transformant des intervalles de valeurs numériques en niveaux de performance). Ces mêmes échelles peuvent également par la suite alimenter directement des méthodes de classement multicritère.

Tableau 20 – Représentation de l'évaluation de la performance énergétique avec trois types d'indicateurs différents

Indicateurs		Cep [kWh.m _{SHON} ⁻² .an ⁻¹]	Étiquette énergétique [-]	Performance énergétique [-]
Méthodes d'évaluation		Code de calcul réglementaire Th-C-E Ex	Algorithme DPE-3CL	Appréciation experte
Échelles des niveaux de performances	Niveau 1	0 – 50	A	Excellente
	Niveau 2	51 – 90	B	Bonne
	Niveau 3	91 – 150	C	Moyenne
	Niveau 4	151 – 230	D	
	Niveau 5	231 – 330	E	Faible
	Niveau 6	331 – 450	F	Très faible
	Niveau 7	> 450	G	

Dans le Tableau 20, un exemple simple du rendu d'évaluation de la performance énergétique avec trois types d'indicateurs différents est proposé. Le passage d'une échelle à l'autre est critiquable, notamment aux niveaux de la définition des seuils inférieurs et supérieurs pour les échelles non numériques, mais facilement réalisable. Des niveaux de performance discrétisés et libellés sont beaucoup plus parlant pour une maîtrise d'ouvrage souhaitant orienter ses choix architecturaux et techniques que des sorties de codes de calcul requérant souvent une interprétation métier.

Le même travail de synthèse peut être fait pour n'importe quelle sortie de codes de calculs. Il possède deux autres avantages :

- il permet de gagner en lisibilité et être parlant pour un public non spécialiste ;
- la méthode d'évaluation de chaque indicateur peut être remplacée, au cas par cas, tout en gardant les mêmes échelles « non numériques ».

III.3.2 Choix des indicateurs de performances

Dans cette section sont présentés les indicateurs de performance manipulés dans la méthodologie d'aide à la décision, classés par cibles. La méthode d'évaluation de ces derniers (conditions d'attribution des niveaux de performance proposés pour chacun d'eux) est décrite dans le chapitre suivant (III.3.3), néanmoins nous proposerons également lorsqu'ils existent, des listes non exhaustives d'indicateurs quantitatifs équivalents et de méthodes/outils permettant de les calculer.

Parmi les 9 cibles mentionnées en page 121, les aspects « environnement » et « sécurité » n'ont pas pu être évalués par manque de contributions expertes sur ces thématiques. Néanmoins des indicateurs ont été définis, sans pour autant proposer une méthode

d'évaluation intégrable à notre démarche d'aide à la décision pour la rénovation. Ils pourront être intégrés à de futurs travaux de recherche ciblant la même thématique par ailleurs.

À chaque indicateur proposé est associé :

- un identifiant et un nom ;
- une vue métier représentant le type de spécialistes susceptibles de pouvoir caractériser l'indicateur ;
- une définition expliquant ce qui est pris en considération lors de l'évaluation du niveau de performance d'une situation ;
- les phases du cycle de vie du bâti pris en compte ;
- l'échelle des niveaux de performance associés à l'indicateur : à chaque niveau est associé un libellé (bon, moyen...) et une note (1, 2, 3...). Les niveaux de performance sont classés de manière ordinale, du niveau le moins performant au niveau le plus performant.

À certains indicateurs, sont également proposés :

- des indicateurs quantitatifs équivalents (listes non exhaustives) ;
- des méthodes de calcul permettant de les calculer (listes non exhaustives) ;
- des échelles quantitatives équivalentes pour un bâtiment type préalablement défini ;
- des commentaires utiles au lecteur.

III.3.2.1 Cible 1 : Énergie

Deux indicateurs sont proposés. Le premier « Performance énergétique » vise à évaluer de manière très synthétique, la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment en énergie primaire. Le second, quant à lui, permet au premier coup d'œil de savoir si des énergies renouvelables, au sens du « crédit d'impôts développement durable (CIDD 2014) » [133], sont utilisées dans la situation évaluée (situation avant rénovation ou alternative potentielle de rénovation).

ID	IP-1	
Nom	Performance énergétique	
Vue métier associée	Énergéticien	
Définition	Cet indicateur évalue le niveau de performance énergétique à l'échelle du bâtiment, tous postes de consommations confondus (chauffage, ECS, ventilation, éclairage, auxiliaires de ventilation). Plus une configuration de procédés techniques permet de réduire la consommation énergétique annuelle en énergie primaire du bâtiment, plus la valeur de cet indicateur est importante et inversement.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États / notes	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • Cep : Consommation d'énergie primaire des 5 postes de la Réglementation Thermique Globale pour les bâtiments existant [$\text{kWh-EP.m}^{-2}_{\text{SHON.an}^{-1}}$] • Étiquette DPE [lettre ou $\text{kWh-EP.m}^{-2}_{\text{SH.an}^{-1}}$] 	
Méthodes/outils utilisables	TRNSYS, Pléiade-COMFIE, Energy+, Méthodes réglementaires Th-C-E Ex [134] et Th-BCE [135], méthode DPE-3CL [136]	
Équivalences / Commentaires	Pour une MI de 100m ² , en France métropolitaine, en faisant une analogie avec un indicateur de performance de type Cep exprimé en [$\text{kWh-EP.m}^{-2}_{\text{SHON.an}^{-1}}$] : <ul style="list-style-type: none"> - Très faible : > 330 - Faible : 230-330 - Moyenne : 90-230 - Bonne : 50-90 - Excellente : < 50 	

ID	IP-2	
Nom	Projet utilisant des énergies renouvelables?	
Vue métier associée	Énergéticien	
Définition	Indicateur modélisant le degré de recours aux énergies dites renouvelables d'une configuration de procédés techniques sélectionnés et intégrés au bâtiment.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États / notes	Non (1) ; Oui (2)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	Sont considérés comme énergies renouvelables, les systèmes énergétiques donnant accès à un crédit d'impôt ou des subventions en 2013 en France : chaudières/poêles à bois, chauffe-eau solaire individuel, pompe-à-chaleur, ballon thermodynamique, solaire photovoltaïque.	

III.3.2.2 Cible 2 : Économie

Bien que qualitatifs, les deux indicateurs présentés ci-après permettent plus de départager les coûts théoriques des alternatives potentielles de rénovation entre-elles (dans une logique de décision) qu'à proprement dit chiffrer ces alternatives (logique d'évaluation). Cela pour deux principales raisons.

- Notre modélisation du bâti, à l'aide de procédés techniques génériques n'intègre pas les mètres (surfaces de parois traités, volumes...). Dans ce cadre, il est difficile de sortir des ordres de grandeurs pertinents.
- Les bases de données de coûts sont souvent propres aux professionnels qui utilisent des outils de conception. De plus, les tarifs des procédés évoluant de manière peu prévisible, il serait nécessaire de mettre à jours continuellement les coûts intégrés.

ID	IP-3	
Nom	Coût initial	
Vue métier associée	Économiste	
Définition	Coût initial d'une alternative de réhabilitation. Ce coût somme les coûts d'investissement et de mise en œuvre des différents procédés techniques de rénovation composant l'alternative. Cet indicateur est relatif : il ne permet que de classer les alternatives les unes par rapport aux autres et ne peut strictement pas être le point d'entrée vers une étude économique à part entière !	
Phases du cycle de vie pris en compte	Mise en œuvre	
États / notes	Très onéreux (1) ; Onéreux (2) ; Moyen (3) ; Économique (4) ; Très économique (5)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	Diverses bases de données de prix, publiques ou payantes (Bâtiprix [36], l'annuel des prix [37]...)	
Équivalences / Commentaires	Pour une MI de 100m ² , en France métropolitaine <ul style="list-style-type: none"> - Très onéreux : > 40k€ - Onéreux : 20k€ - 40k€ - Moyen : 10k€ - 20k€ - Économique : 5k€ - 10k€ - Très économique : < 5k€ 	

ID	IP-4	
Nom	Coût de fonctionnement annuel	
Vue métier associée	Économiste	
Définition	Cet indicateur représente l'intensité des coûts de fonctionnement annualisés nécessaires au paiement des consommations énergétiques ⁴⁷ et la maintenance des procédés de réhabilitation composant une alternative.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États / notes	Très onéreux (1) ; Onéreux (2) ; Moyen (3) ; Économique (4) ; Très économique (5)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	Diverses bases de données de prix, publiques (PEGASE [35]) ou payantes (Bâtiprix [36], l'annuel des prix [37]...)	
Équivalences / Commentaires	Pour une MI de 100m ² , en France métropolitaine, de 4 personnes, des ratios annualisés pour les postes Chauffage, ECS et ventilation <ul style="list-style-type: none"> - Très onéreux : >4k€ /an - Onéreux : 2k€ - 4k€ /an - Moyen : 1k€ - 2k€ /an - Économique : 500€ - 1k€ /an - Très économique : 0 – 500€ /an 	

III.3.2.3 Cible 3 : Environnement

Sur cet aspect, 5 indicateurs pourraient potentiellement être calculés à l'aide de bases de données environnementales (FDES et PEP génériques par exemple). Cependant à l'heure actuelle, il n'existe pas de produits de construction et des équipements énergétiques génériques ayant des impacts environnementaux de référence. Des travaux de recherche au CSTB sont en cours sur cette thématique. Malheureusement l'avancée de ces travaux et la temporalité de la thèse n'ont pas permis de chiffrer ces indicateurs.

⁴⁷ Sont pris en compte les postes de consommations énergétiques annuelles de la Réglementation Thermique en vigueur en France (Chauffage, Rafraîchissement, ECS, Ventilation, Eclairage).

ID	IP-5	
Nom	Énergie grise	
Vue métier associée	Certificateur HQE	
Définition	L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire à la réalisation du cycle de vie d'un procédé : la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'entretien et à la fin le recyclage. La part d'énergie liée à son utilisation (utilisation de combustibles pour un générateur de chauffage par exemple) n'est pas prise en compte dans cet indicateur.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Extraction des matières premières et production des matériaux, mise en œuvre ; fin de vie	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Consommation de ressources énergétiques [MJ]	
Méthodes/outils utilisables	<ul style="list-style-type: none"> Données d'entrées : FDES, Fiches PEP-écopassport, Ecoinvent Outil d'ACV environnementaux : ELODIE 2.0 [33], EQUER [62] 	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-6	
Nom	Consommation d'eau (non liée à l'usage)	
Vue métier associée	Certificateur HQE	
Définition	Indicateur qui caractérise la quantité d'eau prélevée dans l'environnement pour des usages autres que le fonctionnement et l'exploitation du bâtiment.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Extraction des matières premières et production des matériaux, mise en œuvre ; fin de vie	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Consommation d'eau [L]	
Méthodes/outils utilisables	<ul style="list-style-type: none"> Données d'entrées : FDES, Fiches PEP-écopassport, Ecoinvent Outil d'ACV environnementaux : ELODIE 2.0 [33], EQUER [62] 	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-7	
Nom	Déchets totaux	
Vue métier associée	Certificateur HQE	
Définition	Quantité totale de tous les déchets produits (inertes, non dangereux, radioactifs) sur tout ou une partie du cycle de vie du bâtiment.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Extraction des matières premières et production des matériaux, mise en œuvre ; fin de vie	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Déchets solides totaux [kg]	
Méthodes/outils utilisables	<ul style="list-style-type: none"> Données d'entrées : FDES, Fiches PEP-écopassport, Ecoinvent Outil d'ACV environnementaux : ELODIE 2.0 [33], EQUER [62] 	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-8	
Nom	Changement climatique	
Vue métier associée	Certificateur HQE	
Définition	Émissions de principaux gaz à effet de serre (GES) à l'origine du changement climatique : dioxyde de carbone (CO ₂), méthane (CH ₄), protoxyde d'azote (N ₂ O), hydrofluorocarbures (HFC), perfluorocarbures (PFC) et hexafluorure de soufre (SF ₆).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Extraction des matières premières et production des matériaux, mise en œuvre ; vie en œuvre ; fin de vie	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Changement climatique [kg _{éq.} CO ₂]	
Méthodes/outils utilisables	<ul style="list-style-type: none"> Données d'entrées : FDES, Fiches PEP-écopassport, Ecoinvent Outil d'ACV environnementaux : ELODIE 2.0 [33], EQUER [62] 	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-9	
Nom	Épuisement des ressources	
Vue métier associée	Certificateur HQE	
Définition	Indicateur décrivant l'épuisement des ressources non énergétiques puisées dans les réserves naturelles.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Extraction des matières premières et production des matériaux, mise en œuvre ; vie en œuvre ; fin de vie	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Épuisement des ressources (kg _{éq.} Sb)	
Méthodes/outils utilisables	<ul style="list-style-type: none"> Données d'entrées : FDES, Fiches PEP-écopassport, Ecoinvent Outil d'ACV environnementaux : ELODIE 2.0 [33], EQUER [62] 	
Équivalences / Commentaires	-	

III.3.2.4 Cible 4 : Confort

Chaque indicateur de cette cible est évalué à deux reprises, de deux manières différentes. La première évaluation, avant rénovation, se fait à l'aide d'un questionnaire orienté distribué aux occupants (ici, des propriétaires occupants). La seconde évaluation se fait lors de l'élaboration des alternatives, à l'aide des fonctions d'impacts présentées dans le sous-modèle M3 en page 138). L'idée est de rechercher les alternatives de rénovation permettant, à minima, d'obtenir un niveau de confort à peu près équivalent à la situation initiale (sauf mention spécifique de la maîtrise d'ouvrage). On ne souhaite en aucun cas dégrader les performances initiales.

ID	IP-10	
Nom	Confort Thermique (hiver)	
Vue métier associée	Énergéticien	
Définition	Indicateur modélisant le degré de satisfaction d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, au regard du confort thermique d'hiver (homogénéité des températures intérieures, absence de sensations de courant d'air et de parois froides, température de consigne de chauffe acceptable pour les occupants).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyen (3) ; Bon (4) ; Excellent (5)	
Indicateurs équivalents	Heures cumulées en dessous de la zone de confort de confort [h]	
Méthodes/outils utilisables	Méthode PMV/PDD [64], confort adaptatif (zone de Brager) [65]	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-11	
Nom	Confort Thermique (estival)	
Vue métier associée	Énergéticien	
Définition	Indicateur modélisant le degré de satisfaction d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, au regard du confort estival. La finalité première est de repérer les configurations à risques pouvant générer des surchauffes en été.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyen (3) ; Bon (4) ; Excellent (5)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • Heures cumulées en dessous de la zone de confort de confort [h] • Tic : Température intérieure conventionnelle [°C] 	
Méthodes/outils utilisables	Méthode PMV/PDD [64], confort adaptatif (zone de Brager) [65], méthodes réglementaires Th-CE Ex et Th-BCE [134, 135], outil ALICE [47]	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-12	
Nom	Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	
Vue métier associée	Acousticien	
Définition	Indicateur modélisant le degré de performance d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, au regard du niveau d'isolation acoustique de l'enveloppe chauffée vis-à-vis des nuisances sonores extérieures.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyen (3) ; Bon (4) ; Excellent (5)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • R : Indice d'affaiblissement acoustique [dB] • D_{nT} : Isolement normalisé [dB] 	
Méthodes/outils utilisables	ACOUBAT, textes normatifs	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-13	
Nom	Confort Acoustique (bruits intérieurs)	
Vue métier associée	Acousticien	
Définition	Indicateur modélisant le degré de performance d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, au regard du niveau d'isolement acoustique de l'enveloppe chauffée vis-à-vis des nuisances sonores intérieures (bruits de voisinage), et au regard des bruits d'équipements (ventilateurs, pompes...).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyen (3) ; Bon (4) ; Excellent (5)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • $D_{n,f}$: Isolement latéral normalisé [dB] • L'_{nT} : Niveau de pression du bruit de choc standardisé [dB] • L_{WA} : niveau de puissance acoustique de l'équipement [dB] • ... 	
Méthodes/outils utilisables	ACOUBAT, textes normatifs	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-14	
Nom	Confort Olfactif	
Vue métier associée	Expert HSE	
Définition	Indicateur modélisant le degré de performance d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, sur le plan du confort olfactif. Cet indicateur sert essentiellement à détecter les origines les plus probables à la présence de mauvaises odeurs (principalement dues à une mauvaise gestion de l'humidité).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Faible (1) ; Moyen (2) ; Bon (3)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité de la pollution olfactive [olf] • Qualité d'air perçue [dp] 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-15	
Nom	Accès à la lumière naturelle	
Vue métier associée	Éclairagiste, architecte	
Définition	Modification de l'accès à la lumière naturelle conditionnée par la mise en œuvre de procédés de réhabilitation (ex: changement des propriétés de transmission lumineuse des baies vitrées, effet tunnel suite à la pose d'isolant sur les parois opaques verticales...).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Diminué (1) ; Non modifié (2) ; Augmenté (3)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> • Facteur lumière du jour (FLJ) [%] • Autonomie en lumière du jour [%] • Autonomie en lumière du jour utile (UDI) [%] 	
Méthodes/outils utilisables	PHANIE, DiaLUX	
Équivalences / Commentaires	-	

III.3.2.5 Cible 5 : Impacts sociaux

Spécifiques à la rénovation de bâtiment, ces indicateurs ne sont calculables que pour les alternatives potentielles de rénovation (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas calculés pour la situation initiale). Ils visent à intégrer les aspects sociaux non pris en compte par les approches numériques classiques mais qui peuvent être déterminantes lors des choix techniques et architecturaux à faire par la maîtrise d'ouvrage.

ID	IP-16	
Nom	Temps de mise en œuvre	
Vue métier associée	Artisan	
Définition	Temps de mise en œuvre moyen du projet de rénovation énergétique conditionné par la nature des procédés de réhabilitation sélectionnés.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Mise en œuvre	
États	Très long (1) ; Long (2) ; Moyen (3) ; Rapide (4) ; Nul (5)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	<p>Échelle équivalente pour une MI de 100m² (8 baies vitrées, une porte palière, 150 m² de façade, 100m² de planchers hauts et bas, 1 bloc VMC et un générateur de chauffage + 1 production d'ECS), en France métropolitaine, en additionnant les actions d'amélioration intégré dans chaque alternative.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très long : Plus de 20 jours ouvrés - Long : 10 jours à 20 jours ouvrés - Moyen : 2 jours à 10 jours ouvrés - Rapide : 1 à 2 jours - Nul : 0 jours 	

ID	IP-17	
Nom	Intensité des travaux en site occupé	
Vue métier associée	Artisan	
Définition	Indicateur traduisant la complexité et les contraintes de chantier associées à la mise en œuvre des procédés de réhabilitation sélectionnés.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Mise en œuvre	
États	Très forte (1) ; Forte (2) ; Moyenne (3) ; Faible (4) ; Très faible (5)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	<p>Pour une MI de 100m².</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très forte : Impossibilité d'occuper le logement - Forte : Nécessité de « camper » dans le logement pendant le temps des travaux (ex : déplacer le mobilier initialement accolé aux murs intérieurs) - Moyenne : Gêne nécessitant de vider au moins une pièce de vie - Faible : Intervention ponctuelle en site occupé (le ou les professionnels doivent avoir accès à l'intérieur du logement pour intervenir) - Très faible : Pas d'intervention en site occupé. 	

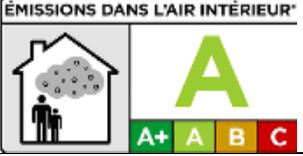
ID	IP-18	
Nom	Modification de l'aspect visuel extérieur	
Vue métier associée	Architecte, urbaniste	
Définition	Modification de l'aspect visuel extérieur conditionnée par la mise en œuvre de procédés de réhabilitation. Dans le cas de la recherche d'une modernisation de l'image du bâtiment, nous chercherons à maximiser cet indicateur. Dans le cas de la contrainte externe "Site Classé", nous chercherons à minimiser ce même indicateur pour se plier aux règles d'urbanisme.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Aucune (1) ; Très légère (2) ; Légère (3) ; Importante (4)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-19	
Nom	Modification de la surface habitable	
Vue métier associée	Architecte, urbaniste	
Définition	Indicateur modélisant le degré d'emprise sur la surface habitable d'une configuration de procédés techniques mis en œuvre à travers une alternative de rénovation sélectionnée. Par exemple, la mise en œuvre d'une isolation par l'intérieur des murs extérieurs peut réduire la surface habitable pour les petites maisons individuelles et les appartements. À contrario, la mise en place d'une extension (véranda, surélévation, agrandissement latéral) permet d'augmenter cette même surface habitable.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Réduite (1) ; Non modifiée (2) ; Agrandie (3)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> Écart de surface habitable (avant/après rénovation) [m²_{SH}] 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	Actuellement ce n'est pas le cas mais cet indicateur pourrait également être lié à un indicateur économique dans le but de tenir compte de la variation de la valeur patrimoniale engendrée par la modification de la surface habitable du bâti.	

III.3.2.6 Cible 6 : Santé

Essentiellement basés sur la qualité de l'air intérieur (QAI) ; les deux indicateurs proposés et évalués par un système de score (voir page 138) reprennent les typologies de polluants de l'Observatoire de la Qualité d'Air Intérieur (OQAI) [137-140]. Un troisième, centré sur le risque lié à la concentration de gaz radon, a été élaboré puis volontairement supprimé de l'étude car finalement peu pertinent pour la majorité des départements non concernés par ce risque très territorialisé.

ID	IP-20	
Nom	Taux de renouvellement d'air	
Vue métier associée	Expert HSE	
Définition	Indicateur de la cible Qualité d'Air Intérieur (QAI), le Taux de Renouvellement d'air prend en considération de niveau d'étanchéité de l'enveloppe chauffée ainsi que le procédé de ventilation mis en œuvre pour un projet de réhabilitation. Un trop faible taux de renouvellement d'air est généralement associé à l'apparition de pathologies relatives à un excédent d'humidité.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyen (3) ; Bon (4) ; Excellent (5)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> Débits volumique horaire contrôlée + débit volumique horaire dû aux infiltrations par défauts d'étanchéité [vol.h⁻¹] ou [m³.h⁻¹.m⁻²] 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-21	
Nom	QAI (Particules, COx, NOx, COV)	
Vue métier associée	Expert HSE	
Définition	Indicateur de la cible Qualité d'Air Intérieur (QAI), ce point permet d'évaluer la qualité d'air intérieur vis-à-vis des polluants autres que ceux associés à un excédent de vapeur d'eau (voir l'indicateur "Taux de renouvellement d'air"). Nous retiendrons alors ici les polluants de types particulaires (poussières extérieures, gaz d'échappement des véhicules), issus des produits de combustion de chaudières ou poêles (NOx, COx), et ceux relargués par les revêtements intérieurs et le mobilier (COV tels que les HAP et les formaldéhydes).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	Concentrations de l'air intérieur en <ul style="list-style-type: none"> • CO₂ [ppm] • CO [ppb] • Particules fines (PM10 et PM2.5) [µg/m³] • TCOV⁴⁸ [ppm] • Formaldéhyde [ppm] • Indice de contamination fongique 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

III.3.2.7 Cible 7 : Sécurité

Cette cible englobe les expertises portant sur les aspects *structurels* et *feux*. Les deux indicateurs potentiels constituant cette cible n'ont pu être caractérisés dans la temporalité de cette thèse par manque de contribution experte sur ces thématiques. Néanmoins nous nous focalisons ici sur les rénovations légères qui, comme leur noms l'indiquent, impactent peu la structure porteuse. Par conséquent, seul l'indicateur « sécurité incendie » a été conservé dans la méthodologie d'aide à la décision pour laisser éventuellement à des spécialistes du domaine la possibilité de mettre à jour ce pan d'expertise et rajouter de la connaissance à l'outil développé.

⁴⁸ TCOV : Concentration totale de composés organiques volatils (COV) dans l'air ambiant.

ID	IP-22	
Nom	Sécurité Incendie	
Vue métier associée	Diagnostic Technicien	
Définition	Indicateur non défini et non renseigné par manque de personnes compétentes disponibles.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Faible (1) ; Moyenne (2) ; Bonne (3)	
Indicateurs équivalents	<ul style="list-style-type: none"> Respects des exigences réglementaires sur le classement feu (Euroclasse) des produits de construction [68] 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires		

III.3.2.8 Cible 8 : Qualité d'usage

Comme la *Cible 5 : Impacts sociaux*, cet aspect de la performance est souvent négligé par les hommes d'études qui se posent rarement la question de la vie en œuvre des améliorations énergétiques proposées lors de travaux de rénovation. Il est important de savoir si les utilisateurs accepteront la rupture technologique avant-après rénovation, s'ils devront changer leur comportement ou faire réaliser une maintenance annuelle pour s'assurer du bon fonctionnement du bâti. Trois indicateurs sont proposés pour qualifier : les modifications d'accessibilité au bâti, la protection contre l'intrusion, ainsi que la facilité d'utilisation et d'entretien des procédés de rénovation listés.

ID	IP-23	
Nom	Accessibilité	
Vue métier associée	Ergothérapeute	
Définition	Modification du niveau d'accessibilité du bâti avant réhabilitation vis-à-vis des procédés techniques composant une alternative de réhabilitation. Par exemple, la mise en œuvre d'une isolation thermique par l'intérieur des murs extérieurs peut indirectement réduire la largeur de passage d'une porte palière et ainsi diminuer l'accessibilité à un fauteuil roulant. Le mode de pilotage de la gestion des ouvrants et protections solaires est un autre exemple (pilotage manuel ou via commande murale pour les volets roulants).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Réduite (1) ; Non modifiée (2) ; Améliorée (3)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-24	
Nom	Protection contre l'intrusion	
Vue métier associée	Assureur	
Définition	Indicateur modélisant le degré de performance d'une configuration de procédés techniques intégrés au bâtiment, sur le plan de la protection contre l'intrusion. Seuls les ouvrants (portes, baies vitrées et protections solaires extérieures) seront concernés par cette thématique.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Non modifiée (1) ; Améliorée (2)	
Indicateurs équivalent	<ul style="list-style-type: none"> • Présence d'ouvrants présentant des caractéristiques antieffraction (vitrage feuilleté, verrous 3-points) • Présence de dispositifs particuliers : alarme, télésurveillance... 	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IP-25	
Nom	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	
Vue métier associée	Sociologue, artisan	
Définition	Indicateur modélisant le niveau de facilité d'utilisation quotidien et de maintenance annuel des procédés techniques composant une alternative de réhabilitation.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Très faible (1) ; Faible (2) ; Moyenne (3) ; Bonne (4) ; Excellente (5)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	<p>Pour une MI de 100m².</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très faible : Intervention annuelle obligatoire par un professionnel (bois, solaire) + rupture technologique importante par rapport à des solutions courantes - Faible : Intervention annuelle conseillée par un professionnel (pompe à chaleur, ventilation double flux) + rupture technologique importante par rapport à des solutions courantes - Moyenne : Chaudière classique ou fermeture manuelle de volets battants - Bonne : système de chauffage décentralisé (absence de réseaux de distribution à entretenir) - Excellente : système de chauffage décentralisé (absence de réseaux de distribution à entretenir) + volets roulants extérieur ou protection solaire intérieur 	

III.3.2.9 Cible 9 : Risques induits et pathologiques

Propre à la rénovation énergétique des logements, ces indicateurs ont un rôle double. Le premier est d'identifier les configurations à risques (entre procédés techniques ou les interactions « bâti existant / procédés techniques ») lors de l'évaluation automatisée de jeux d'alternatives potentielles de rénovation (§III.5.3). Le second est d'alerter l'utilisateur de la

méthode lorsqu'il assemble lui-même des procédés techniques de rénovation en vue d'évaluer la performance multicritère de ses propres choix de rénovation (voir page 212). La notion de « risques » est ici particulière ; elle n'est ni associée aux traditionnelles approches *fréquence x gravité* ou *aléa x enjeux*, mais plutôt orientée sur la prévention de risques potentiels de contre-performances couramment identifiées par retours d'expérience (problèmes de combustions partielles, de pathologies liées à l'humidité, de perte de potentiels d'économie d'énergie, etc.) [141, 142]. La méthode d'évaluation de ces indicateurs est présentée en page 118.

ID	IR-1	
Nom	Perte du potentiel d'amélioration énergétique	
Vue métier associée	Énergéticien	
Définition	Indicateur modélisant l'intensité de la possible perte du potentiel d'amélioration énergétique d'un bâti si des équipements énergétiques à haute efficacité (génération de chauffage principalement) sont mis en œuvre sans avoir, au préalable, réduit les besoins en chauffage en isolant thermiquement l'enveloppe.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Importante (1) ; Moyenne (2) ; Faible (3)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IR-2	
Nom	Risque d'apparition de pathologies liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide	
Vue métier associée	Diagnostic Immobilier	
Définition	Indicateur modélisant les situations à risques pouvant provoquer l'apparition de pathologies liées à l'humidité (moisissures, décollement des revêtements...) au regard des spécificités du bâti avant rénovation et la sélection de procédés techniques d'amélioration énergétique sélectionnés. Le meilleur exemple est la configuration où on étanchéifie l'enveloppe chauffée sans mettre en place une ventilation permanente.	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Important (1) ; Moyen (2) ; Faible (3)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IR-3	
Nom	Risques sanitaires liés à la génération de chaleur par combustion	
Vue métier associée	Chauffagiste	
Définition	Indicateur modélisant les situations pouvant provoquer l'apparition de risques sanitaires liés à la combustion. Deux exemples parlant : (1) la mise en œuvre d'une chaudière gaz ou fioul sans entrée d'air dédiée alors qu'il y a une ventilation mécanique peut provoquer un by-pass de comburant (oxygène) et générer des combustions incomplètes ou un enfumage du bâti ; (2) l'allumage d'une cheminée ou d'un poêle à bois sans entrée d'air dédiée si des travaux d'étanchéité à l'air de l'enveloppe ont été entrepris (remplacement des baies vitrées par exemple).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Important (1) ; Moyen (2) ; Faible (3)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

ID	IR-4	
Nom	Risques d'inconforts acoustiques potentiellement important	
Vue métier associée	Acousticien	
Définition	Indicateur modélisant les situations pouvant provoquer l'apparition d'inconfort acoustique important. Un exemple parlant : l'isolement acoustique de l'enveloppe chauffée vis-à-vis des bruits aériens extérieurs, lorsqu'il existe des murs mitoyens à faible isolement acoustique avec le voisinage, peut provoquer une exacerbation des anciens faibles bruits mitoyens (disputes du voisinage, musique trop forte, bruits de plomberies, etc.).	
Phases du cycle de vie pris en compte	Vie en œuvre	
États	Potentiellement existant (1) ; Aucun (2)	
Indicateurs équivalents	-	
Méthodes/outils utilisables	-	
Équivalences / Commentaires	-	

III.3.3 Méthode de modélisation et d'évaluation des performances multicritères

Notre approche prône les aspects *multicritères* et *systémiques* du processus de rénovation de bâtiments. Le premier terme, multicritère, signifie que nous associons à chaque évaluation de situation, une grille de lecture permettant d'évaluer plusieurs aspects de la performance (énergie, confort, coût...). Le second terme, systémique, signifie quant à lui que nous assimilons le bâtiment à un système composé de plusieurs sous-systèmes interconnectés.

La connaissance métier de la rénovation, souvent informelle et gardée par spécialités (ventilation, chauffage, isolation...), se fait souvent au niveau fonctionnel. Par exemple un spécialiste de l'enveloppe dira qu'au regard du critère énergétique, une isolation thermique par l'extérieur sera préférable à une isolation thermique par l'intérieur car elle limitera les ponts thermiques linéiques situées entre les dalles et les murs extérieurs. Le raisonnement

sera différent si nous parlons des aspects économiques (car l'isolation par l'extérieur est plus onéreuse que par l'intérieur). Nous voyons ici que cette connaissance thématique est a priori qualitative et surtout relative. On ne peut, par ce type de connaissance, que comparer des solutions techniques répondant à une même fonctionnalité.

En partant de ce constat, nous avons choisi d'évaluer le niveau de performance d'un bâti comme une agrégation pondérée de performances locales définies pour chaque famille de procédés techniques et spécificités techniques de l'existant ayant une influence prépondérante sur l'indicateur considéré. Chaque performance locale est vue comme une contribution intrinsèque à la performance globale ; chaque poids associés à chaque contribution correspond à la prédominance d'une contribution par rapport à une autre. Voici un exemple pour illustrer cette approche.

Prenons l'exemple de l'indicateur « IP-12 / Confort acoustique (bruits aériens extérieurs) » comme fil rouge permettant d'expliquer la méthode d'évaluation des indicateurs de performance présentés dans la section précédente. Le même protocole a été appliqué pour chacun d'eux afin d'obtenir une fonction d'impact par indicateur permettant d'évaluer chaque situation (Annexe F).

Ce protocole de construction du système d'évaluation des indicateurs de performance est composé de 5 étapes que nous allons détailler par la suite :

Étape 1 : identification « experte » des facteurs d'influence intervenant dans l'évaluation d'un indicateur de performance (approches fonctionnelles, spécificités techniques du bâti) ;

Étape 2 : pondération des facteurs d'influence intervenant dans l'évaluation d'un indicateur de performance ;

Étape 3 : identification des états possibles pouvant caractériser chaque facteur d'influence intervenant dans l'évaluation d'un indicateur de performance (i.e. les *familles de procédés* pour les approches fonctionnelles, les *états des spécificités techniques* pour ces dernières) et mise en évidence de la taille du jeu combinatoire sous-jacent ;

Étape 4 : une évaluation multicritère intrinsèque de chaque état des facteurs d'influence contribuant à l'évaluation d'un indicateur de performance ;

Étape 5 : un système d'agrégation des performances locales (intrinsèques) pour remonter à une évaluation unique à l'échelle du projet.

Avant de présenter en détail ces étapes, il est important de préciser que le format d'expression de la performance sur un indicateur, doit être le même pour tous les facteurs ayant une influence sur ce dernier. Cela est nécessaire car chaque facteur d'influence pourrait exprimer sa contribution à la performance générale sur un indicateur avec une unité qui lui est propre (ex : *indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi* pour l'approche fonctionnelle « Isolation opaque verticale » ; *taux d'infiltration d'air* pour l'approche fonctionnelle « Étanchéité à l'air de l'enveloppe », etc.). Dans ce cas précis, le processus d'agrégation des performances locales n'en serait que plus complexe. Une solution pragmatique à ce problème consiste à instaurer dès le départ une méthode d'évaluation adimensionnelle comme un système d'évaluation par notes ou points. Cela permet ensuite d'agrèger facilement les performances définies localement en une valeur unique et globale (i.e. des fonctions d'impacts).

Cela ne signifie pas que l'approche d'évaluation de la performance est forcément qualitative, mais plutôt que la construction d'un indicateur de performance nécessite un post-traitement pour transformer des données de natures diverses (sorties numériques de simulation, jugements d'experts, réponses d'enquêtes menées auprès des occupants...) en notations homogènes compatibles avec des méthodes d'agrégations.

III.3.3.1 Présentation des étapes du protocole

Étape 1 – Détermination des facteurs d'influence

En reprenant la décomposition fonctionnelle du bâtiment qui est faite dans le sous-modèle M1 (en page 107), et en échangeant avec des spécialistes en acoustique du bâtiment, ces derniers nous expliquent que la performance de cet indicateur est conditionnée par plusieurs des approches fonctionnelles utilisées pour caractériser un bâtiment d'habitation. Par exemple, les nuisances sonores extérieures pénètrent à l'intérieur par tous les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe, mais aussi par les systèmes de ventilation (bouches d'entrées d'air, blocs d'extraction), les éléments de façades (murs et baies vitrées) ainsi que les liaisons périphériques *toitures / murs extérieurs*.

Dans la Figure 30 sont représentées en bleu les approches fonctionnelles ayant, a priori, une influence sur l'évaluation experte de l'indicateur IP-12 représenté lui-même en vert⁴⁹.

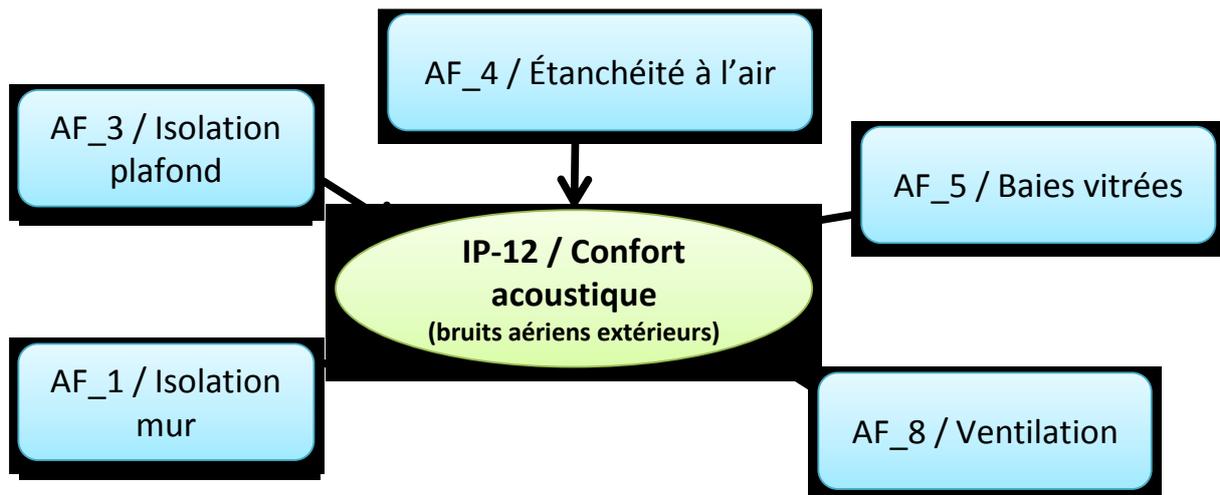


Figure 30 – Approches fonctionnelles ayant une influence sur l'indicateur IP-12

Étape 2 – Pondération des facteurs d'influence identifiés

Dans un second temps les experts nous confirment que chaque approche fonctionnelle n'a pas le même degré d'influence sur la prise de valeur de l'indicateur. *Pour l'évaluation du confort acoustique vis-à-vis des nuisances sonores extérieures, l'approche fonctionnelle « Baies vitrées » est indubitablement plus importante que celle intitulée « Isolation plafond ».* De ce discours, des poids différents traduisant l'intensité de la contribution de chaque approche fonctionnelle à l'évaluation de l'indicateur peuvent être attribués par le panel

⁴⁹ Pour cet indicateur de performance, aucune Spécificité Technique (ST) du bâtiment n'est considérée comme un facteur d'influence majeur. Ce n'est pas forcément le cas pour les autres indicateurs (voir l'annexe F).

d'experts. Dans le Tableau 21, plus le poids attribué est élevé, plus l'influence du facteur est forte.

Tableau 21 – Poids des facteurs influents de l'indicateur IP-12

Facteurs influents	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_2 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Baies Vitrées	AF_8 / Ventilation
Poids (w_i)	1	1	2	5	3

Étape 3 – Identification des états possibles de chaque facteur d'influence contribuant à la performance de l'indicateur et mise en évidence du jeu combinatoire sous-jacent

Lorsque la seconde étape est réalisée, il nous faut regarder ensuite quelles sont les familles de procédés (voir page 107) et états des spécificités techniques (listés dans l'Annexe F) que peuvent prendre respectivement les approches fonctionnelles et spécificités techniques qui contribuent à l'attribution d'un niveau de performance d'un indicateur (exemple en Figure 31 pour l'approche fonctionnelle « AF_5 / Baie vitrée »).

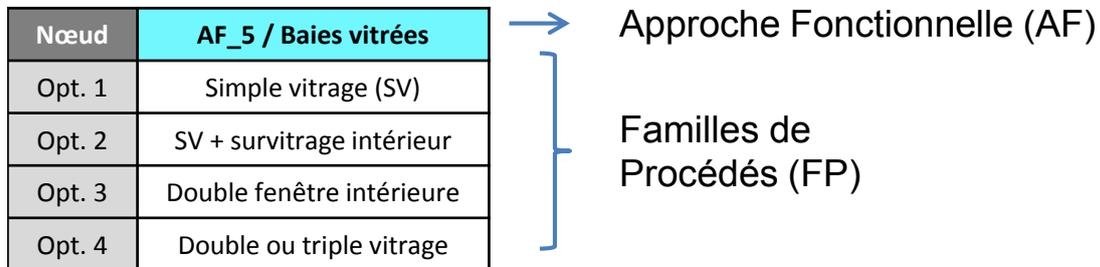


Figure 31 – Familles de procédés pouvant remplir la fonction "AF_5 / Baies vitrées"

Dans notre fil rouge visant l'évaluation de l'indicateur IP-12, nous avons 5 approches fonctionnelles pouvant chacune être remplie par un nombre différent de familles de procédés⁵⁰ (Figure 32).

- 3 familles de procédés pour l'approche fonctionnelle « AF_1 / Isolation mur » ;
- 5 familles de procédés pour l'approche fonctionnelle « AF_3 / Isolation plafond » ;
- 2 familles de procédés pour l'approche fonctionnelle « AF_4 / Étanchéité à l'air » ;
- 4 familles de procédés pour l'approche fonctionnelle « AF_5 / Baies vitrées » ;
- 4 familles de procédés pour l'approche fonctionnelle « AF_8 / Ventilation ».

$$\text{Nombre de combinaisons possibles} = 3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 = 480$$

Éq. 2

⁵⁰ Nous prenons ici l'hypothèse forte que seul un état par facteur d'influence peut être sélectionné pour caractériser une situation. Il n'est donc pas possible d'évaluer directement un bâti possédant à la fois des baies vitrées simple vitrage et des baies vitrées double vitrage, par exemple. Cette hypothèse sera rediscutée dans les perspectives de ce mémoire.

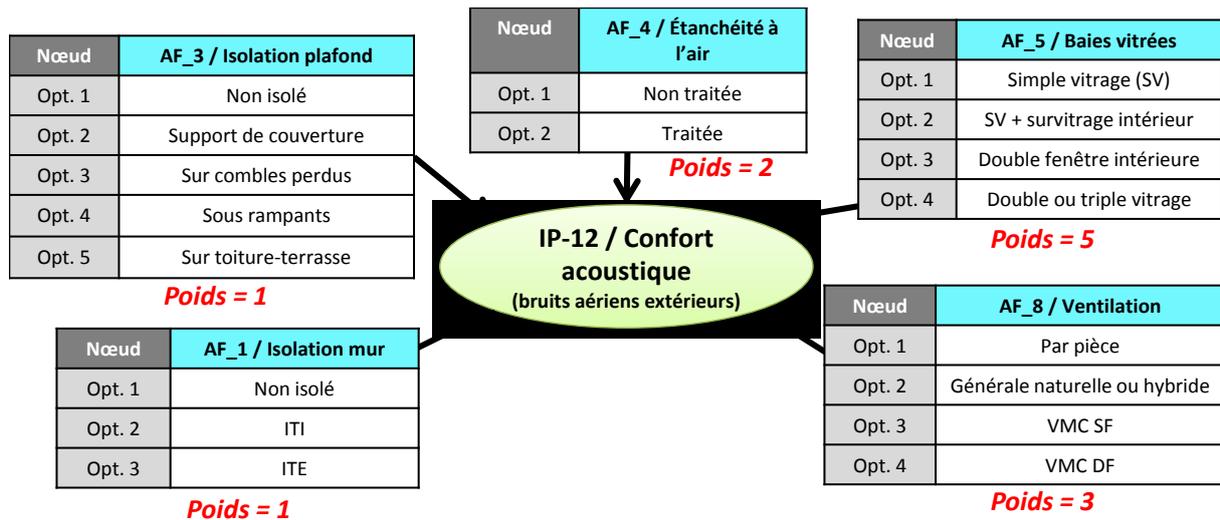


Figure 32 – Ensemble de familles de procédés conditionnant l'évaluation experte de la performance de l'indicateur IP-12

Dans le cas de l'indicateur IP-12 (Figure 32), nous avons 480 combinaisons de familles de procédés possibles, construites par jeu combinatoire (Éq. 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), à évaluer. Il n'est pas souhaitable d'évaluer au cas par cas, chacune de ces combinaisons de familles de procédés, que ce soit par analyse d'experts ou par simulation numérique⁵¹. Nous revenons ainsi à une vue orientée « contributeurs » où chaque contribution doit être évaluée de manière locale via la même échelle de performance.

Étape 4 – Évaluation multicritère intrinsèque de chaque état des facteurs d'influence identifiés

Le choix retenu a donc été de réaliser des évaluations locales et relatives, de chacune des familles de procédés appartenant à une même approche fonctionnelle et de chacun des états de spécificités techniques contribuant à la performance d'un même indicateur.

L'indicateur IP-12 est défini en page 128 par une échelle composée de cinq niveaux de performances (caractérisé chacun par un libellé et un nombre de points). Il convient alors d'utiliser la même échelle de notation pour évaluer les contributions locales à la performance globale du bâtiment (Tableau 22).

Tableau 22 – Niveaux de performance de l'indicateur IP-12

Nœud	IP-12 / Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	Points associés à chaque niveau
Niveau 1	Très faible	1
Niveau 2	Faible	2
Niveau 3	Moyen	3
Niveau 4	Bon	4
Niveau 5	Excellent	5

⁵¹ En effet d'autres indicateurs construits de la même manière affichent une dépendance combinatoire de plus de 500 000 combinaisons.

Protocole d'évaluation des performances multicritère intrinsèques

L'évaluation de chaque famille de procédés se fait de manière relative par approche fonctionnelle⁵² et en utilisant la même échelle d'évaluation des performances pour un indicateur visé. Un expert, lorsqu'il doit évaluer la performance d'une famille de procédés, commence par rassembler tous les familles de procédés permettant de répondre au même besoin fonctionnel (i.e. les approches fonctionnelles). Ensuite, il recherche les caractéristiques techniques permettant de comparer les familles de procédés retenus entre-elles. Deux cas de figure s'offrent alors :

- *Le cas le plus simple (mais rare)*
Il n'existe qu'une seule caractéristique technique permettant d'évaluer chaque famille de procédé technique mis en concurrence

→ Il classe alors les familles de procédés par niveau croissant de performance au regard de la caractéristique évaluée. Les ex-aequo sont possibles. Une même note peut même être attribuée à tous les éléments comparés si leurs performances sont similaires et indissociables aux yeux des spécialistes.
- *Le cas le plus complexe (le plus répandu)*
Il existe plusieurs caractéristiques techniques déterminantes dans l'évaluation de la performance des familles de procédés mis en concurrence ; ou bien la ou les caractéristiques ne sont pas les mêmes pour toutes les familles à évaluer.

→ Un jugement expert doit être formulé.

Dans le second cas, la manière la plus naturelle pour évaluer la performance de chaque famille de procédé mis en concurrence sur l'approche fonctionnelle visée, consiste à commencer par rechercher les extremums : les éléments jugés respectivement *le moins performant* et *le plus performant*. Puis remplir de manière relative le classement par niveau de performance.

Ce protocole est à appliquer par un panel d'experts, spécialistes de l'Approche Fonctionnelle visée. En effet, confronter plusieurs points de vues pour palier la subjectivité de la note attribuée à chaque procédé est plus facile lorsque plusieurs experts s'accordent sur un classement performantiel commun.

Cette étape, indispensable, est un des points centraux de la méthodologie d'aide à la décision. Cette méthode nécessite l'intervention de groupes de travail d'experts pour évaluer de manière relative les performances locales entre procédés. Ce travail méticuleux est chronophage et requiert de nombreuses discussions pour s'accorder sur une grille de notation acceptable par tous.

Le problème de la mise à jour de ces évaluations relatives lors de la démocratisation de nouveaux procédés techniques performants est un obstacle majeur au développement de ce type d'approche. Nous recherchons actuellement des jeux de caractéristiques performantielles permettant de décrire toutes les familles de procédés appartenant à une même approche fonctionnelle, pour essayer d'automatiser la conversion de données quantitatives en notations qualitatives, compatibles avec un système d'agrégation de performances locales.

⁵² Nous appliquons exactement la même démarche pour l'évaluation multicritère des états proposés pour une même spécificité technique.

Dans le cas de l'exemple *fil rouge* sur la modélisation de l'indicateur IP-12, l'évaluation intrinsèque de chaque état des approches fonctionnelles contribuant à la performance globale du bâti nous permet de construire la Figure 33. Les points alloués à chaque état correspondent à un niveau de performance sur l'échelle caractérisant l'indicateur (Tableau 22).

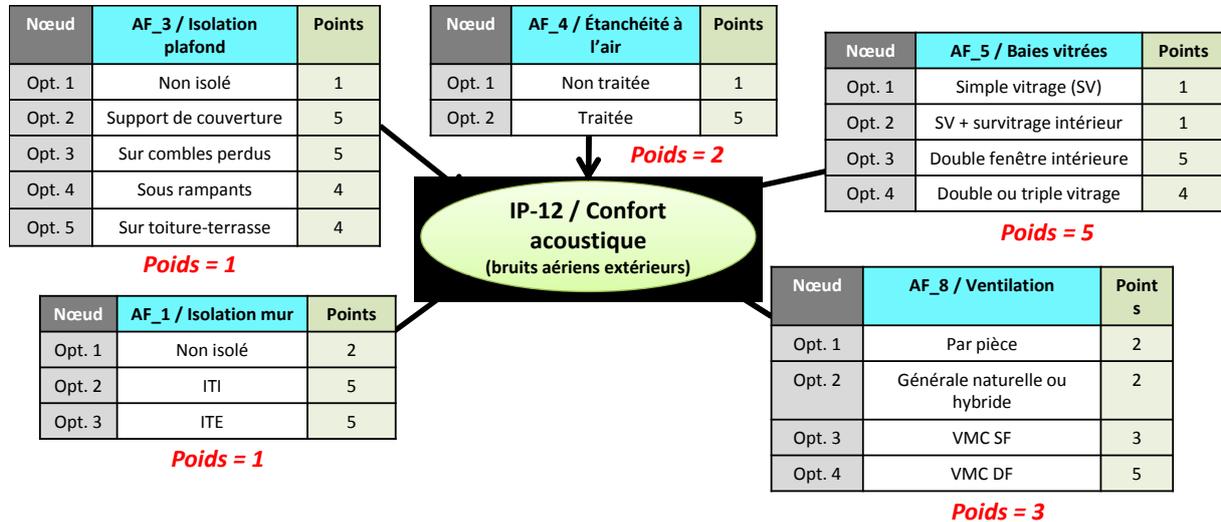


Figure 33 – Performances intrinsèques des familles de procédés ayant une influence sur l'indicateur IP-12

Nous allons maintenant expliquer comment nous passons des évaluations locales à une évaluation globale à l'échelle du bâti par un système de fonctions d'impacts basé sur le principe mathématique d'agrégation par somme pondérée.

Étape 5 – Système d'agrégation des performances locales

Cette étape nécessite trois sous-étapes : la génération des scores totaux pondérés pour chaque combinaison d'états ; la détermination des seuils d'attribution des niveaux de performance à l'échelle « bâti » ; et l'attribution des niveaux de performance globale pour chaque combinaison d'états de facteurs influents.

a) Génération des scores totaux pondérés pour chaque combinaison d'états

Nous disposons de performances locales (sous forme de points), pour chacun des états des facteurs d'influence intervenant dans l'évaluation d'un indicateur de performance (voir étape 4). Mais aussi de poids déterminant le degré d'influence de chaque facteur pour l'indicateur considéré (voir étape 2). Grâce à ces deux types d'information, il devient possible de pondérer les scores locaux.

$$\text{Score pondéré}_i = w_i \cdot \text{Performance locale}_i \quad \text{Éq. 3}$$

Pour chaque combinaison d'états des facteurs d'influence (ici 480 combinaisons), un score total pondéré peut être calculé en sommant les scores locaux pondérés de chaque état contribuant à chacune des combinaisons possibles.

$$\text{Score total pondéré} = \sum_i \text{Score pondéré}_i \quad \text{Éq. 4}$$

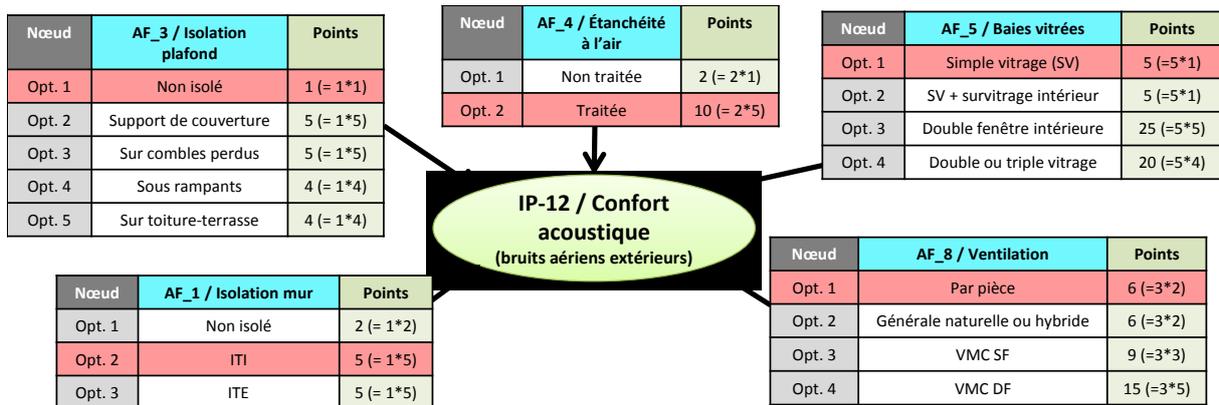


Figure 34 – Surligné en rouge, un exemple de combinaison de familles de procédés (dotée chacune d'un « score pondéré »)

Dans la Figure 34 illustrant l'exemple *fil rouge*, la combinaison de familles de procédés, mise en évidence par un surlignage rouge, obtient un score total pondéré de 27 (= 5 + 1 + 10 + 5 + 6) points. Ce score est à comparer avec les seuils bas et seuils hauts attribués par un panel d'experts pour chaque niveau de performance définissant chaque indicateur. La détermination de ces seuils est présentée dans la section suivante.

b) Détermination des seuils d'attribution des niveaux de performance à l'échelle « bâti »

Comme vu précédemment, la démarche permet d'attribuer à chaque combinaison d'états de facteurs influents un *score total pondéré*. Pour pouvoir l'utiliser, il faut générer une table de correspondance permettant d'associer sur une échelle numérique croissante « scores totaux pondérés » et « niveaux de performance d'un indicateur ».

Pour y parvenir, nous sollicitons un panel d'experts pour déterminer les seuils hauts et bas d'attribution pour chaque niveau de performance définissant un indicateur. Cette étape, déterminante, doit être réalisée avec soin et peut nécessiter un recalibrage à posteriori lors de l'étude du comportement du modèle d'évaluation sur les premiers cas de rénovation testés.

Dans le cas d'application, un score total pondéré compris entre 16 et 24 points correspond au niveau de performance « Très Faible », un score total pondéré compris entre 25 et 33 points correspond au niveau de performance « Faible », et ainsi de suite jusqu'au score maximal théorique de 60 points (Tableau 23).

Tableau 23 – Table de correspondance « Scores totaux pondérés → Niveaux de performance » pour l'indicateur « Confort acoustique extérieur »

Nœud	IP-12 / Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	Seuils	
		Bas	Haut
Niv. 1	Très faible	16	24
Niv. 2	Faible	25	33
Niv. 3	Moyen	34	42
Niv. 4	Bon	42	51
Niv. 5	Excellent	52	60

Il est important de mentionner que l'affectation des seuils hauts et bas n'est pas forcément linéaire. Les seuils minimum « bas » et minimum « haut », respectivement 16 et 60, peuvent être déterminés automatiquement par l'analyse combinatoire des scores pondérés totaux.

c) Attribution des niveaux de performance globale pour chaque combinaison de facteurs influents

Le niveau de performance d'un indicateur dépend de la combinaison des états des facteurs influents qui contribuent à sa performance. Pour chaque combinaison correspond un « score total pondéré », qui lui-même correspond à un niveau de performance sur l'indicateur (délimité par un seuil bas et un seuil haut). Cette correspondance est appelée fonction d'utilité ou fonction d'impact.

Dans l'exemple en Figure 34, le score total pondéré de la combinaison de familles de procédés surlignée en rouge vaut 27 points. En faisant correspondre ce total de point avec la Table de correspondance présentée en Tableau 23, nous obtenons un niveau de performance équivalent à l'échelle du bâtiment valant « Faible ». En généralisant cette démarche, nous sommes en capacité d'attribuer automatiquement, pour chacune des 480 combinaisons possibles de familles de procédés, un niveau de performance à l'échelle du bâtiment, allant de la performance « Très Faible » à la performance « Excellente ».

Le Tableau 24 présente un extrait de la fonction d'utilité faisant correspondre chaque combinaison de familles de procédés avec un niveau de performance sur l'indicateur.

Tableau 24 – Exemple de fonction d'utilité de l'indicateur "Confort Acoustique Extérieur" (480 combinaison de familles de procédés possibles)

N° combinaison	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Baies Vitrées	AF_8 / Ventilation	Score total pondéré	Niveau de performance équivalent
1	Mur non isolé	Non isolée	Non traitée	Simple vitrage	Par pièce	16	Très faible
2	Mur non isolé	Non isolée	Non traitée	Simple vitrage	Générale naturelle ou hybride	16	Très faible
...
215	ITI	Support de couverture	Traitée	Survitrage intérieur	VMC SF	34	Moyen
...
219	ITI	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	VMC SF	54	Excellent
...
480	ITE	Sur toiture-terrasse	Traitée	Double ou triple vitrage	VMC DF	54	Excellent

III.3.3.2 Discussions sur les avantages et limites de cette méthode d'évaluation

Avantages

L'avantage principal lié à l'utilisation de telles fonctions d'utilité comme moyen d'attribuer des niveaux de performance sur chaque indicateur caractérisant les situations avant/après rénovation, est de pouvoir évaluer rapidement un grand nombre de combinaisons de solutions (pouvant aller jusqu'au million de configurations possibles).

En effet, par retours d'expérience (dans la littérature spécialisée ou via l'interview de spécialistes du bâtiment), il est possible d'identifier les « pires » et « meilleures » situations permettant de calibrer les indicateurs de performance ou de mettre en lumière des configurations à risques. Cependant il est impensable de demander à un sachant (un expert dans notre cas) de renseigner une à une des milliers de combinaisons.

À l'inverse des approches de modélisation classique des performances - moteurs de calcul et simulations numériques – où l'évaluation ne peut se faire que lorsque les nombreuses données d'entrées sont connues, notre méthode ne requière qu'une vingtaine de données d'entrées.

Un autre et de pouvoir utiliser ces fonctions dans un outil d'inférence probabiliste (voir notre utilisation des réseaux bayésiens dans le sous-modèle M5 ainsi que l'Annexe F) pour rechercher les assemblages de familles de procédés répondant aux niveaux de performance attendus par la maîtrise d'ouvrage (voir §III.4) et évaluer des situations en présence d'inconnue partielle.

Enfin cette démarche permet de raisonner à une échelle de comparaison intuitive (le procédé générique et non directement à l'ensemble du bâtiment) et par expertise métier (une vue métier par indicateur). Nous retrouvons ici le choix de l'approche globale (systémique et multicritère).

Limites

Cette approche de la performance « experte » du bâtiment se confronte cependant à quelques limites. Premièrement, la subjectivité de l'évaluation à de nombreux niveaux (performances locales, relations des dépendances fonctionnelles, détermination des poids et seuils). Ce modèle d'évaluation des indicateurs reste discutable et restera toujours une vision métier mais partielle de la performance. Plus le nombre d'experts contribuant à ces points-clés sera élevé, plus la modélisation sera pertinente.

La granularité des informations modélisées ne permet pas de dimensionner, chiffrer, labéliser des projets de rénovation. Cela nous importe peu dans la mesure où ces utilisations ne sont pas en adéquation avec la finalité de la démarche.

La plus grande limite de cette méthode de construction des fonctions d'utilité est le phénomène de compensation associé au processus d'agrégation des performances locales : une « mauvaise note » locale, additionnée à de nombreuses « bonnes notes » locales, sera masquée par le processus d'agrégation par sommes pondérées. Malheureusement c'est cette particularité de l'approche qui en fait son intérêt : le système de *score total pondéré* (Tableau 23) permet d'évaluer instantanément un nombre quasi-infini de combinaisons, mais gère mal les configurations de procédés ayant des performances locales très disparates. Néanmoins gardons à l'esprit que les évaluations intrinsèques des familles de procédés et des états des spécificités techniques (i.e. les scores locaux) existent et permettent de garder une trace sur l'évaluation des performances.

Un autre problème mis en lumière via cette approche est la mise à jour des performances locales à l'échelle des familles de procédés. Étant donné que les évaluations des performances locales sont relatives (par approche fonctionnelle), l'ajout ou le retrait de familles de procédés techniques, au fil des avancées technologiques et évolution des réglementations, nécessite une réaffectation des niveaux de performances locales.

Conclusion

L'approche proposée reste exhaustive et cohérente au regard du périmètre fixé. Toutes les principales familles de procédés techniques pouvant intervenir dans une opération de rénovation énergétique légère sont renseignées et évaluées de manière systémique. Réservé à la phase d'exploration des choix technologiques possibles pour un projet de rénovation énergétique, cette approche nécessite peu d'informations en entrée et permet d'évaluer rapidement les points forts et les points faibles de situations avant/après travaux.

III.4 M4 : Système d'aide à la formalisation des préférences du décideur

Dans la plupart des opérations de rénovation de logements individuels, les bureaux d'études spécialisés et les cabinets d'architecture ne sont pas sollicités par soucis d'économie. La maîtrise d'ouvrage (MOA) fait l'impasse sur les études (dont elle ne voit pas la valeur ajoutée et le gain direct) et s'adresse directement aux entreprises, imaginant qu'elles possèdent un savoir-faire suffisant. Son interlocuteur privilégié est alors l'artisan ou l'entrepreneur qui assure la conception-réalisation de l'opération de rénovation. Cette personne physique ou morale, appelée ci-après le *professionnel*, est généralement compétente sur un ou deux aspects (énergie, maçonnerie...) mais ne maîtrise pas l'ensemble des domaines performantiels pouvant être impactés par une opération de rénovation globale (confort, qualité d'usage, environnement, santé, ...). Quand bien même l'artisan serait engagé dans une démarche de type éco-artisans, l'accompagnement de ce dernier par un outil d'aide à la décision reste pertinent compte tenu de la complexité de l'acte de rénovation.

Lors de la phase de conception d'une opération de rénovation, dans le meilleur des cas, le professionnel commence par essayer d'analyser les enjeux exprimés par le décideur pour lui proposer en retour des solutions techniques qu'il évaluera à travers des indicateurs de performance (coûts d'investissement, performance énergétique, amélioration du confort...). Nous voyons bien ici que d'un côté, nous avons la notion d'enjeux traduisant des préférences exprimées en langage non-technique et que de l'autre, nous avons une notion de performances à atteindre à travers la sélection d'un panel de solutions techniques. Le passage de la première notion à la seconde nécessite une certaine expertise qui est souvent détenue par plusieurs corps de métiers du bâtiment (économiste, énergéticien, expert HQE, acousticien...).

Par exemple, la volonté de remplacer un équipement énergétique défectueux (c.-à-d. un enjeu) peut s'apparenter intuitivement à l'amélioration du confort thermique ou à la réduction des coûts de fonctionnement (c.-à-d. des performances). Cependant d'autres aspects de la performance peuvent être, a priori, 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.

Nous voyons, par cet exemple, que le savoir expert nécessaire à la transposition d'un enjeu en poids ou valeurs-cibles sur des indicateurs de performance n'est pas une tâche aisée. Elle nécessite une connaissance technique et physique du bâtiment que ni la maîtrise d'ouvrage ni le professionnel en charge de la rénovation de logements individuels ne maîtrisent.

Le sous-modèle qui est présenté par la suite, a pour but de proposer une méthode d'aide à la formalisation des préférences des décideurs en un format utilisable par des outils

d'optimisation multicritère et d'aide à la décision multicritère. Il est basé sur l'utilisation d'une matrice d'influence experte croisant *enjeux de rénovation* et *indicateurs de performance*, la méthode de pondération AHP (Analytical Hierarchy Process) et un système de manipulation de scores. Il permet, pour chaque projet spécifique de rénovation, de construire un Profil Global de Performance (PGP) donnant les niveaux-cibles de performance à atteindre sur chaque indicateur de performance manipulé et un Profil de Poids Relatifs (PPR) sur ces mêmes indicateurs, à partir de la sélection et de la priorisation d'enjeux de rénovation pré-listés. Ces profils multicritères permettent, dans la suite de la méthodologie, de rechercher les combinaisons de famille de procédés techniques de rénovation énergétique répondant au mieux aux préférences de la maîtrise d'ouvrage (sous-modèle M5) et de faire fonctionner des méthodes multicritères ELECTRE (sous-modèle M6).

III.4.1 Présentation synthétique de la méthode

La présentation de ce sous-modèle est divisée en trois parties. La première, appelée ci-après « gestion des connaissances expertes », se focalise sur la collecte et la structuration de l'analyse experte de spécialistes du bâtiment sur la rénovation. Cette partie d'acquisition de connaissances est réalisée une fois pour toute et reste générique : l'analyse experte capitalisée est utilisable pour n'importe quelle opération de rénovation (bloc supérieur-gauche de la Figure 35). La seconde partie est dédiée à la « collecte des préférences du décideur ». Elle doit être répétée pour chaque opération spécifique de rénovation saisie (bloc supérieur-droit de la Figure 35). Enfin, la troisième et dernière partie représente le « processus calculatoire » permettant de fusionner les deux parties précédentes pour produire, après quelques étapes calculatoires, un Profil de Global de Performance (PGP) et un Profil de Poids Relatifs (PPR) sur les indicateurs de performance manipulés (bloc inférieur de la Figure 35). Chacune de ces trois parties est détaillée dans les sous-chapitres suivants.

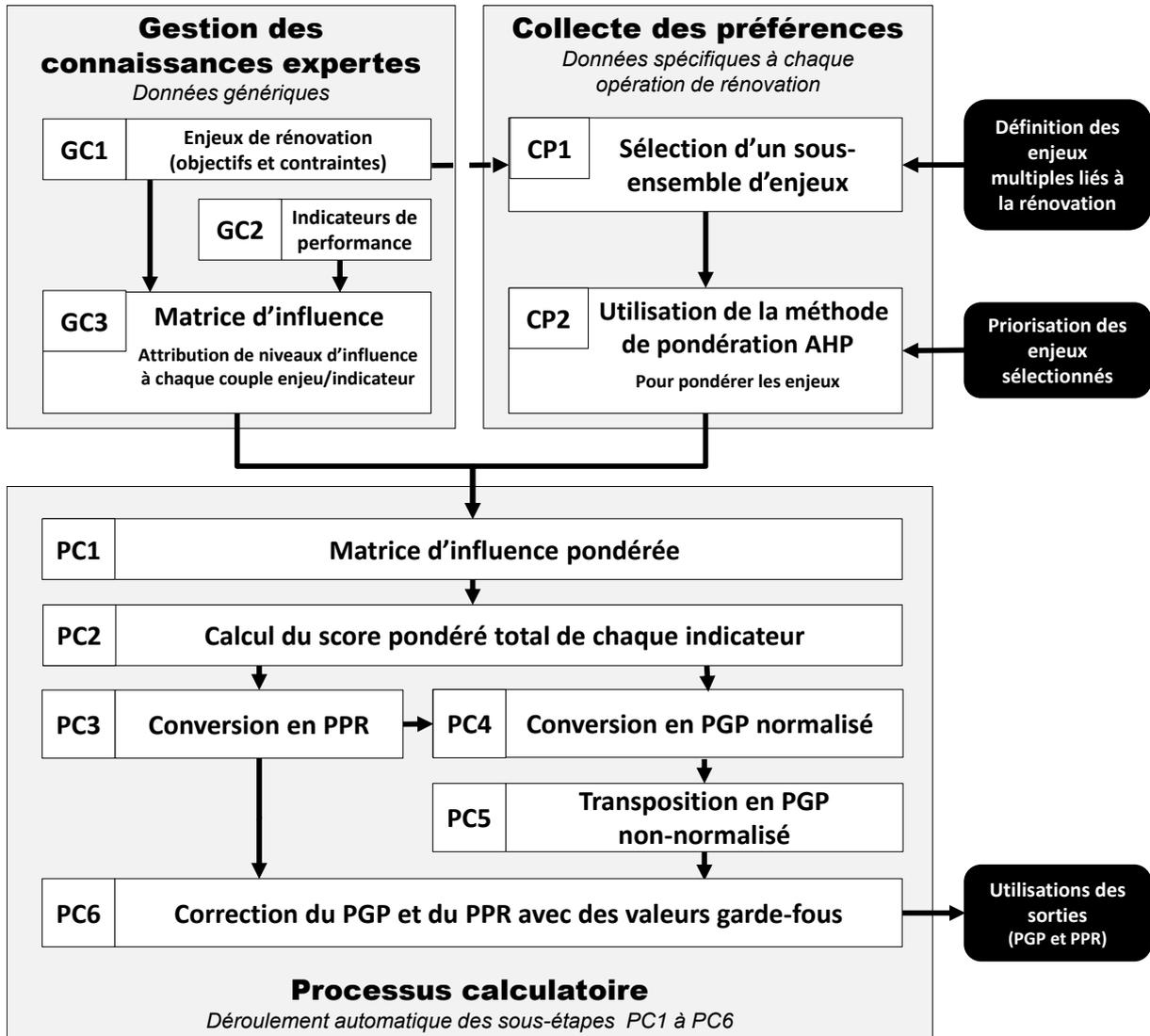


Figure 35 – Schéma de principe du processus d'élaboration du PGP et du PPR

III.4.2 GC / Gestion des connaissances expertes génériques

Cette partie du sous-modèle a pour finalité de capitaliser dans une matrice d'influence, l'analyse experte sur les interactions potentielles entre *enjeux de rénovation les plus courants en logement individuel* et *indicateurs de performance*. Nous commençons par définir des listes prédéfinies d'enjeux et d'indicateurs, puis nous expliquons le protocole mis en place pour construire et remplir cette matrice d'influence.

III.4.2.1 GC1 / Liste des enjeux potentiels considérés

À travers des enquêtes sociales menées auprès des propriétaires-occupants de logements individuels souhaitant ou ayant réalisés des travaux de rénovation au cours de ces dernières années [16-18], une liste des 33 enjeux de rénovation les plus courants ont été répertoriés⁵³ et classifiés en 8 familles d'objectifs (Tableau 25) et 2 familles de contraintes externes (Tableau 26). La première catégorie exprime les principales raisons pour lesquelles les actions de rénovation ont été réalisées ou planifiées et quels sont les types de bénéfices attendus. La seconde catégorie présente les contraintes générales sur les opérations pouvant grandement orienter les choix techniques de solutions d'amélioration de l'existant. En outre, une opération de rénovation est rarement définie par un seul enjeu : une sélection et une pondération de ces derniers sont souvent nécessaires pour faire ressortir au mieux les préférences des décideurs. Ce type de problème est traité dans le sous-chapitre III.4.3

⁵³ Les enjeux exprimés proposent de couvrir le maximum de thématiques identifiées à ce jour. Il est cependant évident que cette liste n'est pas exhaustive, et donc, elle pourra évoluer au gré des amendements proposés par les experts en rénovation consultés.

Tableau 25 – Objectifs de réhabilitation les plus courants

ID Famille	Familles d'Objectifs	ID	Objectifs
FO-1	Pathologies à résoudre	O-1	Efflorescences / Salpêtre
		O-2	Moisissures
		O-3	Condensation sur paroi froide opaque
		O-4	Condensation sur paroi froide vitrée
		O-5	Défaut d'étanchéité de la toiture
		O-6	Décollement des revêtements intérieurs (tapisseries, peintures)
		O-7	Remontées capillaires
FO-2	Remplacement d'un équipement défectueux	O-8	Volets extérieurs cassés
		O-9	Générateur de chaleur défectueux
		O-10	Sous-dimensionnement de la production d'ECS
FO-3	Amélioration du confort	O-11	Sensations de courants d'air
		O-12	Odeurs de renfermé / Humidité
		O-13	Nuisances acoustiques
		O-14	Éclairage naturel ou artificiel insuffisant
		O-15	Surchauffes estivales
		O-16	Sensations de froid en hiver
FO-4	Réduction des charges d'exploitation	O-17	Réduction des coûts annuels liés aux consommations énergétiques (gaz, électricité...)
		O-18	Réduction des coûts annuels liés à la maintenance technique (chaudière, pompe à chaleur...)
FO-5	Modernisation du bâti	O-19	Modification de l'aspect esthétique extérieur (ravalement, réfection de toiture...)
		O-20	Protection contre l'intrusion et le vandalisme
		O-21	Réfection de l'installation électrique
FO-6	Responsabilité écologique	O-22	Recours aux matériaux d'isolation à faible impact environnemental
		O-23	Recours aux énergies renouvelables
FO-7	Augmentation de la surface habitable	O-24	Extension latérale
		O-25	Surélévation
		O-26	Véranda
FO-8	Mise en conformité avec les réglementations	O-27	Réglementation énergétique / Obtention de labels
		O-28	Acoustique
		O-29	Sanitaire
		O-30	Incendie

Tableau 26 – Contraintes externes les plus courantes

ID Famille	Famille de Contrainte	ID	Contraintes
FC-1	Maîtrise du budget	C-1	Enveloppe budgétaire raisonnable
FC-2	Maîtrise des délais & conditions de mise en œuvre	C-2	Temps de mise en œuvre raisonnable pour l'opération de rénovation
		C-3	Chercher à minimiser les travaux en site occupé

III.4.2.2 GC2 / Liste des indicateurs de performance considérés

En s'appuyant sur les pratiques courantes et les référentiels de performance déjà existants dans le monde de la construction et de la rénovation de bâtiments [53, 143], certains indicateurs se dégagent. Nous les avons présentés et modélisés dans le sous-modèle M3 à partir de la page 122. Le Tableau 17 les reprend de manière synthétique.

Tableau 27 – Indicateurs de performance et leurs échelles de notation

Cible	ID	Indicateurs	Échelles ordinales de notation				
			1	2	3	4	5
Énergie	I-1	Performance énergétique	très faible	faible	moyen	bonne	excellente
	I-2	Projet utilisant des énergies renouvelables ?	non	oui			
Économie	I-3	Coût initial	très onéreux	onéreux	moyen	Économique	très économique
	I-4	Coût de fonctionnement	très onéreux	onéreux	moyen	Économique	très économique
Environnement	I-5	Énergie grise	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
	I-6	consommation d'eau (non liée à l'usage)	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
	I-7	Déchets totaux	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
	I-8	Changement climatique	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
	I-9	Épuisement des ressources	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
Confort	I-10	Confort thermique (hiver)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	I-11	Confort thermique (estival)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	I-12	Confort acoustique (bruits aériens extérieurs)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	I-13	Confort acoustique (bruits intérieurs)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	I-14	Confort olfactif	faible	moyen	bon		
	I-15	Accès à l'éclairage naturel	diminué	non modifié	augmenté		
Impacts sociaux	I-16	Temps de mise en œuvre	très long	long	moyen	rapide	nul
	I-17	Intensité des travaux en site occupé	très forte	forte	moyen	faible	très faible
	I-18	Modification de l'aspect visuel extérieur	aucune	très légère	légère	importante	
	I-19	Modification de la surface habitable	réduite	non modifiée	agrandie		
Santé	I-20	Taux de renouvellement d'air	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	I-21	QAI (Particules, COx, NOx, COV)	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente
Sécurité	I-22	Sécurité incendie	faible	moyenne	bonne		
Qualité d'usage	I-23	Accessibilité	réduite	moyenne	améliorée		
	I-24	Protection contre l'intrusion	non modifiée	améliorée			
	I-25	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente

III.4.2.3 GC3 / Matrice d'influence experte

Comme mentionné dans la partie introductive, chaque projet de rénovation doit répondre à des enjeux spécifiques, correspondant aux préférences du décideur. Pour formaliser ces préférences sous la forme de valeurs-cibles et de poids sur des indicateurs de performance, nous commençons par construire une structure matricielle permettant de capitaliser l'analyse générique multicritère des experts que nous avons sollicités (architectes, bureaux d'études, économistes...). Comme proposé dans [109], nous utilisons un système de points d'influence pour quantifier les relations directes et indirectes, existantes entre chaque enjeu de rénovation et les différents indicateurs de performance présentés.

Une matrice d'influence vide, croisant chaque enjeu de rénovation listé en Tableau 25 et Tableau 26 (lignes) avec chaque indicateur de performance présenté en Tableau 27 (colonnes) a été mis à la disposition d'un groupe de spécialistes pour évaluer les corrélations possibles (sous la forme de points d'influence) entre les deux catégories⁵⁴. Chaque couple « enjeu / indicateur » (c'est-à-dire une cellule de la matrice) est évalué en donnant un score reflétant le niveau d'influence de la corrélation [109]. Quatre niveaux d'influence définissent l'échelle de scores :

- 0 Influence négligeable (0 point)
- 1 Influence faible mais existante (1 point)
- 2 Influence modérée (2 points)
- 3 Influence forte (3 points)

À chaque fois qu'un spécialiste du bâtiment estime qu'il existe une influence (positive ou négative) entre un enjeu et la grandeur conceptuelle associée à un indicateur de performance, il lui affecte un score – pioché parmi l'échelle de scores présentée ci-dessus – traduisant l'intensité de l'influence (Tableau 28). En plus de l'attribution de ce score, une explication textuelle ainsi que les sources bibliographiques utilisées sont à renseigner pour informer les autres spécialistes qui contribueront par la suite à la matrice, pourquoi ce niveau a été choisi. En outre, un spécialiste peut très bien ne remplir qu'un sous-ensemble de la matrice complète lorsque sa connaissance est limitée à un nombre restreint de cellules.

Dans le Tableau 28, un extrait de la matrice d'influence élaborée montre les scores d'influence attribués, par un Expert A, au couple « générateur de chaleur défectueux / confort acoustique intérieur ». Le schéma est répété pour chaque couple « enjeu / indicateur » avec différents experts.

⁵⁴ Ce type de matrice experte mettant en relation enjeux et indicateurs n'est pas propre à cette étude. L'aide à la détermination des cibles environnementales du référentiel HQE[®] s'opère de la même façon (site : <http://www.lesenr.fr/hqe/demarche-hqe/22-les-cibles-hqe.html?start=1>).

Tableau 28 – Extrait de la matrice d'influence générique

ENJEUX	CRITERES	Performance énergétique	Confort thermique (hiver)	Confort thermique (estival)	Confort acoustique (bruits intérieurs)	Facilité d'utilisation (et d'entretien)
	ID	I-1	I-10	I-11	I-13	I-25
Volets extérieurs cassés	O-8	1	2	3	0	2
Générateur de chaleur défectueux	O-9	3	3	0	2	3
Sensations de courants d'air	O-11	2	3	1	0	0
Surchauffes estivales	O-15	0	0	3	0	0

Explications:

L'emplacement et le choix de la technologie de génération de chaleur impactent modérément le confort acoustique intérieur (buits d'équipements, vibrations)

Références:

- Projet EPIQR, 1996
- Jugement personnel de l'Expert A

Pour fusionner les points d'influence capitalisés sur une même cellule par différents spécialistes, deux approches sont possibles :

Cas 1: si une cellule a été remplie par de nombreux experts (plus de 30 par exemple), un traitement statistique est appliqué : une valeur moyenne des points d'influence donnés peut être calculée pour mettre en évidence le niveau de corrélation le plus probable.

Cas 2: si une cellule n'a été remplie que par quelques experts, le traitement statistique n'est pas pertinent. Une approche consensuelle est préférable afin de lisser les vues subjectives et de gagner en consistance. Nous demandons alors aux spécialistes ayant renseigné la cellule de discuter ensemble et de partager leurs connaissances afin de proposer un niveau d'influence unique pour la matrice d'influence finale.

Dans la mise en œuvre de cette méthode, le second cas a été appliqué pour obtenir une version finale de la matrice d'influence. Ce choix repose sur le faible nombre de spécialistes disponibles pour remplir cette tâche. En outre, certaines colonnes, comme celles représentant les indicateurs environnementaux (I-5 à I-9) ne sont aujourd'hui pas suffisamment remplis pour être pleinement fonctionnels dans les autres étapes du sous-modèle. Pour ces raisons, la fiabilité et l'exhaustivité de la matrice d'influence actuelle demeurent discutables. Cependant le travail de recherche présenté se concentre sur la méthodologie et non sur les connaissances expertes embarquées.

Pour conclure, le remplissage de la matrice d'influence est exclusivement réservé à des spécialistes du bâtiment travaillant dans divers domaines (énergéticiens, acousticiens...) et n'est pas lié à un projet spécifique de rénovation. Cette tâche doit être finalisée avant de pouvoir utiliser toute la méthode d'aide à la formalisation des préférences du décideur sur n'importe quel projet spécifique de rénovation.

III.4.3 CP / Collecte des préférences du décideur

Cette étape est spécifique à chaque projet de rénovation traité. Cette deuxième partie du sous-modèle vise à recueillir les préférences du décideur, exprimées à partir de la liste d'enjeux de rénovation prédéfinis et d'un système de pondération. La première étape consiste à sélectionner les enjeux correspondant au mieux aux ambitions multiples du décideur pour son projet. La deuxième étape consiste à attribuer un poids relatif à chacun d'entre eux, afin d'obtenir une matrice d'influence spécifique dans les étapes suivantes.

Ci-après et jusqu'à l'obtention des sorties du sous-modèle – un PGP et un PPR – une étude de cas réel de rénovation est prise pour illustrer chaque étape de la méthode proposée.

III.4.3.1 CP1 / Sélection d'un sous-ensemble d'enjeux de rénovation

Le décideur doit choisir les enjeux de rénovation qui correspondent au mieux à ses besoins en termes de rénovation. Des enjeux multiples peuvent être sélectionnés parmi les listes prédéfinies en Tableau 25 et en Tableau 26. Pour notre cas d'application les enjeux retenus sont :

- O-8 : Volets extérieurs cassés
- O-11 : Sensations de courants d'air
- O-15 : Surchauffes estivales
- O-17 : Réduction des coûts annuels liés aux consommations énergétiques
- O-19 : Modification de l'aspect esthétique extérieur
- C-1 : Enveloppe budgétaire raisonnable

III.4.3.2 CP2 / Utilisation de la méthode de pondération AHP

L'importance relative des enjeux choisis reste subjective et doit être consciencieusement pesée pour répondre correctement aux attentes du décideur. Afin d'aider à la priorisation des enjeux sélectionnés, la méthode de pondération Analytic Hierarchy Process (AHP) est utilisée sur les familles d'objectifs et les familles de contraintes d'enjeux sélectionnés. L'ensemble du processus de pondération AHP est présenté en détail dans l'Annexe D. L'idée principale de ce processus de pondération est que le décideur donne sa préférence en comparant 2 à 2 tous les enjeux qu'il a retenu. En appliquant cette méthode, nous obtenons des poids relatifs sur chacun des enjeux sélectionnés⁵⁵. Les poids des enjeux non sélectionnés sont quant à eux mis arbitrairement à 0.

En appliquant ce processus ici, nous obtenons les poids relatifs suivants :

- $w(C-1 : \text{Enveloppe budgétaire raisonnable}) = 0.388$
- $w(O-11 : \text{Sensations de courants d'air}) = 0.294$
- $w(O-15 : \text{Surchauffes estivales}) = 0.294$
- $w(O-8 : \text{Volets extérieurs cassés}) = 0.149$
- $w(O-17 : \text{Réduction des coûts annuels liés aux consommations énergétiques}) = 0.115$
- $w(O-19 : \text{Modification de l'aspect esthétique extérieur}) = 0.055$
- tous les autres poids, d'enjeux non sélectionnés, valent 0

N'importe quelle autre méthode de pondération pourrait être utilisée pour établir l'importance relative des enjeux sélectionnés. Néanmoins nous proposons de suivre celle appelée AHP car elle ne se limite pas à hiérarchiser les enjeux à pondérer ; elle permet, grâce au principe de comparaison par paire, de quantifier l'importance relative entre chaque enjeu.

⁵⁵ Un même poids est attribué à chaque enjeu sélectionné parmi une même famille d'objectifs ou de contraintes.

III.4.4 PC / Processus calculatoire

Cette dernière partie de ce sous-modèle permet de fusionner l'analyse pluridisciplinaire capitalisée dans la matrice d'influence générique (§III.4.2) et les poids relatifs sur les enjeux calculés à partir des préférences du décideur (§III.4.3) pour obtenir deux profils : le Profil Global de Performance (PGP) et le Profil de Poids Relatifs (PPR) du projet de rénovation traité.

III.4.4.1 PC1 / Matrice d'influence pondérée

Une fois un poids relatif calculé pour chaque enjeu listé, nous générons une matrice d'influence spécifiquement dédiée à ce projet de rénovation. Pour ce faire, nous multiplions chaque score d'influence de la matrice d'influence générique finale avec les poids (un par ligne) précédemment calculés pour chaque enjeu. Un extrait de cette nouvelle matrice est illustré dans le Tableau 29.

Tableau 29 – Extrait de la matrice d'influence pondérée (cas d'application)

ENJEUX	CRITERES	Performance énergétique	Confort thermique (hiver)	Confort thermique (estival)	Confort acoustique (bruits intérieurs)	Facilité d'utilisation (et d'entretien)
	ID	I-1	I-10	I-11	I-13	I-25
Volets extérieurs cassés	O-8	0,224 (=0,149 *1,5)	0,298 (=0,149 *2)	0,447 (=0,149 *3)	0 (=0,149 *0)	0,298 (=0,149 *2)
Générateur de chaleur défectueux	O-9	0 (=0 *3)	0 (=0 *3)	0 (=0 *0)	0 (=0 *2)	0 (=0 *2,5)
Sensations de courants d'air	O-11	0,588 (=0,294 *2)	0,882 (=0,294 *3)	0,147 (=0,294 *0,5)	0,147 (=0,294 *0,5)	0 (=0,294 *0)
Surchauffes estivales	O-15	0 (=0,294 *0)	0 (=0,294 *0)	0,882 (=0,294 *3)	0 (=0,294 *0)	0 (=0,294 *0)

III.4.4.2 PC2 / Calcul des scores pondérés totaux pour chaque indicateur

En sommant les scores pondérés calculés sur chaque colonne de la matrice d'influence pondérée (Tableau 29), nous obtenons un score pondéré total SW_i pour chaque indicateur de performance i .

III.4.4.3 PC3 / Conversion en Profil de Poids Relatif (PPR) sur les indicateurs

Une fois les SW_i obtenus, le Profil de Poids Relatifs (PPR) est calculé de la manière suivante, avec $PPR(i)$ le poids relative de l'indicateur i et $\sum_i(SW_i)$ la somme des SW_i :

$$PPR(i) = \frac{SW_i}{\sum_i(SW_i)} \quad \text{Éq. 5}$$

Le profil PPR peut alors être utilisé comme une entrée dans les méthodes d'optimisation multicritères ou les méthodes d'aide à la décision multicritère.

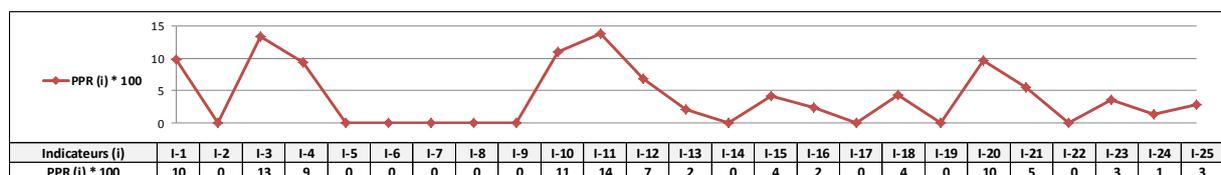


Figure 36 – PPR (cas d'application)

Pour un décideur qui souhaite obtenir uniquement des poids relatifs pour pondérer les indicateurs, il peut directement passer à la sous partie PC6 car les suivantes, PC4 et PC5, sont dédiées à la construction du PGP.

III.4.4.4 PC4 / Conversion en Profil Global de Performance (PGP) normalisé

Nous normalisons les SW_i , obtenus à l'étape PC2, sur une échelle de valeurs allant de 0 à 100. Cette étape est requise pour manipuler les SW_i sur une même échelle de valeurs.

$$PGP_{norm}(i) = 100 * \frac{SW_i - \min(SW_i)}{\max(SW_i) - \min(SW_i)} \quad \text{Éq. 6}$$

De cette façon, pour chaque indicateur de performance i , nous obtenons une valeur normalisée appelée $PGP_{norm}(i)$. Plus cette valeur est proche de 100, plus l'indicateur de performance i est jugé comme important au regard des enjeux précédemment sélectionnés puis pondérés.

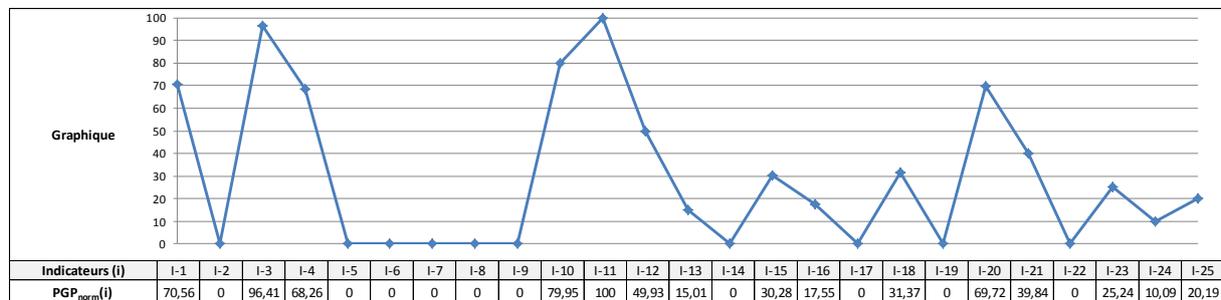


Figure 37 – PGP normalisé (cas d'application)

Dans la Figure 37, nous observons clairement que, pour cet exemple pratique, l'association de la matrice d'influence générique et les poids calculés sur les enjeux sélectionnés, se traduit par la nécessité d'obtenir de hauts niveaux de performance sur les indicateurs I-3, I-10 et I-11 (respectivement le *coût d'investissement*, le *confort thermique (hiver)* et le *confort thermique (estival)*). Ces indicateurs, avec les plus hautes valeurs calculées, correspondent trivialement aux enjeux choisis au premier coup d'œil. Mais d'autres informations non négligeables se dégagent : la nécessité d'obtenir également des niveaux de performances suffisamment élevés sur des indicateurs comme :

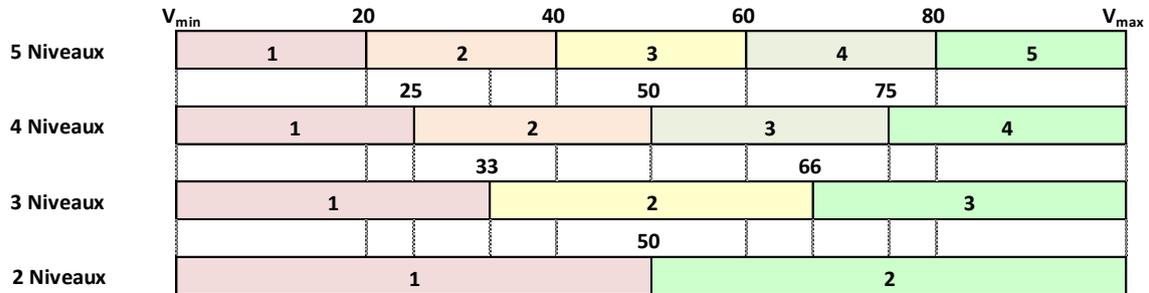
- I- 1 : Performance énergétique ;
- I- 4 : Coûts annuels d'exploitation ;
- I- 10 : Confort thermique (hiver) ;
- I- 20 : Taux de renouvellement d'air.

Ces informations supplémentaires peuvent-être utiles pour les personnes qui n'ont pas pu penser que les enjeux retenus pourraient avoir une influence sur d'autres aspects de la performance que ceux précédemment cités (I-3, I-10 et I-11). Elles représentent les effets collatéraux non négligeables associés à l'attente des enjeux sélectionnés et sont déduites de l'expertise capitalisée dans la matrice d'influence.

III.4.4.5 PC5 / Transposition du PGP normalisé en profil de niveaux-cibles

Chaque indicateur dispose d'une échelle de niveaux de performance qui lui est propre pour évaluer une situation. Comme illustrée dans le Tableau 27, nous utilisons des échelles de valeurs ordinales possédant un nombre de niveaux allant de 2 à 5. La conversion d'une valeur de $PGP_{norm}(i)$, comprise entre 0 et 100, en un niveau-cible de performance équivalente est fait de la manière suivante en utilisant la Figure 38. Si l'échelle de performance d'un indicateur possède 5 niveaux, nous attribuons le niveau le plus bas de

l'échelle pour une valeur de $PGP_{norm}(i)$ comprise entre 0 et 19, le second niveau le plus bas pour une valeur entre 20 et 39, et ainsi de suite jusqu'au niveau le plus performant (état n°5) pour une valeur comprise entre 80 et 100. Si l'échelle ne dispose que de 4 niveaux, l'intervalle de valeurs permettant de passer d'un niveau au niveau supérieur est de 25 ; 33 pour une échelle possédant 3 niveaux et 50 pour une échelle de performance comprenant seulement 2 niveaux.



Sens des performances : V_{min} = valeur la moins performante ; V_{max} = valeur la plus performante

Figure 38 – Équivalences de notation entre $PGP_{norm}(i)$ et les échelles d'évaluation de chaque indicateur en fonction de leur nombre de niveaux de performance

Par exemple, en utilisant l'échelle de conversion de la Figure 39, la conversion du score normalisé de l'indicateur *Taux de renouvellement d'air* ($PGP_{norm}(I-20) = 70$) en un des niveaux de performance décrits pour cet indicateur (5 niveaux possibles sont proposés dans le Tableau 27) nous donne un niveau numérique de « 4 » qui est associé au label « Bon ». Ce niveau représente le niveau-cible de performance à atteindre pour satisfaire, a priori, le décideur ($PGP_{initial}$). Tous les niveaux de performance supérieurs à ce dernier sont considérés comme une performance acceptable mais superflue ; tous les niveaux inférieurs à ce dernier sont considérés comme une performance non-acceptable (c.-à-d. des performances insuffisantes).

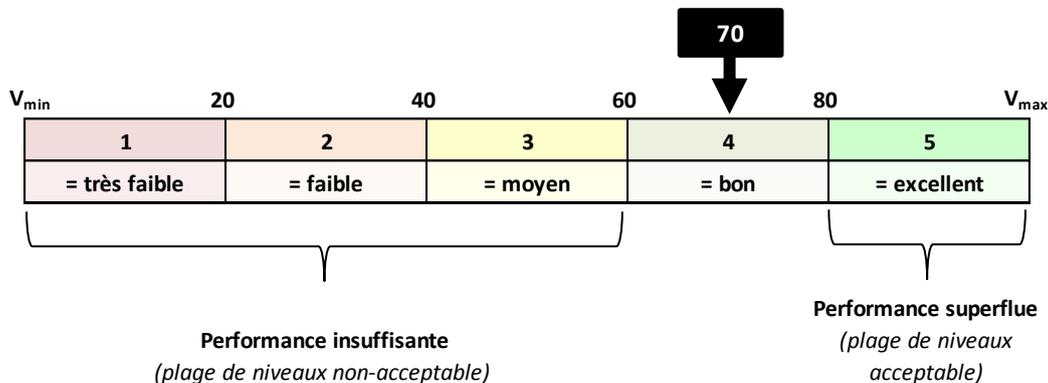


Figure 39 – Conversion d'une valeur $PGP_{norm}(i)$ en niveau-cible $PGP_{initial}(i)$

En appliquant ce processus de conversion à toutes les valeurs du PGP_{norm} , nous obtenons la Figure 40. Les niveaux de performance sur fond bleu sont les niveaux-cibles à atteindre sur les indicateurs de performance pour satisfaire le décideur (appelées également $PGP_{initial}(i)$) ; les plages de niveaux sur fond orange sont les plages de valeurs non-acceptables ; les plages de niveaux sur fond vert sont les plages de valeurs acceptables.

Cependant, avant de pouvoir être utilisé comme profil de valeur-cibles dans n'importe quelle méthode d'optimisation multicritère ou d'aide à la décision multicritère, ce $PGP_{initial}$ doit être corrigé par quelques valeurs garde-fous spécifiques au domaine de la rénovation de bâtiment. Nous allons aborder ce point dans la section suivante.

Niveaux-cibles équivalents	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	5	5	4	3	5	5	3	3	2	5	
	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	2	4	
	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	1	3	
	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Indicateurs (i)	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	I-9	I-10	I-11	I-12	I-13	I-14	I-15	I-16	I-17	I-18	I-19	I-20	I-21	I-22	I-23	I-24	I-25

Figure 40 – Niveaux-cibles de performance (en bleu) équivalents aux valeurs du PGP normalisé (cas d'application)

III.4.4.6 PC6/ Correction du PGP et du PPR avec certaines valeurs garde-fous

Correction du PGP

À ce stade, l'établissement automatique du PGP à partir des étapes précédentes du sous-modèle présenté, peut, pour certains indicateurs, proposer un niveau-cible inférieur à celui tolérable pour un outil de prescription d'amélioration de la performance générale et énergétique de bâtiments. En effet, dans un souci de santé des occupants et de pérennité du bâti à rénover, des niveaux-minimums de performance doivent être atteints sur certains indicateurs. Ces niveaux sont les mêmes pour tous les projets de rénovation et sont attribués une fois pour toute par un jury de spécialistes de la rénovation. 9 indicateurs sont impactés par un niveau de performance minimal (Tableau 30).

Tableau 30 – Niveaux minimums de performance exigée sur certains indicateurs

ID	Nom	Niveau minimum exigé
I-1	Performance énergétique	4 (= bonne)
I-10	Confort thermique (hiver)	3 (= moyen)
I-11	Confort thermique (estival)	2 (= faible)
I-12	Confort acoustique (bruits aériens extérieurs)	2 (= faible)
I-13	Confort acoustique (bruits intérieurs)	3 (= moyen)
I-14	Confort olfactif	2 (= moyen)
I-20	Taux de renouvellement d'air	3 (= moyen)
I-21	QAI (Particules, COx, NOx, COV)	3 (= moyenne)
I-22	Sécurité incendie	2 (= moyenne)

Pour intégrer ces niveaux-minimum de performance exigée sur certains indicateurs, nous calculons un nouveau PGP par l'équation suivante et repris dans la Figure 41 :

$$PGP_{corrigé}(i) = \max[PGP_{initial}(i) ; PGP_{valeurs-seuils}(i)] \quad \text{Éq. 7}$$

Niveaux-cibles équivalents + Niveaux-minimums exigés	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	5	5	4	3	5	5	3	3	2	5	
	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	2	4	
	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	1	3	
	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Indicateurs (i)	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	I-9	I-10	I-11	I-12	I-13	I-14	I-15	I-16	I-17	I-18	I-19	I-20	I-21	I-22	I-23	I-24	I-25

Figure 41 – PGP corrigé en bleu (cas d'application)

La même approche corrective peut être suivie en intégrant les performances multicritères de la situation avant rénovation d'une opération. Ainsi, le PGP corrigé permettrait au tandem décideur/professionnel de rechercher des solutions d'améliorations énergétiques qui ne

dégradent pas les performances initiales d'un bâtiment à rénover. Dans le cadre de cette méthode d'aide à la formalisation des préférences, nous préférons ne pas imposer cette action mais laissons l'opportunité au décideur de la suivre.

Correction du PPR

Au niveau du PPR, il convient également de réviser les poids affectés aux indicateurs ayant des niveaux minimums exigés. Cela est nécessaire pour mettre en évidence l'importance relative de ces aspects non-négociables, même si ils ne sont pas déterminants pour un décideur. En effet, si le $PPR(i)$ initial d'un indicateur obtient un poids valant 0 et que l'on lui impose une valeur-cible minimale à respecter en tant que PGP, il convient de réviser également ce poids initial afin de lui donner une importance relative non-nulle. La difficulté est alors de déterminer une valeur de poids qui ne soit pas trop élevée afin de ne pas trop effacer les préférences initiales du décideur, et pas trop bas pour que l'indicateur ait une influence non-négligeable lors de son utilisation dans des méthodes d'analyses multicritères dans les sous-modèles M5 et M6.

Nous choisissons, de manière arbitraire, d'attribuer à ces indicateurs possédant une valeur-minimale à respecter pour le PGP, un nouveau poids déterminé comme le maximum entre leur poids initial et la médiane des valeurs du PPR initial. Nous reprenons cette exigence sous la forme de la fonction suivante.

$$PPR_{\text{corrigé}}(i) = \text{MAX}[PPR(i); \text{MÉDIANE}(PPR)],$$

pour $\forall i \in [1; 10; 11; 12; 13; 14; 20; 21; 22]$

Éq. 8

Avec

- $PPR(i)$: la valeur initiale du poids calculé pour l'indicateur i dans la sous-partie PC3
- $\text{MÉDIANE}(PPR)$: la médiane des valeurs non nulles du PPR initial (comprenant tous les indicateurs possédant une valeur PPR(i) différente de 0)

III.4.5 Utilisations du PPR corrigé et du PGP corrigé

Dans le cadre de notre démarche d'aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, les sorties calculées par le sous-modèle M4 dédié à la formalisation des préférences du décideur nous servent à de nombreuses tâches présentées ci-après.

Utilisations du PGP

Sous réserve de quelques transformations, le PGP nous permet de réaliser deux types d'actions :

- 1) Les niveaux-cibles du $PGP_{\text{corrigé}}$ sont utilisés comme des contraintes performantielles à appliquer successivement dans le modèle d'inférence du sous-modèle M5, pour rechercher les assemblages de familles de procédés permettant de satisfaire au mieux le décideur (i.e. optimisation multicritère) ; pour cela, les indicateurs de performance sont classés par ordre décroissant de valeurs de $PPR_{\text{corrigé}}$ (§III.5.3).
- 2) Le PGP, au travers de l'utilisation de la méthode ELECTRE TRI dans le sous-modèle M6, nous permet de construire une alternative de référence utilisée comme filtre sur les alternatives potentielles de rénovation à retenir pour dérouler la méthode ELECTRE III (§III.6).

Utilisation du PPR

Indispensable aux méthodes d'aide à la décision multicritère, le PPR joue le rôle de profil de poids relatifs sur les indicateurs de performance intervenant comme critères de décision dans l'application des méthodes ELECTRE TRI et ELECTRE III du sous-modèle M6 (§III.6).

III.4.6 Analyses de sensibilité : influences du choix et de la pondération des enjeux

Des analyses de sensibilités ont été menées pour déterminer l'influence de la sélection de différents jeux d'enjeux parmi les listes prédéfinies (Tableau 25 et Tableau 26) ainsi que l'influence des poids calculés pour ces mêmes enjeux avec la méthode de pondération AHP sur la génération des profils $PGP_{\text{corrigé}}$ et $PPR_{\text{corrigé}}$. Ces analyses, propres à ce sous-modèle, ont données lieu à une publication [144].

- *Influences de la sélection de jeux d'enjeux différents :*

L'étude menée montre que la sélection de différents jeux d'enjeux à l'étape CP1 de ce sous-modèle se traduit par la génération de $PGP_{\text{corrigé}}$ et $PPR_{\text{corrigé}}$ différents. Ce système de formalisation des préférences tient donc bien compte des enjeux sélectionnés et propose en sortie, des profils spécifiques, répondant aux attentes des utilisateurs.

- *Influences de la pondération des enjeux sélectionnés :*

Pour un même jeu d'enjeux sélectionnés, différentes pondérations (étape CP2), via la méthode AHP, ont été testées. Les $PGP_{\text{corrigé}}$ et $PPR_{\text{corrigé}}$ obtenus en sorties du sous-modèle sont similaires mais montrent bien des variations d'amplitude sur les valeurs calculées de poids et de niveaux-cibles des indicateurs de performance. La priorisation des enjeux à travers les poids calculés à l'étape CP2 de la méthode a donc bien une influence sur la détermination des profils de préférences $PGP_{\text{corrigé}}$ et $PPR_{\text{corrigé}}$.

En conclusion, la méthode proposée s'adapte bien aux enjeux sélectionnés et aux différentes priorisation de ces derniers ; le tout en obtenant des profils de valeurs de PGP et PPR cohérents. Pour plus de détails, nous renverrons le lecteur vers l'article suivant [144].

III.4.7 Discussions autour de l'utilité et de la marge d'amélioration du sous-modèle

Le sous-modèle présenté peut être ignoré dans la méthode globale d'aide à la décision développée. En effet, le tandem décideur/professionnel peut directement définir les niveaux de performance qu'ils souhaitent atteindre (un profil équivalent au PGP calculé) et le profil de poids relatifs attaché aux indicateurs de performance manipulés (équivalent au PPR). Cependant, ils se priveraient de l'expertise multicritère capitalisée par un panel d'experts au travers de la matrice d'influence.

Le sous-modèle d'aide à la formalisation des préférences du décideur permet de calculer les entrées nécessaires au déploiement des sous-modèles d'élaboration automatisée d'alternatives de rénovation et de classement multicritère (sous-modèles M5 et M6 décrits plus loin dans ce mémoire). L'originalité de la démarche provient de l'utilisation d'une matrice d'influence croisant enjeux de rénovation les plus courant avec les indicateurs de performance manipulés pour aider à la définition de Profil Global de Performance (PGP) à atteindre pour réussir la rénovation et le calcul d'un Profil de Poids Relatifs (PPR) pour permettre l'utilisation de méthode de classement multicritère. La contribution experte capitalisée aujourd'hui reste un peu faible pour garantir des sorties cohérentes, mais le socle méthodologique est là et a correctement fonctionné sur les cas d'études testés.

III.5 M5 : Évaluation multicritère et optimisation sous contraintes des scénarios de rénovation

Pour rappel, nous recherchons dans cette partie du mémoire, un modèle d'inférence permettant, à partir de connaissances métiers (génériques, hétérogènes et incertaines) capitalisées et formalisées (sous la forme de relations causales), de raisonner dans l'incertain et d'assurer par ce moyen des fonctions d'aide à l'évaluation multicritère, d'aide au diagnostic et d'aide à la prescription de solutions d'amélioration énergétique.

La technologie des réseaux bayésiens a été retenue pour sa capacité à assurer chacune de ces fonctions. Ce sous-chapitre commence par présenter en détail les avantages de cette technologie, puis nous expliquons la structuration du *modèle graphique probabilisé* construit à partir des connaissances métiers capitalisées dans le sous-modèle M2 et du système d'évaluation des performances multicritère décrit dans le sous-modèle M3, pour finir avec les différents modes d'utilisation du réseau bayésien nouvellement construit (optimisation multicritère, évaluation multicritère).

III.5.1 Choix des réseaux bayésiens

Leurs atouts sont multiples, nous allons voir ceux qui nous intéressent dans une optique de modélisation des règles métiers pouvant être inclus au processus d'élaboration et d'évaluation multicritère d'une opération de rénovation de logements.

- **Une représentation graphique**

Tout comme les diagrammes cognitifs, les réseaux bayésiens sont intuitifs car ils sont construits sous la forme de graphes causaux (§VI.2.3 de l'état de l'art). Des nœuds représentant des variables ayant au moins deux états et reliés entre eux par des flèches représentant des relations causales (relations de dépendance). Enfin la quantification des relations causales est exprimée sous la forme de *tables de probabilités jointes* que nous aborderons ci-après.

Nous utilisons la Figure 42 comme fil conducteur dans ce sous-chapitre, pour illustrer le fonctionnement et l'intérêt du recours aux réseaux bayésiens. Par l'analyse rapide de cette Figure, nous comprenons directement que la structure causale modélisée représente les conditions à réunir pour s'assurer de la possibilité de mise en œuvre d'un CESI (Chauffe-Eau Solaire Individuel) pour un bâtiment d'habitation. Le problème est composé de 7 variables ayant chacun entre 2 et 4 états (masques solaires, inclinaison et orientation de la toiture, conditions solaires, proximité d'un patrimoine classé, disponibilité d'un local technique, possibilité de mise en œuvre d'un CESI). Par les flèches, nous déduisons que la *condition solaire* dépend de la présence de *masques solaires* et de la *géométrie de la toiture* ; que la possibilité de mise en œuvre du CESI dépend à son tour de trois variables parentes : la proximité d'un patrimoine classé, la condition solaire et de la présence d'un local technique disponible.

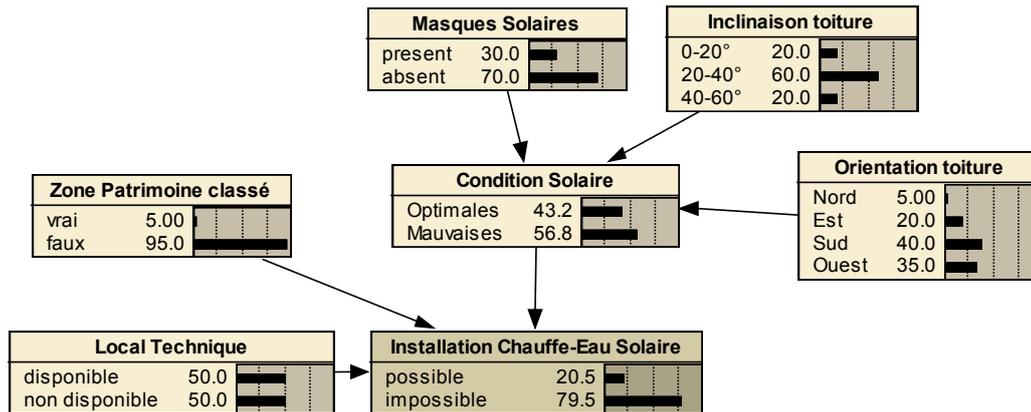


Figure 42 – Système de règles techniques et réglementaires conditionnant la possibilité de mettre en œuvre un Chauffe-Eau Solaire Individuel

▪ Une probabilisation de la connaissance modélisée

La connaissance formalisée dans un réseau bayésien est probabilisée pour permettre la prise en compte des incertitudes, autant au niveau des variables (sous la forme de distributions de probabilités) que sur les relations de dépendances conditionnelles (sous la forme de tables de probabilités jointes). L'incertitude récupérée sur la ou les variables d'intérêt pour l'utilisateur du réseau, aura également la forme de distributions de probabilités. Voyons maintenant plus en détail les notions de *probabilités marginales* et *probabilités jointes* qui assurent la partie quantitative et probabiliste des réseaux bayésiens sous la forme de tables relationnelles.

Tables de probabilités marginales

Ce sont les distributions de probabilités des nœuds n'ayant aucun *parent* (c'est-à-dire que les probabilités associées à leurs états ne sont pas conditionnées par d'autres variables). Lors de la construction du réseau, des lois de distribution de probabilités – sur les états des nœuds sans parents – sont définies, a priori, pour illustrer l'incertitude associée aux variables modélisées. Elles sont appelées lois de probabilités marginales. La forme donnée aux lois de probabilités marginales (normales, gaussiennes, etc.) est souvent calquée sur la loi statistique illustrant le mieux la représentativité des états de la variable modélisée (par exemple une loi uniforme pour les 6 faces, une par état, d'une variable modélisant le tirage d'un dé non pipé).

Dans la Figure 42, des probabilités marginales régissent les nœuds « *masques solaires* », « *inclinaison toiture* », « *orientation toiture* », « *zone patrimoine classé* » et « *local technique* ». Chaque loi marginale représente la répartition jugée la plus représentative des états de chaque variable (la source peut être un échantillon statistique ou le jugement d'un expert).

Table de probabilités jointes

Appelées également *Tables de Probabilités Conditionnelles* (TPC), elles sont la représentation quantitative des lois codifiant la dépendance fonctionnelle d'une variable par rapport à ses variables parentes. Ces tables, représentant les relations conditionnelles, peuvent être exclusives (booléennes), empreintes d'incertitudes (distributions de probabilités) ou mixtes selon les combinaisons des états parents.

Par exemple, la TPC « mixte » illustrée en Tableau 31, nous donne la loi de probabilité $p(\text{condition solaire} \mid \text{Masques solaire, inclinaison toiture, orientation toiture})$ du nœud « *Condition Solaire* » de la Figure 42. Cette table représente ainsi les probabilités des états du nœud Condition Solaire pour chacune des 24 combinaisons possibles d'états. Dans le Tableau 31, les 12 premières combinaisons d'états sont des relations

booléennes strictes : le nœud « *Condition Solaire* » prend avec une probabilité égale à 1, soit l'état « *Optimale* » soit l'état « *Mauvaise* ». Pour les 12 combinaisons suivantes, l'expert qui a codifié cette TPC a nuancé son jugement en utilisant des probabilités. Dans les deux cas, la somme des probabilités sur les états du nœud dépendant doit toujours faire 1.

Tableau 31 – TPC du nœud « Condition Solaire » de la Figure 42

Variables parentes			Condition Solaire	
<i>Masques Solaire</i>	<i>Inclinaison Toiture</i>	<i>Orientation Toiture</i>	<i>P(Optimale)</i>	<i>P(Mauvaise)</i>
présent	plat	Nord	0	1
présent	plat	Est	0	1
présent	plat	Sud	0	1
présent	plat	Ouest	0	1
présent	bon	Nord	0	1
présent	bon	Est	0	1
présent	bon	Sud	0	1
présent	bon	Ouest	0	1
présent	pentu	Nord	0	1
présent	pentu	Est	0	1
présent	pentu	Sud	0	1
présent	pentu	Ouest	0	1
absent	plat	Nord	0,05	0,95
absent	plat	Est	0,1	0,9
absent	plat	Sud	0,6	0,4
absent	plat	Ouest	0,55	0,45
absent	bon	Nord	0	1
absent	bon	Est	0,3	0,7
absent	bon	Sud	1	0
absent	bon	Ouest	0,95	0,05
absent	pentu	Nord	0	1
absent	pentu	Est	0,05	0,95
absent	pentu	Sud	0,25	0,75
absent	pentu	Ouest	0,4	0,6

▪ **Factorisation des lois de probabilités**

Une des forces des réseaux bayésiens est l'utilisation de Tables de Probabilités Conditionnelles permettant de construire et d'utiliser des modèles d'inférence en ne stockant en mémoire que les relations de causalités directes (distributions de probabilités jointes).

Par exemple, en prenant le cas d'illustration de la Figure 42, si nous souhaitons calculer automatiquement les probabilités des états du nœud « *Installation CESI* » en fonction des valeurs des 5 variables observables sur site (i.e. les nœuds « *masques solaires* », « *inclinaison de la toiture* », « *orientation de la toiture* », « *proximité de patrimoine classé* » et « *disponibilité d'un local technique* »), sans l'utilisation de probabilités conditionnelles, il nous faut stocker en mémoire les $2*2*2*3*4=96$ combinaisons d'états de ces observations. En prenant le même problème et en utilisant la structure

bayésienne présentée, seules $24+8=32$ combinaisons d'états des 2 TPC du réseau bayésien sont à stocker. L'utilisation des réseaux bayésiens a permis, pour ce problème simple, de diminuer d'un facteur 3 le stockage en mémoire du modèle.

▪ **Un modèle unique pour deux usages : générer et évaluer des alternatives de rénovation**

L'inférence par chaînage mixte⁵⁶ permis par la technologie des réseaux bayésiens, autorise deux types d'application déterminante dans le contexte de la modélisation d'un outil d'aide à la décision pour la prescription de travaux d'amélioration énergétique des logements : l'évaluation multicritère de combinaisons de procédés techniques (i.e. les alternatives de rénovation) et surtout la recherche d'alternatives permettant d'approcher au mieux, un profil de valeurs-cibles sur les différents indicateurs de performance modélisé (*optimisation multicritère par contraintes successives*).

Les sections suivantes décrivent la modélisation de la structure bayésienne propre à notre cas d'étude, puis présentent leur utilisation possible via un exemple didactique.

III.5.2 Structuration du modèle

Le modèle développé dans le cadre de ces travaux de thèse, raisonne aux niveaux des familles de procédés (voir le sous-modèle M1 traitant de la décomposition fonctionnelle du bâti en page 107).

Dans ce sous-chapitre, nous allons décrire la transposition des règles expertes décrites précédemment dans le sous-modèle M2 dans une structure graphique causale pouvant être appelée par n'importe quel algorithme d'inférence bayésienne.

III.5.2.1 Une structure graphique en trois strates

L'ensemble de la décomposition fonctionnelle du bâti sur les niveaux « Approches Fonctionnelles » et « Familles de Procédés », des règles expertes décrites dans le sous-modèle M2 et des fonctions d'impacts décrites dans le sous-modèle M3 sont réunis dans une structure bayésienne (Figure 43). Les nœuds et leurs états représentent les notions modélisées ; les flèches représentent les règles expertes. Chaque type d'élément modélisé est décrit ci-après.

Les nœuds modélisés

Cinq types de nœuds sont représentés dans la structure bayésienne qui sert de socle à notre outil d'aide à la prescription et l'évaluation des alternatives de rénovation (Figure 43) :

- Caractéristiques Techniques (CT) : ils représentent les conditions nécessaires au déclenchement des règles expertes de types « contraintes techniques », « contraintes réglementaires ou urbanistiques » et « opportunités de couplage » ;
→ 15 nœuds
- Approches Fonctionnelles (AF) : Chaque nœud « Approche Fonctionnelle » a pour états les différentes « Familles de Procédés » (voir page 107) qui lui appartient ;
→ 11 nœuds

⁵⁶ Voir la section de l'état de l'art traitant des modes d'inférence de la connaissance : chaînage avant, arrière et mixte dans les méthodes de modélisation de connaissance (page 43).

- Spécificités Techniques (ST) : ils représentent les aspects architecturaux ou techniques des bâtis existants qui ont une influence sur au moins un indicateur de performance modélisé ;
→ 5 nœuds
- Indicateurs de Performance (IP) : ils représentent les indicateurs de performance modélisés. Chacun de leur état correspond à un niveau de performance sur des échelles ordinales discrétisées ;
→ 25 nœuds
- Indicateurs de Risques (IR) : ils représentent les indicateurs de risques potentiels modélisés. Chacun de leur état correspond à un niveau de performance sur des échelles ordinales discrétisées.
→ 4 nœuds

Les relations causales

Les relations causales, présentées sous la forme de flèches entre deux nœuds, matérialisent les règles expertes (décrites en page 113).

Entre les strates « Caractéristiques Techniques (CT) » (première ligne sur la Figure 43) et « Approches Fonctionnelles (AF) » (seconde ligne sur la Figure 43) nous retrouvons les règles expertes de types :

- Contraintes Techniques ;
→ 14 flèches
- Contraintes Réglementaires/Urbanistiques ;
→ 5 flèches
- Opportunités de Couplage.
→ 3 flèches

Entre les strates « Approches Fonctionnelles (AF) + Spécificités Techniques (ST) » (seconde ligne sur la Figure 43) et « Indicateurs de Performance (IP) + Indicateurs de Risques (IR) » (troisième ligne sur la Figure 43) nous retrouvons les règles expertes de types :

- Fonctions d'Impacts ;
→ 180 flèches
- Combinaisons à Risques.
→ 14 flèches

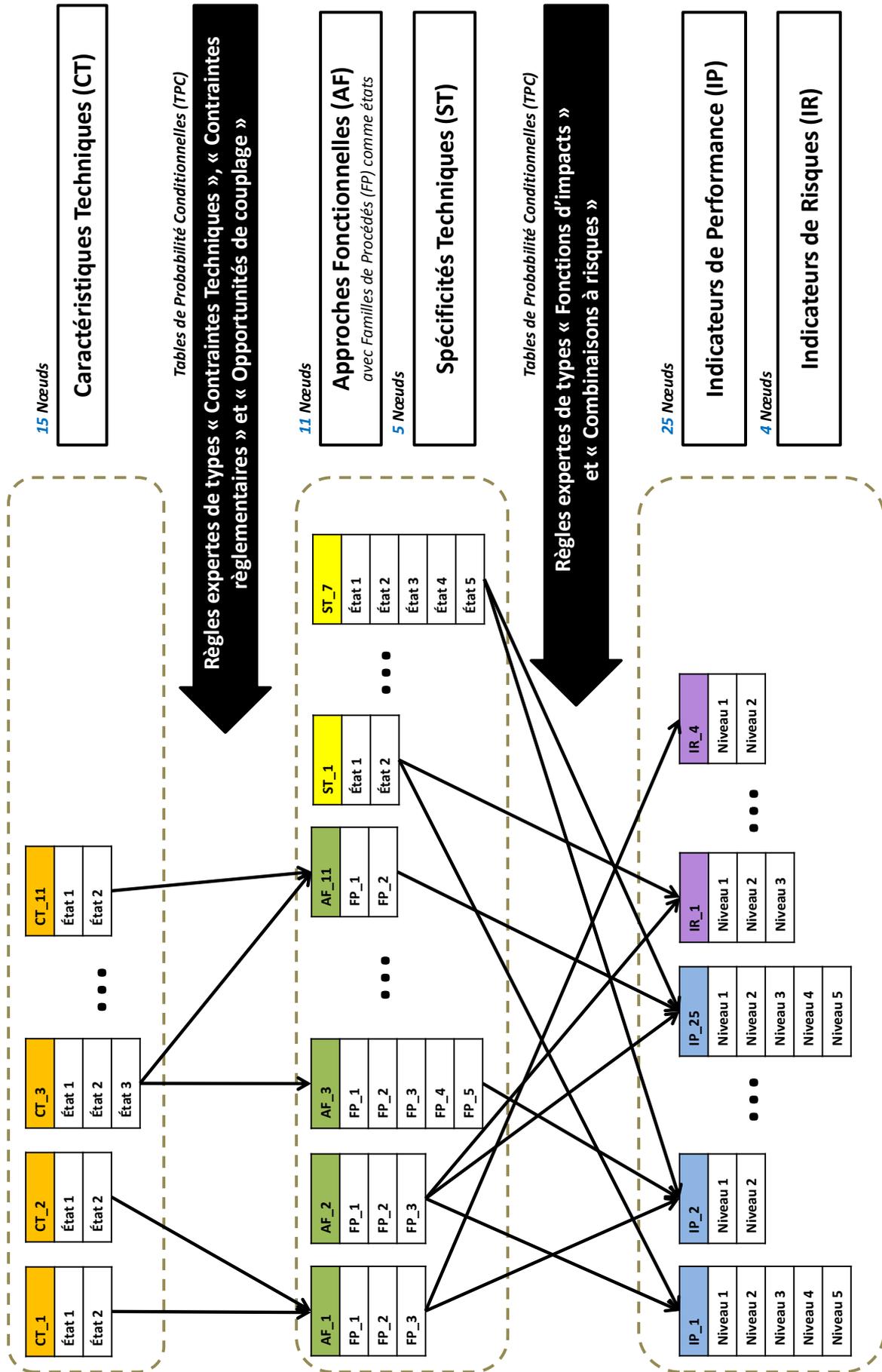


Figure 43 – Structure de notre modèle de réseaux bayésiens

III.5.2.2 Quantification probabiliste des relations entre les nœuds modélisés

Comme nous l'avons abordé en page 163, la quantification probabiliste dans un réseau bayésien se fait par déclaration de tables de probabilités marginales pour les nœuds sans parents, et par déclaration de tables de probabilités conditionnelles pour les autres nœuds.

Tables de Probabilités Marginales (TPM)

Les TPM dans la structure bayésienne, sont à définir pour les nœuds de types CT et ST, ainsi que certain nœud AF sans nœud-parent (c.-à-d. sans contraintes de mises en œuvre). En l'absence de connaissances spécifiques à un cas d'étude, une distribution de probabilité – sur les états qui le caractérisent – qui représente sa TPM doit être associée à chacun de ces nœuds. Les études typologiques sur le segment de parc visé (maisons individuelles de la période 1945-1974) permettent alors parfois, lorsqu'un échantillon statistique est suffisamment représentatif, de proposer une distribution de probabilité de qualité. Lorsque cela n'est pas le cas, deux possibilités s'offrent alors aux concepteurs du réseau bayésien : (1) proposer une TPM à partir de dires d'experts ; (2) utiliser des lois probabilistes de type uniformes, normales ou gaussiennes.

Type de toiture (typologie)	
Combles perdus	55.0
Combles aménagés	40.0
Toiture terrasse	5.00
0.5 ± 0.59	

Figure 44 – TPM d'un nœud de type CT proposée par dires d'expertes

Travaux en site occupé	
Tolerables	50.0
Non souhaitées	50.0
0.5 ± 0.5	

Figure 45 – TPM d'un nœud de type CT modélisée par une loi uniforme

Dans tous les cas, la somme des probabilités des états sur un nœud doit faire 1. En d'autres termes, pour une variable X_i n'ayant pas de variables parentes, l'égalité suivante doit être vérifiée.

$$\forall x_i \in \mathcal{D}_{X_i}, \sum_{x_i} P(x_i) = 1 \quad \text{Éq. 9}$$

Dans les Figure 44 et Figure 45 nous proposons des exemples de TPM sur deux nœuds de types CT. Ces distributions de probabilités, bien que génériques, correspondent au périmètre de la maison individuelle. Si nous souhaitions transposer la méthodologie développée à des immeubles collectifs, il serait aisé de redéfinir ces TPM pour qu'elles collent mieux à ce nouveau périmètre.

Tables de Probabilités Conditionnelles (TPC)

Ici, une grosse part du travail a déjà été réalisée. Les modélisations des règles expertes présentées dans les chapitres §III.2.3 et §III.3.3 ont été pensées pour correspondre à la nomenclature des TPC comme présenté dans le Tableau 31. Ainsi, pour chaque combinaison d'états des nœuds parents est associée une loi de probabilité conditionnelle sur le nœud enfant ciblé. La somme des probabilités sur les états du nœud enfant pour chaque combinaison d'états des nœuds parents (Pa) doit faire impérativement 1.

$$\sum_{x_i} P(x_i|Pa(X_i)) = 1 \quad \text{Éq. 10}$$

Par exemple si le nœud enfant possède 3 états possibles, pour chaque ligne de la TPC⁵⁷, $P(\text{état1}) + P(\text{état2}) + P(\text{état3}) = 1$

- Transposition des « contraintes techniques » et « contraintes réglementaires et urbanistiques » sur les nœuds « Approches Fonctionnelles » en TPC.
Dans la nomenclature présentée aux chapitres §III.2.3, les familles de procédés, appartenant à une même approche fonctionnelle, auxquelles sont rattachées une ou plusieurs règles expertes, prennent pour chaque configuration de « caractéristiques techniques incriminées » (équivalente à 1 ligne de TPC) un des états suivants [préconisé, autorisé, écarté]. Pour une même ligne :
 - Si une famille de procédés obtient l'évaluation écartée par les experts, alors sa probabilité vaut d'office 0.
 - Si une unique famille obtient l'évaluation préconisée ou l'évaluation autorisée alors cette famille obtient la probabilité de 1. Les autres familles obtiennent alors systématiquement la probabilité de 0 pour que la somme des probabilités vaille 1.
 - Si plus d'une famille obtient l'évaluation préconisée alors nous ventilons la probabilité de 1 par nombre de famille « préconisée » (Si 2 familles sont préconisées, alors chacune d'elle reçoit une probabilité de 0.5 ; si 3 familles sont préconisées, alors chacune d'elle reçoit une probabilité de 1/3 ; et ainsi de suite). Peu importe les évaluations expertes des autres familles de la même ligne (états autorisés ou écartés), leur probabilité est fixée à 0.
 - Si plus d'une famille obtient l'évaluation autorisée mais qu'aucune autre n'est évaluée comme préconisée ; nous ventilons la probabilité de 1 par le nombre de familles « autorisées » (Si 2 familles sont autorisées, alors chacune d'elle reçoit une probabilité de 0.5 ; si 3 familles sont autorisées, alors chacune d'elle reçoit une probabilité de 1/3 ; et ainsi de suite). Les probabilités des autres familles de la même ligne (états écartés) sont fixées à 0.
- Transposition des « combinaisons à risques » en TPC.
Dans la nomenclature présentée aux chapitres §III.2.3, les nœuds de type « indicateurs de risques » peuvent prendre, pour chaque combinaison de familles de procédés et d'états de spécificités techniques incriminées, une des trois états suivants [faible, moyen, important]. À chaque combinaison est associé un de ces 3 niveaux de risque potentiel. Ce niveau obtient une probabilité de 1, les deux autres une probabilité de 0.
- Transposition des « fonctions d'impact » en TPC.
Comme vue dans le chapitre §III.3.3, à chaque combinaison de familles de procédés et d'états de spécificités techniques impactant un indicateur de performance (équivalent à 1 ligne de TPC) est associée un niveau de performance. Ce niveau est tiré de l'échelle de performance ordinaire qualitative caractérisant l'indicateur étudié. Pour chaque ligne de TPC, la probabilité du niveau de performance déterminé par nos fonctions d'impacts est fixée à 1 ; tous les autres niveaux de performance sont quant à eux fixés à 0.

Le Tableau 32 présente le contenu des 24 combinaisons d'états possibles du nœud « Isolation toiture ». Cette table régit les conditions à remplir (Caractéristiques Techniques

⁵⁷ 1 ligne de TPC correspond à une combinaison de valeurs des nœuds parents.

d'un bâti existant et de son environnement proche⁵⁸) pour pouvoir appliquer une des cinq familles de procédés techniques affiliées à l'approche fonctionnelle « AF-3 / Isolation toiture » matérialisée par un nœud du même nom.

Tableau 32 – TPC conditionnant la possibilité de mise en œuvre des Familles de Procédés de l'Approche Fonctionnelle "Isolation toiture"

N°	Variables parentes				AF ₃ / Isolation Toiture				
	CT_3 / Type de toiture (typologie)	CT_11 Travaux en site occupé	CT_12 / Zone patrimoine classé	CT_16 / Réfection de la toiture	P(Non isolée)	P(Support de couverture)	P(Sous rampants)	P(Sur combles perdus)	P(Sur toiture- terrasse)
1	Combles perdus	Tolérables	Oui	Oui	0	0	0	1	0
2	Combles perdus	Tolérables	Oui	Non	0.5	0	0	0.5	0
3	Combles perdus	Tolérables	Non	Oui	0	0.5	0	0.5	0
4	Combles perdus	Tolérables	Non	Non	0.333	0.333	0	0.333	0
5	Combles perdus	Non souhaités	Oui	Oui	0	0	0	1	0
6	Combles perdus	Non souhaités	Oui	Non	0.5	0	0	0.5	0
7	Combles perdus	Non souhaités	Non	Oui	0	0.5	0	0.5	0
8	Combles perdus	Non souhaités	Non	Non	0.333	0.333	0	0.333	0
9	Combles aménagés	Tolérables	Oui	Oui	0	0	1	0	0
10	Combles aménagés	Tolérables	Oui	Non	0.5	0	0.5	0	0
11	Combles aménagés	Tolérables	Non	Oui	0	0.5	0.5	0	0
12	Combles aménagés	Tolérables	Non	Non	0.333	0.333	0.333	0	0
13	Combles aménagés	Non souhaités	Oui	Oui	1	0	0	0	0
14	Combles aménagés	Non souhaités	Oui	Non	1	0	0	0	0
15	Combles aménagés	Non souhaités	Non	Oui	0	1	0	0	0
16	Combles aménagés	Non souhaités	Non	Non	0.5	0.5	0	0	0
17	Toiture-terrasse	Tolérables	Oui	Oui	0.5	0	0	0	0.5
18	Toiture-terrasse	Tolérables	Oui	Non	0.5	0	0	0	0.5
19	Toiture-terrasse	Tolérables	Non	Oui	0.5	0	0	0	0.5
20	Toiture-terrasse	Tolérables	Non	Non	0.5	0	0	0	0.5
21	Toiture-terrasse	Non souhaités	Oui	Oui	0.5	0	0	0	0.5
22	Toiture-terrasse	Non souhaités	Oui	Non	0.5	0	0	0	0.5
23	Toiture-terrasse	Non souhaités	Non	Oui	0.5	0	0	0	0.5
24	Toiture-terrasse	Non souhaités	Non	Non	0.5	0	0	0	0.5

⁵⁸ Ces 4 Caractéristiques Techniques déclenchent respectivement 2 règles de type « contrainte technique », 1 règle de type « contrainte règlementaire ou urbanistique » et 1 règle de type « opportunité de couplage ».

III.5.2.3 Compilation du réseau bayésien

Une fois la structure graphique définie et les tables de probabilités remplies, il ne reste plus qu'à compiler le réseau pour le rendre opérationnel. La compilation⁵⁹ permet d'associer, par l'utilisation du théorème de Bayes, les lois de probabilités définies pour chaque nœud (TPM ou TPC) afin d'obtenir la loi de probabilité jointe du réseau bayésien.

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | pa(X_i)) \quad \text{Éq. 11}$$

Grâce à cette dernière et à l'utilisation d'un algorithme d'inférence exacte (ou d'inférence approchée), il est possible de réviser automatiquement les distributions de probabilités de chaque nœud pour qu'ils puissent tenir compte des distributions de probabilités des nœuds qui leur sont parents ou enfants (voir la propriété de d-séparation des réseaux bayésiens décrite dans [98] qui régit la circulation des informations révisées).

Par exemple, la TPC du Tableau 32 donne une distribution de probabilité au nœud « isolation toiture » en fonction des combinaisons d'états des nœuds qui lui sont parents. Chaque combinaison d'états parents est définie de manière unique (équivalent à une ligne du Tableau 32). Par contre si l'on mixe les combinaisons d'états en tenant compte des distributions de probabilité de chacun des nœuds parents (ici des TPM), il est possible de réviser les probabilités sur les états du nœud étudié en utilisant le théorème de Bayes (voir page 71). En appliquant ce principe au nœud « Isolation toiture » pour que la TPC la caractérisant tienne compte des distributions de probabilité des nœuds qui lui sont rattachés, nous obtenons un réseau bayésien compilé dans la Figure 46 affichant une nouvelle distribution de probabilité sur le nœud qui nous intéresse.

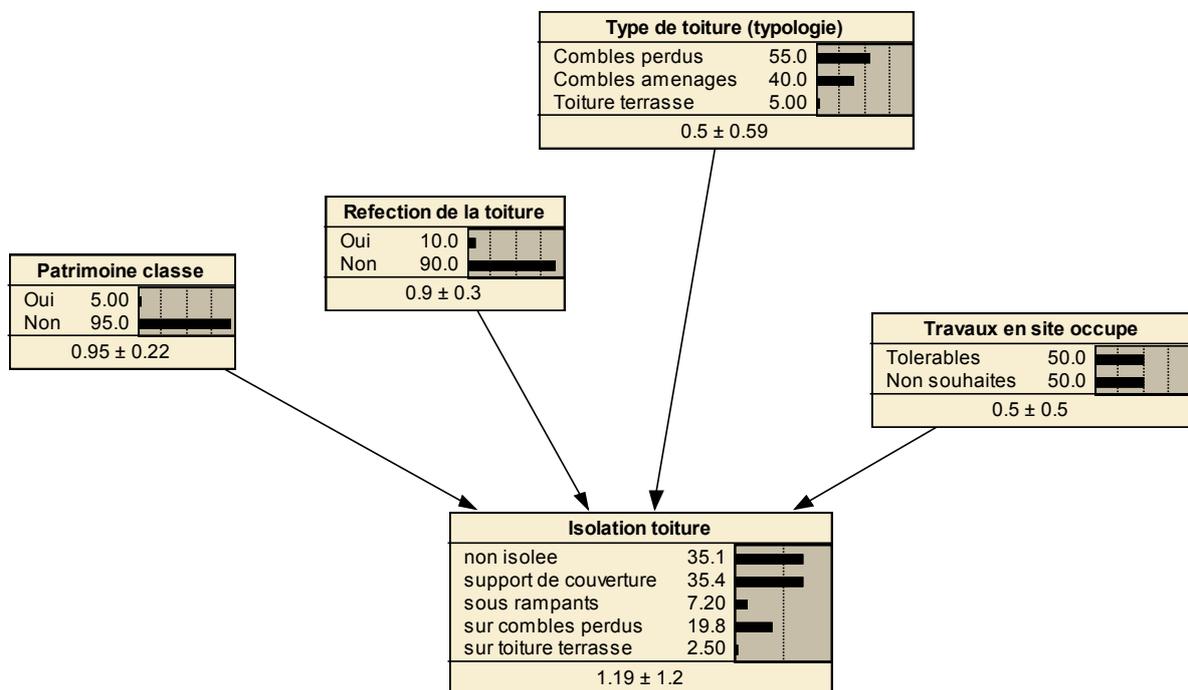


Figure 46 – Réseau bayésien équivalent à l'association des TPM des nœuds parents du nœud « isolation toiture » et de la TPC présentée en Tableau 32 du même nœud

⁵⁹ Réalisée par n'importe quel logiciel embarquant des algorithmes d'inférence bayésienne. Nous utilisons le logiciel NETICA de la société NORSYS (<http://norsys.com/>) pour coder et utiliser la structure bayésienne modélisée.

Il est alors possible, en effectuant le même raisonnement probabiliste, de réviser les probabilités d'un ou plusieurs nœuds pour voir comment l'algorithme d'inférence bayésienne propage les nouvelles informations à travers le réseau. C'est le principe d'utilisation des réseaux bayésiens.

Pour illustrer ce propos, la Figure 47 montre le même réseau qu'en Figure 46 mais en ayant cette fois injecté comme informations nouvelles après compilation – issues potentiellement d'un diagnostic de bâtiment – le besoin de procéder à la réfection de la toiture, le fait que la typologie de toiture est de type « combles perdus » et que les travaux en site occupé ne sont pas souhaités. Par inférence bayésienne la distribution de probabilité du nœud « isolation toiture » est révisé.

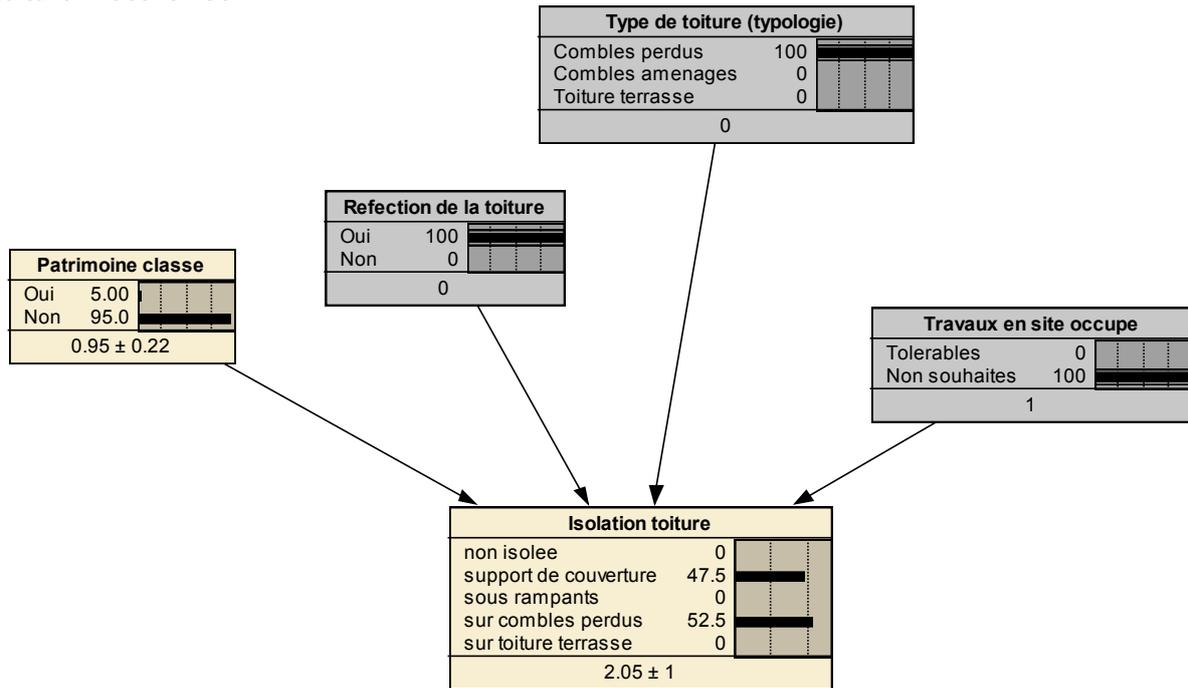


Figure 47 – Raisonnement en milieu incertain (on ne sait pas si le bâtiment est un Patrimoine Classé)

III.5.2.4 Utilisations possibles d'un réseau bayésien

Comme montré dans la Figure 47, la technologie des réseaux bayésiens permet, après formalisation des connaissances métiers (règles expertes décrites dans le sous-modèle M2), de pouvoir raisonner dans l'incertain. Cette propriété de pouvoir réviser un jugement après injection de connaissances spécifiques (totales ou partielles) dans une structure bayésienne embarquant des connaissances génériques (TPC et TPM) nous permet :

- d'identifier les assemblages de Familles de procédés compatibles (voir encore la Figure 47) avec une situation spécifique ;
- de probabiliser les fonctions d'impacts, dont le principe a été décrit dans le chapitre §III.3.3, pour évaluer des indicateurs de performance en présence d'inconnues (exemple didactique en Annexe F.c) ; ou pour rechercher les assemblages de familles de procédés permettant d'obtenir un niveau-cible de performance.

Chacune de ces deux utilisations est décrite dans le chapitre suivant.

La modélisation de la structure bayésienne partiellement décrite ici a été pensée pour permettre l'ajout, la modification et la suppression rapide de nœuds et de relations causales quantifiées. Ce modèle a été mis en œuvre dans un prototype fonctionnel couplé à une interface graphique permettant d'éditer rapidement les règles expertes et les notions auxquelles elles se rattachent.

La totalité du réseau bayésien mis en œuvre pour intégrer les différentes règles expertes capitalisées auprès de spécialistes de la rénovation est composée de 67 nœuds, 222 relations causales et 39 TPC. Cela rend la visualisation complète de la structure du réseau très chargée et par conséquent peu pertinente dans un rapport de thèse ; d'autant plus que certaines tables de probabilités conditionnelles possèdent un nombre de combinaisons d'états parents de près d'un demi-million de lignes⁶⁰.

La partie suivante du rapport de thèse explique comment ce réseau est utilisé dans la méthode d'aide à la décision développée.

III.5.3 Utilisation du modèle

Un réseau bayésien est une représentation causale probabiliste embarquant une connaissance générique (issue de savoirs experts, de données statistiques, etc.) d'un processus. De manière stricto sensu, il n'y a pas d'entrées ni de sorties : l'information spécifique associée à un système que l'on souhaite tester avec le modèle bayésien peut être injectée sur n'importe quel nœud pourvue qu'elle soit connue. Puis après inférence, sous certaines conditions associées à la structuration des relations causales, les distributions de probabilités sur les nœuds non imposées sont révisées. Il suffit alors par la suite de récupérer ces informations nouvelles. C'est autour de cette mécanique que les réseaux bayésien sont utilisés dans cette étude.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous les utilisons pour réaliser les deux types d'application suivants, à effectuer pour n'importe quelle opération de rénovation spécifique :

- L'évaluation multicritère de combinaisons de familles de procédés (avant rénovation ou estimation de la performance post-rénovation pour des alternatives identifiées) ;
- La recherche des combinaisons de familles de procédés (une par approche fonctionnelle codée) permettant de maximiser les préférences du décideur tout en respectant les contraintes techniques appliquées.

Nous allons voir dans cette section comment chacune de ces actions est réalisée, pour ensuite les mettre bout-à-bout et dérouler l'intégralité de la méthodologie d'aide à la décision pour un projet de rénovation de logement.

III.5.3.1 Évaluation de la performance multicritère avant rénovation

L'évaluation des performances multicritères de la situation initiale de chaque projet de rénovation traité se fait de la manière suivante :

- Les indicateurs de performance supposés « subjectifs » sont évalués par grilles de notation soumises aux occupants du bâti existant étudié lors de la phase de diagnostic.

⁶⁰ Pour certaines fonctions d'impacts réalisées par la méthode proposée en page 99

Ces indicateurs de performance auraient pu être directement évalués grâce au réseau bayésien élaboré précédemment avec l'aide des fonctions d'utilité codifiant ces indicateurs, mais l'appréciation du confort est très souvent subjective. Il est donc préférable de demander directement aux intéressés de noter ces aspects performantiels à l'aide d'échelles de niveaux prédéfinis (Tableau 33) afin d'obtenir une évaluation multicritère de la situation initiale (avant rénovation) la plus proche de la réalité.

Tableau 33 – Valeurs possibles des 6 indicateurs de performance à évaluer par grilles de notation pour la situation avant rénovation

ID	Indicateurs	Échelles ordinales de notation				
		Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent
IP-10	Confort thermique d'hiver	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent
IP-11	Confort thermique d'été	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent
IP-12	Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent
IP-13	Confort Acoustique (bruits intérieurs)	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent
IP-14	Confort Olfactif	Mauvais	Moyen	Bon	Très bon	Excellent
IP-25	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	Contraignante	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente

- Les indicateurs non pertinents pour la situation initiale sont fixés arbitrairement au seul état qui peut leur correspondre

Par nature, ces derniers permettent d'évaluer des alternatives potentielles de rénovation entre-elles. Leur évaluation, avant rénovation, n'a aucun sens ; nous préférons alors imposer arbitrairement leur niveau de performance avec les états présentés dans le Tableau 34.

Tableau 34 – Indicateurs dont la valeur est imposée lors de l'évaluation des performances de la situation avant rénovation

ID	Indicateurs	Valeurs imposées
IP-3	Coût initial	Très économique
IP-5	Énergie grise	Très faible
IP-6	Consommation d'eau (non liée à l'usage)	Très faible
IP-7	Déchets totaux	Très faible
IP-8	Changement Climatique	Très faible
IP-9	Épuisement des ressources non énergétiques	Très faible
IP-15	Modification de l'accès à la lumière naturelle	Non modifié
IP-16	Temps de mise en œuvre	Très rapide
IP-17	Intensité des travaux en site occupé	Très faible
IP-18	Modification de l'aspect visuel extérieur	Aucune
IP-19	Modification de la surface habitable	Non modifiée
IP-23	Accessibilité	Non modifiée
IP-24	Protection contre l'intrusion	Non modifiée

- Les (autres) indicateurs calculés grâce au réseau bayésien modélisé

Pour chaque opération de rénovation traitée, des informations spécifiques sont nécessaires à l'évaluation des performances des indicateurs restant via le réseau bayésien. Les informations suivantes sont collectées à l'aide d'un formulaire de saisie lors de la phase de diagnostic :

- les Caractéristiques Techniques (CT) connues de l'existant ;
- les Spécificités Techniques (ST) connues de l'existant;
- les Familles de Procédés (FP) décrivant le mieux la situation initiale.

Pour les CT et les ST non connues, les distributions de probabilités issues des TPM des nœuds les représentants sont directement utilisés pour modéliser les incertitudes associées à ces inconnues. Une fois toutes ces informations collectées (*les connues et celles codifiées par leur TPM*), celles-ci sont injectées dans le réseau bayésien (structure présentée dans la Figure 43). Après inférence probabiliste, des distributions de probabilités sur les niveaux de performances des indicateurs de performance et de risques codifiés sont récupérés sur les nœuds de type « indicateurs ». En prenant les niveaux de performance recueillant la probabilité maximale de chaque distribution de probabilité (une par nœud), nous obtenons directement l'évaluation multicritère de la situation initiale.

L'ensemble des méthodes d'attribution des niveaux de performances aux indicateurs manipulés est repris dans le schéma de synthèse en Figure 48.

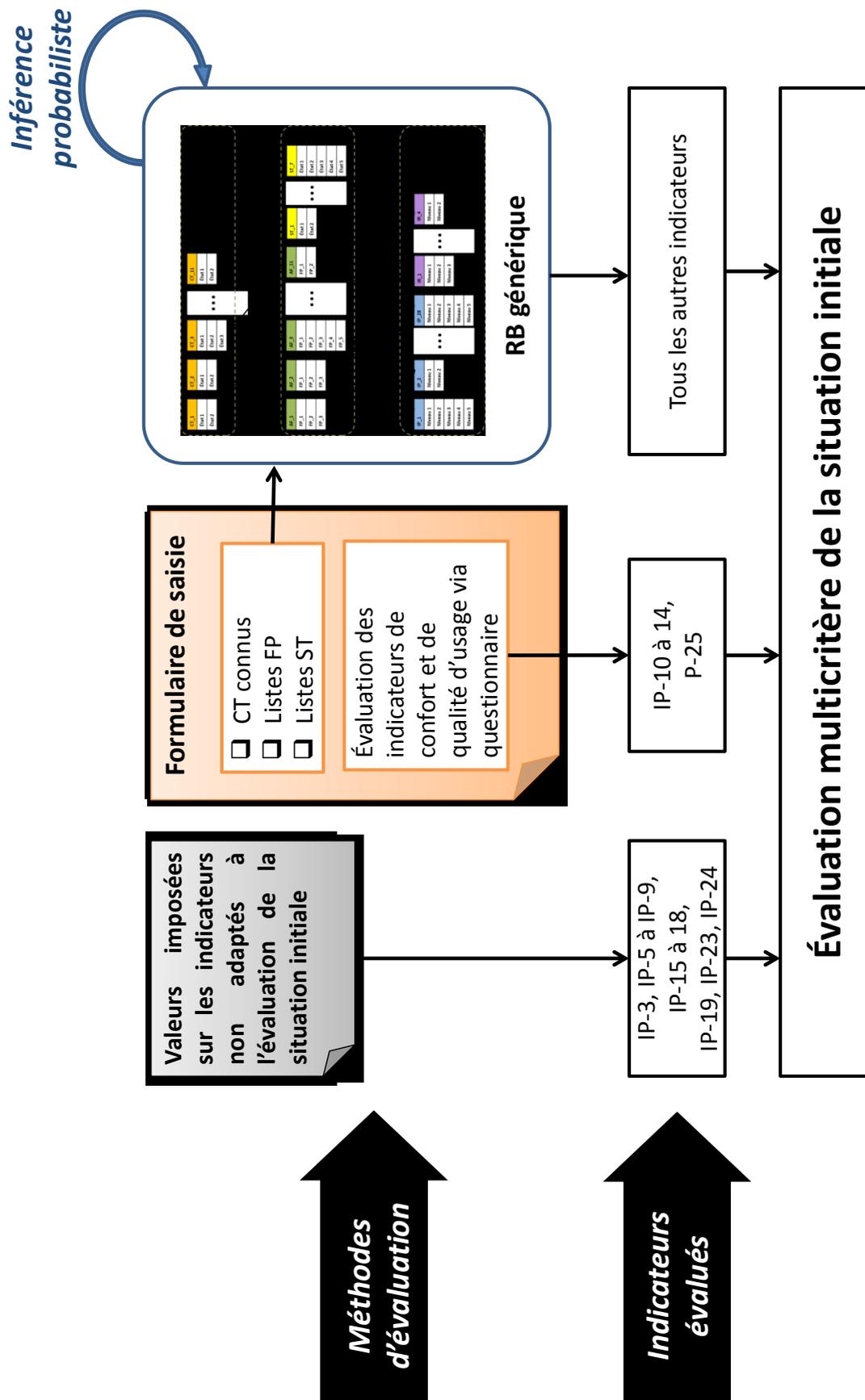


Figure 48 – Synthèse sur les mécanismes d'évaluation des performances avant rénovation des 29 indicateurs

III.5.3.2 Recherche des bouquets de travaux compatibles et efficaces

En l'absence d'utilisation de règles expertes et de prise en compte des préférences dans les réseaux bayésiens, nous avons vu dans le sous-modèle M1, qu'il y a théoriquement 345 599 alternatives de rénovation potentielles codifiées. Chacune d'entre-elle est évaluée par des fonctions d'impacts (évaluation multicritère modélisée dans le sous-modèle M3). Ce nombre correspond au domaine de recherche de solutions si nous faisons une analogie avec un problème d'optimisation multicritère⁶¹ avec contraintes.

Lorsque nous souhaitons rechercher des alternatives efficaces du point de vue des préférences de la maîtrise d'ouvrage et compatibles au regard des caractéristiques techniques connues de l'existant pour une opération spécifique de rénovation, nous utilisons la technologie des réseaux bayésiens pour mettre en forme notre problème d'optimisation multicritère par contraintes successives. Les contraintes injectées dans ce dernier sont de 2 sortes.

- Les premières sont l'application de règles expertes déclenchées par la sélection d'états sur les caractéristiques techniques connues (informations collectées en phase diagnostic) et agissant comme des filtres logiques probabilisés sur les familles de procédés (modélisés comme des états sur les nœuds de types « Approches Fonctionnelles ») pouvant être mis en œuvre. Ces contraintes permettent d'écarter, ou au contraire de préconiser, des familles de procédés de rénovation.
- Les secondes sont l'application successive des niveaux-cibles sur les nœuds de type « indicateurs de performance » du PGP_{corrigé} préalablement élaboré dans le sous-modèle M4.

L'application successive de ces deux sortes de contraintes sur le domaine de recherche de solutions nous permet de réduire de manière itérative, le nombre d'alternatives de rénovation potentielle, compatibles et efficaces, pour une opération de rénovation donnée. Le critère d'arrêt de cet algorithme d'optimisation multicritère, utilisant le principe de programmation par contrainte (PCC), est la réduction du domaine de recherche à une seule combinaison de 11 familles de procédés – une par nœuds de type « Approches Fonctionnelles » – compatible et efficace. Ensuite, par jeu combinatoire sur ces 11 familles de procédés, un sous-ensemble d'alternatives potentielles de rénovation est généré.

La recherche puis la génération d'alternatives potentielles de rénovation, se font par un processus présentant plusieurs étapes enchaînées de manière chronologique :

- 1 Génération d'un réseau bayésien spécifique à chaque projet de rénovation (recalibrage des fonctions d'impacts pour tenir compte du bâti avant rénovation).
- 2 Injection de toutes les informations connues – de type « CT » et « ST » – propres à chaque projet de rénovation (collectées lors de la phase diagnostic).
- 3 Injection incrémentale des niveaux de performance ciblées **PGP_{corrigé}** (déterminés dans le §III.4.4 en page 157) qui représentent les préférences multicritères du décideur.
- 4 Identification les familles de procédés ayant la probabilité révisée la plus élevée sur chaque nœud représentant une approche fonctionnelle dans le réseau bayésien spécifique.

⁶¹ Pour une optimisation de la famille des méthodes déterministes comme présentée dans le chapitre §VII.2 de l'état de l'art

- 5 Construction un plan de simulation à partir des différentes familles de procédés identifiées durant l'étape précédente (chaque configuration représentant une alternative potentielle de rénovation).

Chacune de ces étapes va être ci-après détaillée :

1 Génération d'un réseau bayésien spécifique à chaque projet de rénovation (recalibrage des fonctions d'impacts pour tenir compte du bâti avant rénovation)

Certaines *fonctions d'impacts* affectant les niveaux de performance de certains indicateurs⁶², ne peuvent rester génériques d'un projet à l'autre : elles doivent tenir compte de la situation avant rénovation. Par exemple les coûts initiaux associés à l'achat et à la mise en œuvre d'une VMC simple flux dans une alternative potentielle de rénovation ne peut pas être intégrée à la fonction d'impact codant l'indicateur « IP-3 / Coût initial » si le bâti possédait déjà, avant rénovation, une VMC de ce type. Il faut donc tenir compte de la configuration de familles de procédés caractérisant l'existant pour mettre à plat les impacts intrinsèques affectés à des solutions déjà présentes avant rénovation.

Ainsi, pour chaque opération traitée, les fonctions d'impacts codant les TPC des nœuds modélisant les indicateurs doivent être réinitialisées pour ne pas compter les impacts intrinsèques des familles de procédés caractérisant déjà l'opération (situation avant rénovation).

2 Injection des caractéristiques techniques connues et spécificités techniques de l'existant dans le réseau bayésien spécifique

Collectées via un formulaire en amont de la phase d'évaluation multicritère de la situation avant rénovation, les valeurs des Spécificités Techniques (ST) et Caractéristiques Techniques (CT) caractérisant le mieux le bâti l'existant sont injectées dans le réseau bayésien initialisé lors de l'étape précédente. Pour le cas des CT, le professionnel en charge de la réalisation du diagnostic a la possibilité de ne pas saisir d'informations sur les nœuds dont il ne connaît pas la valeur. Dans ce cas précis, l'inférence probabiliste se fera via la loi de probabilité marginale (TPM) instanciée sur le nœud en question.

Ces connaissances spécifiques, injectées dans le réseau bayésien, vont permettre le déclenchement des règles expertes qui agissent comme des filtres contextuels sur les familles de procédés compatibles avec l'existant. Il convient par la suite d'injecter les préférences de la maîtrise d'ouvrage pour identifier le sous-ensemble de combinaisons de familles de procédés le plus efficace.

3 Injection incrémentale des niveaux de performance ciblées du $PGP_{\text{corrigé}}$

Le chapitre décrivant le sous-modèle M4 dédié à la méthode de formalisation des préférences de la maîtrise d'ouvrage nous a montré comment passer d'une liste d'enjeux de rénovation à des niveaux de performance ciblées sur les différents indicateurs modélisés dans le réseau bayésien spécifique (§III.4.4 en page 157). Ce profil de valeurs-cibles, appelé $PGP_{\text{corrigé}}$, est injecté de manière incrémentale dans le réseau bayésien sur les différents nœuds « indicateurs » selon un ordre d'imposition précis.

L'ordre d'imposition des indicateurs correspond au classement par ordre décroissant de valeurs du $PPR_{\text{corrigé}}$ obtenu également par le sous-modèle M4. L'imposition commence

⁶² Ceux listés dans le Tableau 34 et ne pouvant être évalués que pour les situations après rénovation.

par l'indicateur ayant obtenu le poids le plus élevé, puis l'indicateur ayant obtenu le second poids le plus élevé et ainsi de suite.

Plus le nombre de valeurs imposées sur les nœuds indicateurs augmente, plus le champ des combinaisons de familles de procédés possibles diminue (*principe de la programmation par contrainte*). En fonction du projet de rénovation traité – ayant des valeurs sur les ST, CT et $PGP_{\text{corrigé}}$ qui lui sont propre – le nombre de nœuds indicateurs dont la valeur est imposable sans blocage de l'inférence probabiliste varie. Si trop de « contraintes » sont appliquées au réseau bayésien, aucune solution viable n'est trouvée et inversement si trop peu sont appliquées, le volume de solutions proposées sera trop important et donc non pertinent. Il faut donc piloter astucieusement la manière d'imposition des valeurs-cibles sur les nœuds de type indicateurs du réseau bayésien afin d'atteindre un nombre suffisant de préférences injectées tout en veillant à ce qu'au moins une combinaison de familles de procédés soit possible après inférence.

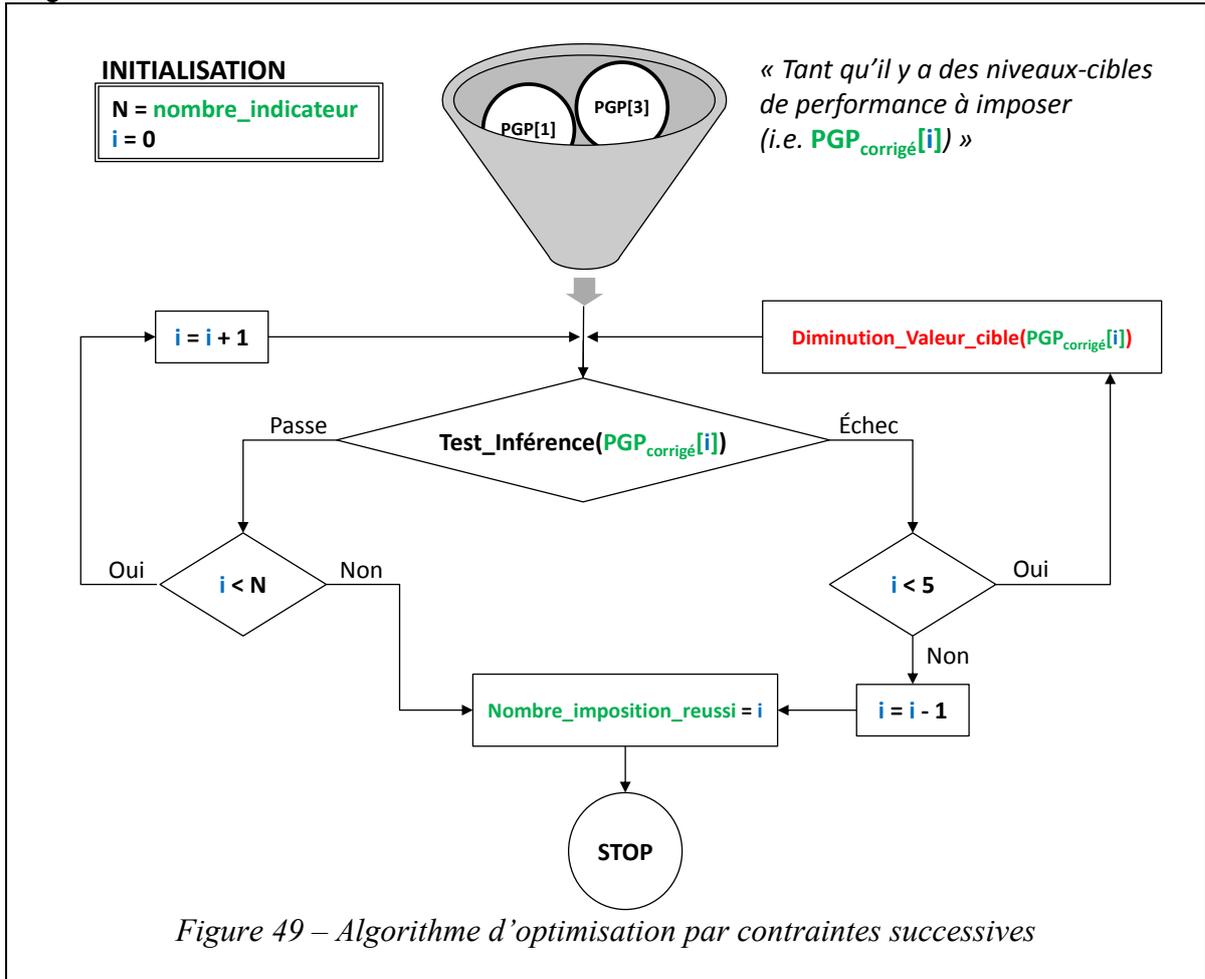
Ce pilotage est automatisé de la manière suivante. Sur 25 indicateurs de performance modélisés dans le réseau bayésien, nous souhaitons, à minima, que les 5 indicateurs les plus importants (ayant l'ordre d'imposition le plus faible, i.e. les poids du $PPR_{\text{corrigé}}$ les plus élevés), puissent être imposés quelles que soient les circonstances, quitte à diminuer – ou augmenter⁶³ – légèrement le niveau d'exigence calculé. En dehors de cette condition, l'injection incrémentale des valeurs sur les nœuds indicateurs continue jusqu'à ce que l'inférence bloque par l'absence de solutions viables. À ce moment-là, nous revenons à l'itération précédente pour analyser les résultats d'inférence (à l'étape d'imposition précédent le blocage de l'inférence). Ce mécanisme est décrit par l'algorithme suivant :

Déclaration des variables

Variables	Description
i	variable d'incrémentatation
$PGP_{\text{corrigé}}[]$	Tableau de valeur-cibles sur les indicateurs classés par ordre d'imposition
$\text{test_inférence}()$	Fonction vérifiant si l'inférence probabiliste « passe » ou « bloque » dans l'utilisation du réseau bayésien spécifique. Elle passe en paramètre les éléments du tableau $PGP_{\text{corrigé}}[]$.
$\text{Nbre_imposition_réussie}$	Nombre de nœuds indicateurs où l'imposition d'une valeur cible à réussie
$\text{Diminution_valeur_cible}()$	Fonction permettant d'abaisser le niveau-cible de performance de l'élément de $PGP_{\text{corrigé}}[]$ passé en paramètre de 1 niveau. En d'autres termes, « on relâche la contrainte ».
nombre_indicateur	Nombre de nœud indicateur de performance dans le réseau bayésien (ici 25)

⁶³ En effet, il est parfois possible que les seuls niveaux de performance admissibles sur certains indicateurs, soient supérieurs à celui exigé par leur valeur de $PGP_{\text{corrigé}}$. Dans ce cas particulier, nous obtenons alors une « surperformance ».

Algorithme



On récupère alors les distributions de probabilités inférées à l'ordre d'imposition $PGP_{corrigé}[Nbre_imposition_reussie]$ de chacun des 11 nœuds modélisant une Approche Fonctionnelle (AF) dans le réseau bayésien.

4 Identification les familles de procédés ayant la probabilité a priori la plus élevée sur chaque nœud représentant une approche fonctionnelle dans le réseau bayésien spécifique.

Une fois l'inférence réalisée sous les conditions décrites précédemment, nous obtenons des distributions de probabilités révisées (par inférence) sur les nœuds du réseau bayésien qui n'ont pas été imposés. Nous analysons alors les probabilités associées aux familles de procédés (correspondant chacune à un état des nœuds de type « Approche Fonctionnelle »).

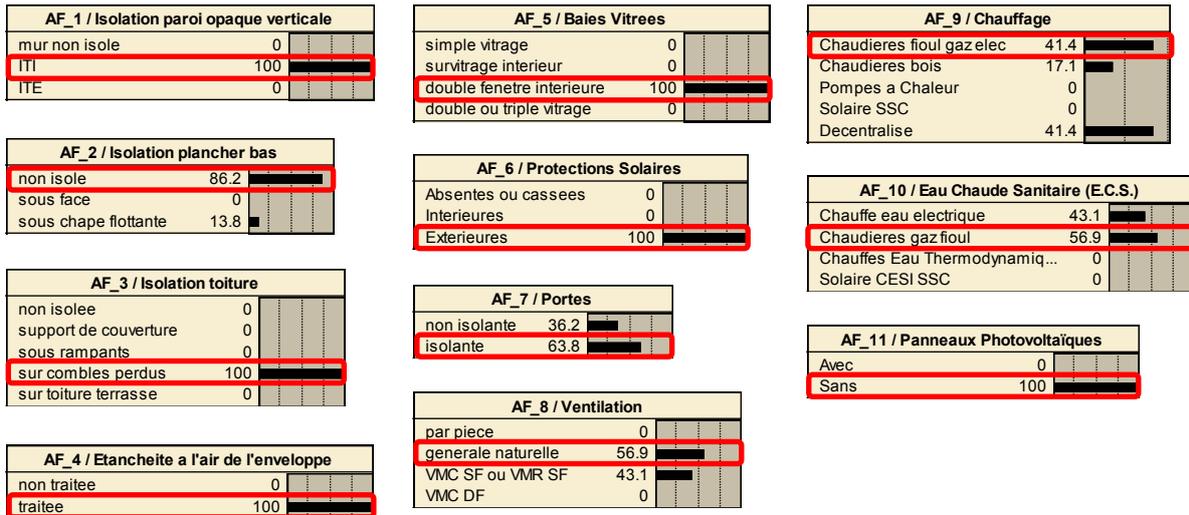


Figure 50 – Identification des Familles de Procédés ayant la probabilité la plus forte sur chaque nœud "Approche Fonctionnelle" après injection incrémentale du PGP_{corrigé}

Au cours de cette analyse, nous identifions les familles de procédés auxquelles est associée la probabilité la plus forte pour chaque nœud « Approche fonctionnelle » (exemple d'application à un cas fictif dans la Figure 50). Ces familles de procédés, correspondent, a priori, aux choix les plus judicieux pour tendre vers les niveaux de performance exigés sur les indicateurs grâce à l'injection du PGP_{corrigé}. Il faudra néanmoins tester une à une les combinaisons de familles de procédés identifiées avec ce même réseaux (voir l'étape 5 ainsi que le contenu du paragraphe III.5.3.3).

Cas particuliers

- Si la probabilité la plus forte est associée à une famille de procédés ne pouvant pas être utilisée en rénovation (cas particulier décrit en page 107) et si elle ne correspond pas à la famille de procédés retenue pour caractériser la situation avant rénovation, on retient la seconde plus forte probabilité et ainsi de suite. Par exemple, la probabilité la plus forte de l'Approche Fonctionnelle « AF_8 / Ventilation » est donnée à la famille de procédés « [ventilation] par pièce ». Cette famille n'est utilisable que pour décrire un bâti existant. Dans ce cas précis, la famille de procédés à retenir ne pourra être cette dernière ; on retiendra la seconde probabilité la plus forte.
- Si deux familles ou plus ont, sur la même approche fonctionnelle, la même probabilité maximale, alors nous retenons les 2 ou plus, familles de procédés. De la même manière, une tolérance sur la différence de probabilités obtenues entre ces dernières peut être appliquée (2 % par exemple) pour retenir plus d'une famille si les probabilités maximales ont des valeurs similaires.

5 Construction un plan de simulation à partir des différentes familles de procédés identifiées durant l'étape précédente

Par jeu combinatoire, nous construisons un plan de simulation testant chaque combinaison de familles de procédés préalablement identifiées (en piochant une seule famille identifiée par approche fonctionnelle si plus d'une famille a été mise en évidence). Pour 11 nœuds de type « Approche Fonctionnelle » et en supposant qu'une seule famille de procédés a été identifiée comme la plus probable à l'étape précédente, il existe $2^{11}-1 = 2047$ combinaisons à simuler. Elles sont appelées ci-après alternatives potentielles de rénovation. Ce nombre théorique s'explique de la manière suivante. Par nœud « Approche Fonctionnelle », deux choix sont possibles :

- soit on ne fait rien (on retient la famille de procédés ayant servi à décrire la situation avant rénovation) ;
- soit on sélectionne la famille de procédés identifiées (cette dernière peut correspondre également à celle décrivant la situation avant rénovation ; nous excluons les doublons par la suite).

Pour 11 nœuds « Approche Fonctionnelle » nous avons bien : $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot \dots \cdot 2 = 2^{11} = 2048$ alternatives potentielles de rénovation⁶⁴. À ce nombre nous retirons 1 qui correspond au cas où aucune famille de procédés n'est sélectionnée (nous retombons ici sur la situation avant rénovation qui a déjà été évaluée).

Néanmoins ce nombre d'alternatives doit être corrigé. En effet il est possible qu'une famille de procédés, identifiée comme la plus probable sur un nœud, soit celle caractérisant le bâtiment avant rénovation. Dans ce cas précis, il n'y a plus de choix à faire sur cette « Approche Fonctionnelle » car l'inférence bayésienne a montré que la famille de procédé actuelle reste la plus performante aux regards des préférences de la maîtrise d'ouvrage. Par exemple, pour un cas de figure où 3 des 11 familles de procédés identifiés sur les 11 nœuds « Approche fonctionnelle » caractérisent déjà l'existant, le nombre d'alternatives potentielle de rénovation passe de 2047 à $2^8 \cdot 1^3 - 1 = 255$ alternatives potentielles de rénovation à évaluer.

Une fois le nombre d'alternatives potentielles de rénovation corrigé pour évacuer les doublons et la situation avant rénovation, un plan de simulation peut être dressé en testant toutes les combinaisons de familles de procédés retenues.

III.5.3.3 Évaluation de la performance multicritère des alternatives potentielles de rénovation préalablement générées

Les alternatives potentielles de rénovation du plan de simulation préalablement générés doivent être évaluées. Dans le cadre de notre méthodologie d'aide à la décision, nous réalisons cette évaluation, multicritère, grâce au même réseau bayésien (celui spécifique à chaque opération de rénovation traitée) en changeant le type de nœuds imposés. Cependant l'évaluation de ces alternatives peut également se faire à l'aide de n'importe quelle méthode d'évaluation mise à la disposition du professionnel en charge de l'opération de rénovation en cours (abaques, code de calculs, logiciels de simulation...).

⁶⁴ Ce nombre augmente évidemment si plus une famille de procédés a été identifiée comme plus probable par nœud représentant une approche fonctionnelle.

Dans le cas où le réseau bayésien spécifique est utilisé pour évaluer chaque alternative potentielle de rénovation générée, la procédure suivante est à suivre.

- A. Imposition des états connus sur les nœuds CT et ST du réseau bayésien spécifique à l'opération de rénovation testée.

Les étapes B. et C. sont à réaliser tant qu'il y a des alternatives potentielles de rénovation à évaluer.

- B. Imposition des 11 familles de procédés (une par nœud de type « Approche Fonctionnelle ») constituant chaque alternative potentielle de rénovation préalablement générée.
- C. Récupération, après inférence probabiliste, des distributions de probabilités sur les nœuds de type « IP » et « IR » pour chaque alternative potentielle de rénovation évaluée.

Il est important de souligner que la procédure d'évaluation multicritère, via les réseaux bayésiens lors de l'étape C, peut présenter deux cas de figure :

- Le premier est celui où toutes les données nécessaires à la détermination d'un niveau de performance sur les indicateurs sont connues (i.e. l'ensemble des nœuds « Approche Fonctionnelle » et « Spécificité Technique » sont renseignés). Dans ce cas précis, il n'y a pas d'inconnue et un seul niveau de performance est affecté à chaque nœud de type « IP » et « IR » avec une probabilité de 100 %.
- Le second reste le plus intéressant. Les réseaux bayésiens permettant de probabiliser les fonctions d'impacts modélisées, autorisent l'évaluation de ces indicateurs, même en situation d'inconnues partielles (i.e. tous les nœuds « Approche Fonctionnelle » ou « Spécificité Technique » ne sont pas renseignés). Dans cette configuration, des distributions de probabilités sur les états possibles de nœuds modélisant les indicateurs peuvent apparaître à la place de niveau unique de performance (exemple en Annexe F.c). Ces distributions représentent directement les incertitudes liées à l'évaluation des indicateurs modélisés. Dans le cadre de ce travail de recherche, l'opportunité de propager ce type d'incertitude codifiée sous la forme de distributions de probabilités a été étudié : un couplage des méthodes de surclassement ELECTRE TRI et ELECTRE III (sous-modèle M6 décrit ci-après) avec la méthode de propagation des incertitudes sur les données Monte-Carlo (décrite en page 61 dans la partie *État de l'art*) est envisageable. Néanmoins, pour des raisons de délais de mise en œuvre, cette opportunité a été laissée de côté et seuls les états sur les nœuds de type « IP » et « IR » ayant la probabilité la plus forte après inférence probabiliste sont retenues comme « niveaux de performance » des alternatives évaluées.

Une fois l'ensemble des alternatives potentielles de rénovation évalué, sont écartées les alternatives présentant une performance (c.-à-d. la probabilité la plus élevée sur les différents états possibles de chaque nœud de type « indicateur ») en deçà des valeurs garde-fous définies par un panel d'expert dans le Tableau 30 de la page 160.

Les alternatives de rénovation évaluées et retenues sont par la suite triées et classées grâce à des méthodes d'aide à la décision multicritère, afin de présenter à la maîtrise d'ouvrage un classement préférentiel des choix retenus par la méthodologie d'aide à la prescription. Ce volet est présenté dans le sous-modèle M6.

La technologie d'inférence probabiliste utilisée, appelée « réseaux bayésiens », permet de réunir au sein d'un même modèle graphique relationnel : familles de procédés de rénovation, règles expertes et systèmes d'évaluation multicritère. Les utilisations du modèle sont multiples. Couplé avec des algorithmes de programmation par contraintes, le réseau bayésien permet tour-à-tour de réaliser une optimisation des assemblages de familles de procédés de rénovation compatibles et des évaluations multicritères de ces assemblages ; le tout en milieu incertain.

III.6 M6 : Tableau de bord : classement multicritère automatisé & pilotage manuel des alternatives

Une fois les alternatives de rénovation générées puis évaluées grâce à l'utilisation du réseau bayésien, nous obtenons un ensemble plus ou moins fourni d'alternatives à classer par niveaux de performance vis-à-vis du **PGP_{corrigé}** exprimé par la maîtrise d'ouvrage.

Le classement pourrait se faire par jugements d'experts, mais au regard du nombre de critères et surtout du grand nombre d'alternatives à comparer, cette approche serait coûteuse en temps et en ressources. Nous préférons recourir aux méthodes d'aide à la décision multicritère qui sont pour certaines facilement automatisables.

Parmi les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère recensées dans la littérature, les méthodes de surclassement ELECTRE sont les plus utilisées dans les domaines du génie civil, du bâtiment, et l'aménagement du territoire [145].

La méthode ELECTRE III [60], répondant à une problématique de type γ (procédure de classement), permet de réaliser notre objectif qui est de classer les alternatives par ordre de préférence. Cette méthode tient compte des plages d'incertitudes entourant chaque critère d'évaluation⁶⁵ et applique le principe de comparaison par paire d'alternatives, propre aux méthodes de surclassement. Par exemple, pour $A=100$ alternatives potentielles, le nombre de paires est de $A \times (A - 1) = 9900$. Ce chiffre croît rapidement avec le nombre d'alternatives et rend cette méthode peu pertinente pour les problématiques de grandes tailles.

Cependant, des approches complémentaires existent et permettent de « dégrossir » le nombre d'alternative à comparer, c'est le cas de la méthode ELECTRE TRI [129] qui utilise un processus de comparaison proche de la méthode ELECTRE III. ELECTRE TRI utilise des « alternatives de référence⁶⁶ » pour segmenter l'espace des critères d'évaluation en catégories (ex : bonne, mauvaise). La comparaison se fait toujours entre une alternative potentielle et une alternative de référence, réduisant ainsi le nombre de paires à comparer. Cette méthode permet de considérer un nombre d'alternatives plus important, tout en gagnant en lisibilité. En gardant le même exemple, pour $A=100$ alternatives potentielles et pour $B=1$ alternative de référence, le nombre de paires est alors de $A \times B = 100$.

L'idée est alors d'utiliser la méthode ELECTRE TRI en premier temps pour « dégrossir » le nombre d'alternatives à comparer (nous retiendrons uniquement les éléments affectés à la « meilleure » catégorie non-vide). Puis en second temps, utiliser la méthode ELECTRE III pour hiérarchiser le jeu d'alternatives restants.

⁶⁵ Dans l'étude menée, un indicateur de performance possédant une pondération non nulle ($w_i \neq 0$) est assimilé à un critère d'évaluation.

⁶⁶ Pouvant être réelles ou fictives, et matérialisant les limites hautes et basses de catégories d'affectation des alternatives potentielles.

Le fonctionnement des méthodes ELECTRE utilisées ci-après est expliqué de manière très détaillée dans l'ouvrage intitulé « Méthodes multicritères ELECTRE » rédigé par L.-Y. Maystre [145]. Pour la suite de ces travaux de thèse, nous focaliserons nos explications et analyses uniquement sur les entrées/sorties de ces méthodes. Pour en apprendre d'avantage sur les mécanismes des méthodes ELECTRE, nous renverrons le lecteur vers cet ouvrage.

Les méthodes ELECTRE utilisent des paramètres inhérents aux méthodes de surclassement (seuils, poids...) qui peuvent fortement impacter les sorties souhaitées (catégorisation ou classement des alternatives dans notre cas). La sélection de valeurs initiales pour chacun de ces paramètres sensibles (seuils d'indifférence, seuils de préférence, seuils de véto, seuil de coupe, poids des critères, alternatives de référence) est assez arbitraire et dépend fortement de l'homme d'étude qui applique la méthode (problème de subjectivité). Pour pallier l'incertitude associée à la prise de valeur de ces paramètres, des analyses de sensibilité doivent être systématiquement pratiquées sur ces paramètres (sous la forme d'études paramétriques) afin de définir correctement leur valeur nominale. Ensuite, une analyse de robustesse doit être réalisée (toujours sous la forme d'études paramétriques) en faisant varier légèrement ces valeurs nominales afin d'examiner dans quelles mesures, les sorties obtenues restent valables.

III.6.1 Catégorisation des alternatives potentielles de rénovation par la méthode ELECTRE TRI

III.6.1.1 Principe de la méthode

Cette méthode de surclassement permet d'affecter un ensemble de « m » alternatives potentielles $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ dans des catégories prédéfinies $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$. Les frontières entre catégories sont délimitées par « n » alternatives de référence $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. Enfin, chaque alternative est évaluée sur un ensemble de « h » critères $G = \{g_1, g_2, \dots, g_h\}$ et disposant chacun d'un poids qui reflète leur importance relative aux yeux du décideur $W = \{w_1, w_2, \dots, w_h\}$. L'ensemble de ces données est représenté dans le tableau de performance présenté en Tableau 35

Tableau 35 – Tableau de performance (ELECTRE TRI)

Alternatives (↓)	CRITÈRES (↓)				
	g_1	g_2	g_3	...	g_h
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$g_3(a_1)$	a_{14}	$g_h(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$g_3(a_2)$	...	$g_h(a_2)$
a_3	$g_1(a_3)$	$g_2(a_3)$	$g_3(a_3)$	...	$g_h(a_3)$
.
.
.
a_m	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	$g_3(a_m)$	...	$g_h(a_m)$
Alternatives de référence (↓)					
b_1	$g_1(b_1)$	$g_2(b_1)$	$g_3(b_1)$	...	$g_h(b_1)$
b_2	$g_1(b_2)$	$g_2(b_2)$	$g_3(b_2)$	...	$g_h(b_2)$
.
b_n	$g_1(b_n)$	$g_2(b_n)$	$g_3(b_n)$	...	$g_h(b_n)$
Poids (→)	w_1	w_2	w_3	...	w_h

La méthode ELECTRE TRI utilise deux types de paramètres subjectifs en plus de la nécessité de définir des alternatives de référence [146] :

- Les paramètres intercritères : ils permettent d'évaluer l'importance relative de chaque critère ; ce sont généralement des poids.
- Les paramètres intracritères : ils formalisent pour chaque critère l'appréciation subjective de leurs valeurs et prennent la forme de seuils d'indifférence (q) de préférence (p) et de véto (v)⁶⁷. Chaque seuil intervient dans la comparaison deux à deux d'alternatives comme des distances spécifiques ayant les propriétés suivantes :

- *Seuil d'indifférence (q)* : il peut être interprété comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs effectués. En deçà de cette valeur, la performance sur ce critère des deux alternatives sera jugée égale.

$$\begin{aligned} & \text{si } |g_i(a_j) - g_i(b_k)| < q, \\ & \text{alors } a_j \text{ et } b_k \text{ sont supposées équivalentes sur le critère } i \end{aligned} \quad \text{Éq. 12}$$

- *Seuils de préférence stricte (p)* : il peut être interprété comme la marge d'incertitude maximale liée aux calculs effectués. Au-delà, la différence de performance sur ce critère entre deux alternatives comparées sera suffisamment importante pour juger une des deux alternatives préférable à l'autre.

$$\begin{aligned} & \text{si } g_i(a_j) - g_i(b_k) > p, \\ & \text{alors } a_j \text{ est préférable à } b_k \text{ sur le critère } i \end{aligned} \quad \text{Éq. 13}$$

- *Seuil de véto (v)* : il peut être interprété comme la distance à partir de laquelle, les valeurs comparées de deux alternatives sur un même critère sont si différentes que la notion de comparaison perd son sens : on dit alors que les alternatives sont *incomparables* sur le critère en question. *Par exemple, il n'est « pas comparable » de confronter sur le critère « vitesse maximale » une voiture citadine sans permis, pouvant rouler au maximum à 50km/h, avec une voiture de course, pouvant rouler à prêt de 315km/h. L'écart de performance est tel, que la comparaison n'a plus de sens.*

$$\begin{aligned} & \text{si } |g_i(a_j) - g_i(b_k)| > v, \\ & \text{alors } a_j \text{ et } b_k \text{ sont incomparable sur le critère } i \end{aligned} \quad \text{Éq. 14}$$

L'ensemble de ces paramètres, associé aux données présentées dans le Tableau de performance d'un problème d'aide à la décision multicritère formalisé, permet de dérouler la méthode ELECTRE TRI. La première étape de la méthode consiste à comparer pour chaque critère g_i les distances $|g_i(a_j) - g_i(b_k)|$ avec les seuils q_i , p_i et v_i . Cette comparaison est faite sur chaque critère, par paire d'alternatives, entre une alternative à catégoriser (a_j) et chaque alternative de référence (b_k). Ces comparaisons permettent de calculer des indices de concordance et des indices de discordance, puis par la suite, le calcul de degrés de crédibilité $\sigma_S(a_j, b_k)$. Enfin deux procédures d'affectation, une optimiste et une pessimiste, faisant intervenir un seuil de coupe λ , permettent de catégoriser les actions comparées.

⁶⁷ Avec l'inégalité suivante à respecter : $q \leq p \leq v$

III.6.1.2 Mise en place de la méthode

Afin de présenter notre utilisation de la méthode ELECTRE TRI, un jeu de valeurs nominales pour les paramètres sensibles de l'algorithme est nécessaire (i.e. seuils, alternatives de référence, profils de poids). Nous prendrons, lorsque cela est nécessaire, les valeurs nominales déterminées pour l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire. Bien que le protocole calculatoire à suivre reste identique pour n'importe quelle opération de rénovation, il faut l'appliquer à chaque fois, avec des jeux de valeurs nominales des paramètres sensibles propres à chaque opération.

Sélection des indicateurs de performance

Nous commençons par ne retenir comme critères de décision que les indicateurs de performance ayant une valeur de $PGP_{\text{corrigé}}$ ne correspondant pas au niveau de performance le plus bas sur l'échelle de niveau qui le caractérise (i.e. ayant une valeur de $PGP_{\text{corrigé}}(i) = 1$). C'est-à-dire que les indicateurs, jugés comme les moins importants au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage, ne participeront pas à l'élaboration automatique des classements multicritères.

Les indicateurs de performance ne rentrant pas dans ce cas de figure, sont alors pris comme critères de décision dans l'application de la méthode ELECTRE TRI.

Les indicateurs de risques potentiels présentés en page 136, bien qu'évalués, ne sont pas pris en considération dans les méthodes de classement automatisés ELECTRE. Ce choix vient du fait que personne ne souhaite courir un risque potentiel pour son projet. L'attribution d'un poids sur chacun de ces indicateurs de risque est un acte qui ne peut être automatisé : il doit être imposé sciemment par la maîtrise d'ouvrage. Dans le cas où l'utilisateur de la méthode opte pour l'obtention d'un classement multicritère automatisé, en plus du classement par ordre préférentiel des alternatives retenues, un indicateur de risque est présenté dans le classement final. Il prend la forme d'un symbole « ! » traduisant une note non-optimale sur au-moins, un indicateur de risque.

Normalisation des niveaux de performance sur 50 points

Afin de faciliter la mise en place des seuils intervenant dans le processus de surclassement, les échelles d'évaluation des indicateurs de performance retenus pour les méthodes ELECTRE sont transformées pour obtenir une échelle commune de valeurs allant de 0 à 50 points. La transformation se fait grâce à la fonction suivante (Éq. 15) pour n'importe quelle alternative potentielle évaluée ou n'importe quelle alternative de référence définie.

$$g_i(a_j) = \text{ARRONDI} \left[\frac{50 * (h_i(a_j) - 1)}{\text{Nbre}_{\text{niveaux}}(g_i) - 1}; 1 \right] \quad \text{Éq. 15}$$

Avec :

- $g_i(a_j)$: la nouvelle valeur sur 50 points de l'alternative j sur l'indicateur i
- $h_i(a_j)$: l'ancienne valeur de l'alternative j sur l'indicateur i
- $\text{Nbre}_{\text{niveaux}}(g_i)$: le nombre de valeurs de l'ancienne échelle de performance de l'indicateur i
- $\text{ARRONDI}[x; 1]$: fonction permettant de retourner la valeur arrondie à la première décimale de x

Nous obtenons ainsi le tableau de correspondance suivant (Figure 51) où les valeurs de 1 à 5 sur fond colorés correspondent aux niveaux de performance des indicateurs sur leurs anciennes échelles d'évaluation (i.e. $h_i(a_j)$) et les valeurs correspondantes sur fond noir à leur transposition numérique sur une échelle de valeurs allant de 0 à 50 points (i.e. $g(a_j)$):

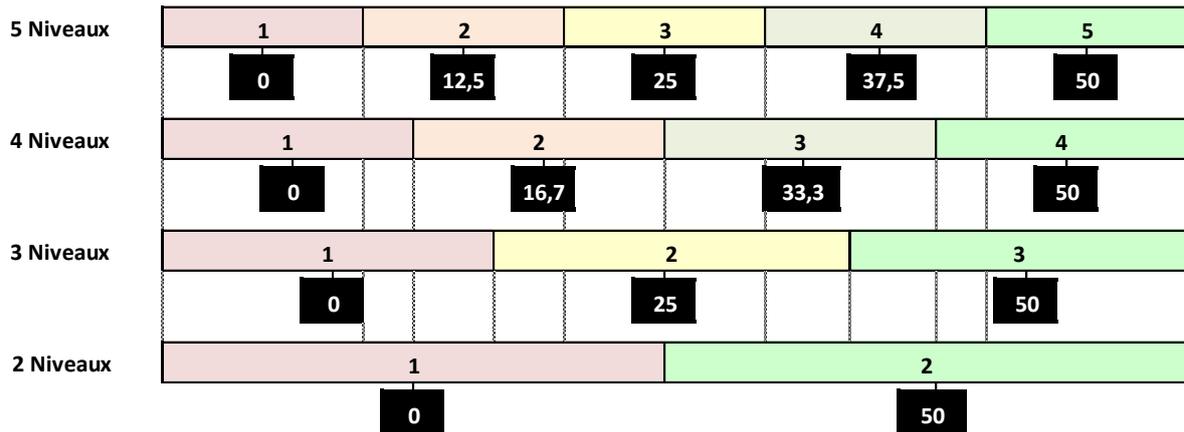


Figure 51 – Transposition des niveaux de performance des indicateurs sur 50 points

Alternative de référence

Ensuite il convient de définir les alternatives de références permettant de délimiter les frontières performantielles des catégories souhaitées. Dans notre cas, seules deux catégories sont constituées : « C₁ : non acceptable ; C₂ : acceptable ». Une seule alternative de référence est alors nécessaire pour délimiter C₁ de C₂.

L'alternative de référence à définir doit servir de filtre permettant la catégorisation des alternatives potentielles. Les valeurs de ses critères doivent, par conséquent, correspondre à un profil de performance plus exigeant que le $PGP_{\text{corrigé}}$ qui a été utilisé comme fonction multi-objectif dans le réseau bayésien pour générer un sous-ensemble d'alternatives déjà performantes.

Nous fixons le profil de valeurs comme suit :

$$g_i(b_1) = \text{MIN}[50 ; g_i(PGP_{\text{corrigé}}) + X] \quad \text{Éq. 16}$$

Avec :

- $g_i(b_1)$: la valeur sur 50 points de l'alternative de référence b_1 sur l'indicateur i
- $g_i(PGP_{\text{corrigé}})$: la valeur sur 50 points du $PGP_{\text{corrigé}}$ sur l'indicateur i , calculée à partir de l'équation Éq. 15
- X : entier positif modélisant une contrainte supplémentaire exigée sur le $g_i(PGP_{\text{corrigé}})$ de chaque indicateur et utilisée pour discriminer les alternatives les moins performantes.

La détermination des valeurs nominales des critères i pour cette alternative de référence $g_i(b_1)$, est propre à chaque opération de rénovation. Nous devons réaliser des études paramétriques, en testant une série de valeurs nominales de plus en plus contraignantes sur les critères de cette alternative de référence (en augmentant graduellement la valeur de X dans Éq. 16), afin d'identifier un profil de valeur permettant d'obtenir en sortie de la méthode ELECTRE TRI, un nombre acceptable d'alternatives dans la catégorie C₂. L'objectif est de « filtrer » suffisamment le jeu d'alternatives a priori performantes, généré dans le sous-modèle précédent, pour ensuite classer les alternatives de rénovation catégorisées dans la « meilleure » catégorie avec la méthode ELECTRE III.

Cette étape de calibrage des valeurs nominales des critères de l'alternative de référence n'a pas été automatisée dans le cadre de ces travaux de thèse. Pour l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire, la valeur de X dans Éq. 16 utilisée pour définir l'alternative de référence de la méthode de catégorisation vaut 8.

Poids des critères

À chaque critère de décision intervenant dans le processus d'affectation des alternatives à une catégorie, un poids w_i est nécessaire. Nous prenons les valeurs du $PPR_{\text{corrigé}}$ correspondant aux critères retenus pour tenir le rôle de poids dans les méthodes ELECTRE. La détermination de ces valeurs est détaillée dans le sous-modèle M' dédié à la formalisation des préférences du décideur.

$$w_i = PPR_{\text{corrigé}}(i) \quad \text{Éq. 17}$$

Seuils intervenant dans les relations de surclassement

Chaque critère évaluant les alternatives à catégoriser peut prendre une valeur définie sur une échelle de valeurs allant de 0 à 50. De part cette méthode d'évaluation, les seuils d'indifférence (q), de préférence (p) et de véto (v) à définir, doivent nécessairement correspondre à des écarts de valeurs de performance par critères entre deux alternatives allant de 0 à 50. Par soucis de simplification, nous attribuons les mêmes valeurs nominales q_i , p_i et v_i à chaque critères de décision.

La détermination des valeurs nominales des seuils q , p et v , est propre à chaque opération de rénovation.

Cette étape de calibrage des valeurs nominales n'a pas été automatisée dans le cadre de ces travaux de thèse. Pour l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire, nous avons recherché les valeurs nominales de ces paramètres permettant d'obtenir une quantité d'alternatives retenues dans la catégorie « acceptable » avoisinant les 10 à 20 unités. Cette recherche nous amène à définir les intervalles de valeurs suivant :

- *Seuils d'indifférence (q) : $5 < q < 9$*
- *Seuils de préférence (p) : $9 < p < 15$*
- *Seuils de véto (v) : $20 < p < 35$*

Plus nous augmentons la distance $|p - q|$, plus le nombre d'alternatives retenus est grand ; et inversement. Nous obtenons le même constat en faisant varier la distance $|v - p|$. Cela paraît logique car la distance $|p - q|$ représente la plage de tolérance dans l'acceptation des incertitudes associées à l'évaluation des alternatives comparées sur chaque critère. De manière analogue, la distance $|v - p|$ représente la plage d'acceptation d'alternatives incomparables. En d'autres termes, plus cette distance est faible, plus un grand nombre d'alternatives sera jugé comme incomparable par l'algorithme de tri, et par conséquent ne pourra être retenue dans la catégorie « acceptable ».

Par cette étude, nous faisons le choix de retenir le jeu de valeurs nominales du Tableau 36 pour les seuils q , p et v .

Tableau 36 – Paramètres intracritère de la méthode ELECTRE TRI

Seuils	Valeurs nominales prise pour chaque critère
Seuil d'indifférence (q)	7
Seuil de préférence (p)	12
Seuil de véto (v)	25

Seuil de coupe

Le seuil de coupe est utilisé dans les procédures d'affectation des alternatives aux catégories « C₁ : non acceptable » et « C₂ : acceptable ». Le concepteur de la méthode ELECTRE TRI, préconise l'utilisation d'un seuil de coupe fixé entre 0.65 et 0.85 dans [129]. Nous prenons donc une valeur nominale de 0.75. Plus la valeur prise par ce paramètre est élevée, plus l'affectation des alternatives à la meilleure catégorie est laxiste ; et inversement. Il est à préciser également que la valeur de ce paramètre dépend peu du projet de rénovation traité.

III.6.1.3 Traitement des sorties de la méthode

Après application de la méthode de catégorisation à un projet de rénovation, nous obtenons deux classements pour chaque alternative : un par procédure d'affectation optimiste, un par procédure d'affectation pessimiste. Le classement de chaque alternative avec les deux procédures peut être identique ou non. Le classement pessimiste est obligatoirement inférieur au classement optimiste. La matrice suivante (Figure 52), inspirée des travaux de Rahal [146], nous permet d'affecter à chaque combinaison restante des classements pessimiste et optimiste des alternatives, un score de base compris entre 0 et 2. Plus ce score est élevé, meilleures sont les alternatives classées dans cette catégorie.

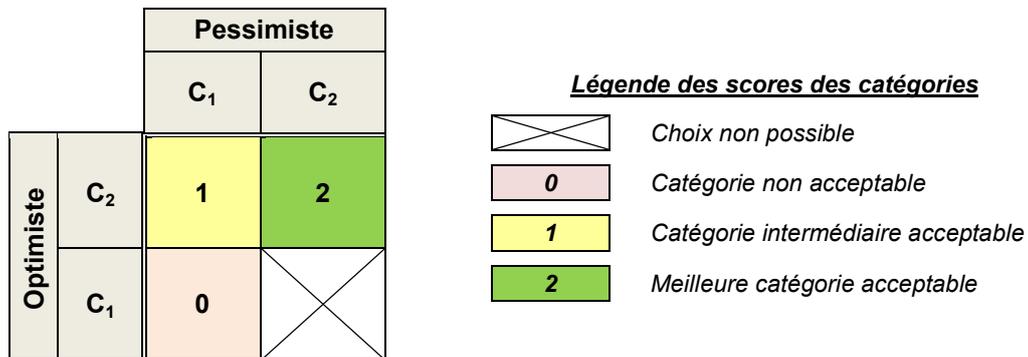


Figure 52 – Matrice d'affectation du score final ELECTRE TRI

Pour résumer, si une alternative potentielle de rénovation se voit attribuer la catégorie « C₁ : non acceptable » par classement pessimiste et la catégorie « C₂ : acceptable » par classement optimiste, le score final attribué sera « 1 ».

III.6.1.4 Prise en compte des incertitudes liées à la méthode

Pour rappel, l'utilisation des méthodes ELECTRE a pour objectif d'obtenir automatiquement un score final par alternative potentielle de rénovation. Cette méthode doit rester transparente à l'utilisateur mais doit également fournir des résultats robustes aux incertitudes liées aux paramètres *dits sensibles* de la méthode. Pour s'assurer de cette robustesse des scores finaux obtenus, un protocole d'analyse de sensibilité paramétrique automatisé est mis en place.

Études paramétriques

Dans les analyses de sensibilité effectuées, nous nous intéressons aux incertitudes associées aux paramètres ELECTRE listés dans la première colonne du Tableau 37. Nous décidons de faire varier les valeurs nominales prises par chacun de ces 6 types de paramètres sur des intervalles discrets préétablis. Par combinatoire, en respectant la condition suivante « $q \leq p \leq v$ » qui est nécessaire au principe de surclassement des méthodes ELECTRE, nous générons de manière automatique 1080 combinaisons de valeurs de ces paramètres.

Tableau 37 – Paramètres sensibles aux incertitudes de la méthode ELECTRE TRI

Paramètres sensibles	Valeurs nominales	Plages prédéfinies de variation			
		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Seuils d'indifférence (q)	7	5	9	-	-
Seuils de préférence (p)	12	9	15	-	-
Seuils de véto (v)	25	20	35	-	-
seuils de coupe (λ)	0,75	0,65	0,7	0,8	0,85
Poids des critères (w)	w_i	$w_i^{2 \cdot Ampl} *$	$w_i^{5 \cdot Ampl} **$	-	-
Alternative de référence (b_1)	$g_i(b_1)$	$g_i(b_1) - 5$	$\max[50; g_i(b_1) + 5]$	-	-

* $2 \cdot Ampl = 2 \cdot (w_i - \tilde{w}) + \tilde{w}$ avec \tilde{w} : la médiane du jeu de poids w_i

** $5 \cdot Ampl = 5 \cdot (w_i - \tilde{w}) + \tilde{w}$ avec \tilde{w} : la médiane du jeu de poids w_i

Affectation d'un score final à chaque alternative

Pour chacun des 1080 lancés de simulation avec ELECTRE TRI, un score final est obtenu pour chaque alternative potentielle de rénovation comparée. Le score final obtenu le plus fréquemment pour chaque alternative est retenu comme score le plus stable (i.e. affectation à l'occurrence de scores obtenus la plus élevée).

L'ensemble des alternatives potentielles de rénovation ayant maintenant un score final intégrant une part des incertitudes associées à la méthode de surclassement, une sélection de l'ensemble des alternatives les plus performantes peut être réalisée. Nous décidons de retenir pour le processus de classement multicritère avec la méthode ELECTRE III, le sous-groupe d'alternatives potentielles de rénovation possédant le score final le plus haut.

III.6.2 Classement ordinal des alternatives potentielles de rénovation retenues par la méthode ELECTRE III

Une fois le sous-ensemble d'alternatives potentielles de rénovation le plus performant défini par la méthode ELECTRE TRI, nous décidons d'appliquer une variante simplifiée de la méthode ELECTRE III pour obtenir un classement ordinal des alternatives restantes par ordre décroissant de performance.

III.6.2.1 Principe de la méthode

La méthode ELECTRE III vise à établir un classement final, appelé préordre partiel, des alternatives comparées. Cette méthode, dans sa version classique, autorise les exæquo et permet de mettre en évidence des incomparabilités (ensembles d'alternatives ayant des performances multicritères trop disparates pour être comparables). Les premières étapes d'application de la méthode ELECTRE III sont similaires à celles d'ELECTRE TRI. À l'exception du fait que cette fois les alternatives sont comparées entre-elles, par paires, et non pas à une alternative de référence. À cette différence près, les mêmes paramètres sont nécessaires :

- un ensemble d'alternatives ou actions potentielle : $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ à comparer ;
- un ensemble de critères de décision : $G = \{g_1, g_2, \dots, g_h\}$ évaluant chaque alternative de l'ensemble A ;
- des poids traduisant l'importance de chaque critère : $W = \{w_1, w_2, \dots, w_h\}$;
- des seuils d'indifférence (q), de préférence (p) et de véto (v) sur chaque critère ;
- un seuil de coupe λ ⁶⁸.

⁶⁸ Pour la variante simplifiée que nous utilisons ci-après, ce seuil de coupe n'a plus d'utilité et nous pouvons par conséquent très bien s'en passer.

Comme pour ELECTRE TRI, à partir du tableau de performance dressé pour une problématique de classement, la première étape de la méthode consiste à comparer pour chaque critère g_i les distances $|g_i(a_j) - g_i(a_k)|$ avec les seuils q_i , p_i et v_i . Cette comparaison est faite sur chaque critère, par paire d'alternatives (ici, a_j et a_k). Ces comparaisons permettent alors le calcul d'indices de concordance et discordance, puis par la suite, le calcul de degrés de crédibilité $\delta_{jk}(a_j, a_k)$.

À partir de cette étape, les méthodes TRI et III divergent. Là, l'algorithme classique de la méthode ELECTRE III, utilise le seuil de coupe pour établir les relations de surclassement entre alternatives pour obtenir deux pré-classements : un par distillation ascendante, un par distillation descendante. De ces deux classements, un préordre final est déduit, permettant de classer par ordre de performance les alternatives comparées.

En lieu et place des étapes de distillations ascendante et descendante, nous préférons utiliser la variante simplifiée de [SISKOS et HUBER, 1983] et [LOCHARD et SISKOS, 1983] définie dans l'ouvrage "Maystre, L.Y., et al., *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. 1994: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*" à la page 105" [145].

Dans cette variante, le mode de classement est beaucoup plus simple que l'original. À partir des degrés de crédibilité (δ_{jk}), on calcule un **degré de non-dominance** ($\mu^{ND}(a_j)$) de l'alternative par rapport à toutes les autres. Plus le degré de non-dominance est grand, plus l'alternative a_j est préférée. On obtient ainsi un classement ordinal des alternatives par valeurs décroissantes des degrés de non-dominance calculés pour chaque alternative.

$$\mu^{ND}(a_j) = 1 - \max(\delta_{kj} - \delta_{jk}) \quad \text{Éq. 18}$$

Le recours à cette variante est principalement motivé par la rapidité d'exécution de l'algorithme et sa capacité à ne pas exclure les alternatives incomparables avec la méthode classique. En effet la notion d'incomparabilité est difficilement compréhensible pour un décideur qui ne cherche qu'à obtenir un classement tangible des options qui s'offrent à lui. Néanmoins, cette variante fait disparaître la notion d'ex-aequo qui est indispensable dans une logique de classement. Pour pallier ce problème, nous décidons arbitrairement de considérer les alternatives de rénovation ayant une différence de degré de-dominance inférieure à 0.01 comme équivalentes en terme de performance globale.

$$\text{si } \text{abs}(\mu^{ND}(a_j) - \mu^{ND}(a_k)) < 0.01, \quad \text{Éq. 19}$$

alors les alternatives a_j et a_k se voient attribuer le même rang dans le classement

III.6.2.2 Mise en place de la méthode

Nous commençons par reprendre le Tableau de Performance dressé pour la méthode ELECTRE TRI, mais en ne tenant plus compte des lignes correspondants aux alternatives de référence (voir Tableau 35). Nous ne sélectionnons pour ce futur classement que les alternatives potentielles de rénovation retenues en sortie de la méthode ELECTRE TRI. Les critères de décision pris en compte sont les mêmes que précédemment, ainsi que les poids w_i qui leur étaient associés. Les valeurs nominales q_i , p_i et v_i sur respectivement les seuils d'indifférence, de préférence et de véto, sont identiques à celles prises dans le Tableau 36.

III.6.2.3 Traitement des sorties de la méthode

Avec l'ensemble de ces données et l'application de la méthode ELECTRE III dans sa version simplifiée, des degrés de non-dominance $\mu^{ND}(a_j)$ sont calculés pour chacune des

alternatives comparées. Un classement final, pour ce jeu de paramètres (q_i , p_i , v_i et w_i), est obtenu en classant les alternatives par ordre décroissant de degrés de non-dominance. Nous décidons de considérer comme ex-aequo les alternatives ayant un écart de valeur sur les $\mu^{ND}(a_j)$ de moins de 0.01.

III.6.2.4 Prise en compte des incertitudes liées à la méthode

Comme pour ELECTRE TRI, des analyses paramétriques sont réalisées pour tenir compte des incertitudes associées à la prise de valeur des paramètres intra et intercritères de la méthode (q_i , p_i , v_i et w_i). Nous décidons de faire varier les valeurs nominales prises par chacun de ces 4 types de paramètres sur des intervalles discrets préétablis (Tableau 38). Par combinatoire, en respectant la condition suivante « $q \leq p \leq v$ », nous générons de manière automatique 72 combinaisons de valeurs de ces paramètres.

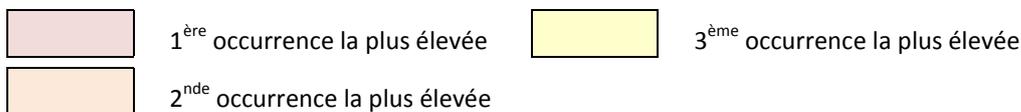
Tableau 38 – Paramètres sensibles aux incertitudes de la méthode ELECTRE III (variante simplifiée)

Paramètres sensibles	Valeurs nominales	Plages prédéfinies de variation	
		Variante 1	Variante 2
Seuil d'indifférence (q)	7	5	9
Seuil de préférence (p)	12	9	15
Seuil de véto (v)	25	20	35
Poids des critères (w)	w_i	$w_i^{2 \cdot Ampl}$	$w_i^{5 \cdot Ampl}$

Pour chacun des 72 lancés de simulation avec ELECTRE III, un classement ordinal supportant les exæquos est obtenu pour l'ensemble des alternatives potentielles de rénovation comparées. Le rang obtenu le plus fréquemment pour chaque alternative est retenu comme le rang définitif du classement final. Si plusieurs alternatives obtiennent la même occurrence maximale sur un rang, le départage final sur ce type d'exæquo se fait sur les rangs obtenant la seconde occurrence maximale et ainsi de suite. Si deux ou plusieurs alternatives obtiennent exactement la même distribution d'occurrences sur les rangs des classements ELECTRE III, elles sont alors jugées comme ex-aequo et prennent le même rang. Un exemple pratique, correspondant à la mise en œuvre de l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire, est proposé en Tableau 39.

Tableau 39 – Exemple de traitement des occurrences sur les rangs, pour classer 16 alternatives de rénovation à partir des fréquences sur les rangs obtenues après 72 tirages

Occurrence des affectations de 16 alternatives de rénovation sur les premiers rangs d'un classement ELECTRE									Rang Final
N° Alt.	Rang_1	Rang_2	Rang_3	Rang_4	Rang_5	Rang_6	Rang_7	Rang_8	
92	100 %	-	-	-	-	-	-	-	1
90	-	100 %	-	-	-	-	-	-	2 ex
94	-	100 %	-	-	-	-	-	-	2 ex
91	-	33 %	67 %	-	-	-	-	-	3 ex
95	-	33 %	67 %	-	-	-	-	-	3 ex
96	-	33 %	33 %	33 %	-	-	-	-	4
124	-	-	33 %	67 %	-	-	-	-	5 ex
128	-	-	33 %	67 %	-	-	-	-	5 ex
89	-	-	-	67 %	33 %	-	-	-	6 ex
93	-	-	-	67 %	33 %	-	-	-	6 ex
122	-	-	-	-	67 %	33 %	-	-	7 ex
126	-	-	-	-	67 %	33 %	-	-	7 ex
123	-	-	-	-	33 %	33 %	33 %	-	8 ex
127	-	-	-	-	33 %	33 %	33 %	-	8 ex
121	-	-	-	-	-	33 %	33 %	33 %	9 ex
125	-	-	-	-	-	33 %	33 %	33 %	9 ex



III.6.3 Tableau de bord

À l'issue de cette partie du sous-modèle dédiée à l'obtention automatique d'un classement multicritère des alternatives de rénovation générées par le réseau bayésien, nous obtenons un classement ordinal des alternatives les plus performantes aux yeux de la maîtrise d'ouvrage. Ce classement est présenté à la maîtrise d'ouvrage à travers un tableau de bord permettant deux types d'actions.

La première est l'étude détaillée du classement final obtenu. La maîtrise d'ouvrage et le professionnel peuvent consulter le contenu des alternatives et aller vérifier les performances intrinsèques de chaque familles de procédés les composants.

La seconde consiste à offrir la possibilité au professionnel d'analyser, grâce au réseau bayésien préalablement généré dans le sous-modèle M5 décrit en §III.5.3 de la méthodologie, ses propres alternatives de rénovation, en testant tour à tour les combinaisons de familles de procédés qui l'intéressent. Cette fonctionnalité a deux buts :

- permettre de reprendre la main sur la génération automatisée des alternatives et d'évaluer les performances multicritères de l'alternative imaginée par le professionnel ;
- de vérifier si la combinaison de familles de procédés testée est compatible avec les caractéristiques techniques du bâti à rénover, ainsi que de vérifier l'absence

d'apparition de risques potentiels (grâce aux notes obtenues sur les indicateurs de risques).

Ce sous-modèle a pour finalité d'automatiser le classement multicritère des alternatives identifiées comme les plus pertinentes par l'outil d'inférence bayésienne. Le protocole d'affectation à un rang sur le classement ordinal final est décrit, les points sensibles hérités des méthodes de surclassement débattues et les incertitudes sur la prise de valeur de certains paramètres traitées par analyses de sensibilité. Seule la procédure de calibrage de certains paramètres des algorithmes ELECTRE reste manuelle. Le franchissement de cet obstacle par un professionnel du bâtiment, dans la version actuelle de notre méthodologie d'aide à la décision, nécessite une formation didactique sur le fonctionnement de ces outils.

Enfin un tableau de bord est proposé pour représenter les classements obtenus ainsi que laisser l'opportunité au professionnel en charge de l'opération de rénovation de tester l'absence de risques, la compatibilité, et les performances multicritères de ses propres combinaisons de familles de procédés de rénovation.

IV. Conclusion sur la méthode complète proposée

L'objectif principal de cette partie du document était de répondre aux attentes exprimées dans le cahier des charges établi en début de partie (en page 98). À savoir, proposer une méthodologie d'aide à la décision pour la prescription de scénarios de rénovation, en phase d'études préalables, pour les opérations de rénovation légères et moyennes de maisons individuelles françaises dotées de modes constructifs représentatifs de la période 1945-1974. La réponse apportée devait également tenter de faire face aux problématiques scientifiques et techniques mises en avant à la fin de l'état de l'art. Ces obstacles à la mise en œuvre d'une telle méthodologie visaient : la prise en compte des enjeux de réhabilitation exprimés par la maîtrise d'ouvrage avec son propre vocabulaire, la formalisation de connaissances expertes hétérogènes et diffuses dans un modèle unique d'inférence, l'intégration des incertitudes liées à la caractérisation technique d'un bâti à rénover dans le processus décisionnel. Enfin, l'ensemble de ces points devait être intégré dans une démarche globale (systématique et multicritère) de l'acte de rénovation.

En ce sens, la méthodologie générale développée se veut fonctionnelle et répond à la plupart des conditions initiales requises. Nous allons voir ci-après et plus précisément dans quelles mesures le cahier des charges énoncé a été respecté, et son périmètre étendu ou contracté.

Le sous-modèle M4, dédié à *la formalisation des préférences du décideur*, permet pour chaque opération de rénovation traitée, de laisser la maîtrise d'ouvrage exprimer ses besoins sous la forme d'enjeux opérationnels puis de les convertir automatiquement – via un processus experts – en jeux de données d'entrées compatibles avec des algorithmes d'optimisation et de classements multicritères, pour respectivement concevoir et hiérarchiser des scénarios de rénovation pertinents.

Au niveau du besoin initial de capitaliser puis formaliser des connaissances expertes hétérogènes dans un modèle unique de raisonnement, le choix final s'est porté sur la technologie des réseaux bayésiens. En plus de pouvoir inférer des connaissances par chaînage mixte (nous les utilisons dans le sous-modèle M5 pour rechercher puis évaluer les performances multicritères de scénarios de rénovation), ce type de modélisation est probabiliste ; c'est-à-dire qu'il permet de codifier, propager et restituer des informations incertaines sous la forme de distributions de probabilités.

Ensuite, le recours aux méthodes d'aide à la décision multicritère ELECTRE nous a permis de continuer à propager les incertitudes jusqu'au classement final des meilleurs alternatives (sous-modèle M6).

En prenant du recul, la méthodologie générale déployée permet de mener de bout-en-bout un processus d'aide à la décision pour prescrire et évaluer des scénarios de rénovation adaptés à chaque situation et en tenant compte de l'incertain, des préférences des décideurs et des spécificités connues de l'existant.

Bien qu'initialement conçu pour le périmètre restreint des maisons individuelles de la période 1945-1974, la démarche méthodologique développée peut très bien s'étendre à d'autres types de bâtiment, à la condition de capitaliser préalablement les connaissances expertes propres au nouveau périmètre d'étude envisagé. Cela afin de calibrer correctement les sous-modèles M3, M4 et M5.

La partie suivante vise à mettre en application la méthodologie développée sur une étude de cas pour confronter la théorie avec la pratique. L'analyse qui en découlera permettra de statuer sur la pertinence de la démarche suivie, mais aussi d'identifier la cohérence des sorties proposées et les points d'amélioration à suivre pour de possibles travaux de recherche se basant sur une thématique similaire.

Quatrième partie : Mise en application de la méthode développée

I. Objectifs de la mise en œuvre.....	198
II. Application de la méthodologie	198
II.1 Présentation de l'opération de rénovation utilisée comme étude de cas	199
II.2 Déroulement du processus méthodologique	200
II.3 Conclusion sur la mise en œuvre de la méthodologie.....	213
III. Retours des professionnels du bâtiment	216
III.1 Professionnels de la mise en œuvre (artisans, entrepreneurs...)	216
III.2 Professionnels de la conception	217

I. Objectifs de la mise en œuvre

La méthodologie décrite dans la partie précédente fait intervenir de nombreuses notions parfois orientées *métiers* (décomposition fonctionnelle du bâtiment, évaluation multicritère) parfois orientées *méthodes* (explicitation des préférences, inférence probabiliste, classements multicritères). La mise en œuvre de ces notions – appelant aussi bien des connaissances génériques que les informations spécifiques à chaque opération étudiée – en un tout, vu comme un outil d'aide à la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, peut s'avérer complexe. L'utilité de la présentation de la mise en œuvre de la méthodologie, à travers un cas d'application d'une rénovation énergétique de maison individuelle, est multiple. Les objectifs sont :

- de montrer la faisabilité du processus présenté ;
- d'échanger avec un tandem *maîtrise d'ouvrage/professionnel* sur la pertinence de l'approche ;
- d'analyser la pertinence des résultats produits ;
- d'identifier les points de blocage et les pistes potentielles d'amélioration.

Ces points seront repris en conclusion de la partie.

II. Application de la méthodologie

La méthodologie développée dans la troisième partie de ce mémoire a été testée sur 5 différents cas d'application, plus ou moins éloignés du périmètre d'étude initialement fixé (pour rappel, la maison individuelle de la période 1945-1974). Ces études de cas de rénovation, planifiées ou en cours de réalisation, furent possible grâce à la collaboration de propriétaires de maisons individuelles ainsi qu'aux différents partenariats universitaires et professionnels engagés. Ces études de cas, mises à notre disposition, ciblaient :

- deux maisons individuelles des années 70-80, situées respectivement à La Rochelle et dans l'arrière-pays Niçois ;
- une maison individuelle construite en 2007 à Cannes ;
- un immeuble collectif de 1973 à Saint-Rémy-de-Maurienne en Savoie ;
- et un immeuble collectif de 1974 à Nice.

L'analyse de ces différents projets de rénovation énergétique ont permis de confronter l'approche théorique à la réalité du terrain et à valider l'ensemble de la démarche. Les nombreuses situations rencontrées ont permis l'ajustement de certains sous-modèles utilisés et l'amélioration des connaissances expertes capitalisées dans le processus global d'aide à la décision. L'étude de cas retenue pour la mise en application de la méthodologie à travers

un prototype informatique correspond au travail d'analyse le plus complet, celui de la maison individuelle de La Rochelle.

II.1 Présentation de l'opération de rénovation utilisée comme étude de cas

L'opération de rénovation retenue pour illustrer l'application de la méthodologie développée est celle d'une maison individuelle construite dans la banlieue industrielle de La Rochelle, en Charente-Maritime (17).

Maison de la marque de constructeur Tradi actuellement non habitée et récemment rachetée par le groupe Géoxia, sa rénovation se veut exemplaire et doit servir de vitrine à la branche rénovation du groupe (société Phénix Évolution). Bâtiment de plain-pied de 93m² de surface habitable et construit en 1983 avec des blocs de béton creux, il est très faiblement isolé thermiquement : murs non isolés, plancher sur terre-plein non isolé, comble-perdus avec 10cm d'isolation vieillissante par pose de rouleaux de laine de verre ; menuiseries de type simple vitrage avec dormant en bois. Côté équipements énergétiques, la maison est équipée d'une ventilation générale naturelle (l'extraction de l'air vicié se fait par tirage thermique), de radiateurs muraux (convecteurs électriques) et d'un ballon électrique d'eau chaude sanitaire (300L).

Côté financement des travaux de rénovation, la société Phénix Évolution dispose d'une enveloppe budgétaire adaptée mais souhaite néanmoins maîtriser le coût des travaux afin de pouvoir transposer les solutions d'amélioration mises en œuvre à d'autres maisons individuelles du parc de maisons Géoxia. Le problème majeur de ce bâtiment est son manque de confort acoustique vis-à-vis des nuisances sonores extérieures dues à la rocade passant à juste derrière le jardin.

Bien que cette étude de cas sorte légèrement du périmètre initialement fixé – *maison individuelle construite sur la période 1945-1974 et surtout comme logement principal par son propriétaire* – cette opération de rénovation reste intéressante dans la mesure où sa typologie respecte le périmètre fixé et que les informations techniques la concernant sont nombreuses. Les enjeux principaux, associés à cette opération de rénovation, sont la réduction des nuisances acoustiques extérieures ainsi que l'amélioration du confort thermique. Nous allons voir comment la méthodologie déployée peut y répondre.



Figure 53 – Vue aérienne et photographie de la maison individuelle servant d'étude de cas

La méthode d'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, développée dans le cadre de ces travaux de recherche, va être déroulée pour proposer à la maîtrise d'ouvrage (ici le responsable commercial de la société Phénix Évolution) plusieurs scénarios de rénovation répondant au mieux aux spécificités techniques du bâti originel et des préférences exprimées à travers de notre grille d'enjeux. Le rôle du professionnel est attribué au responsable technique de la même société. Ce dernier utilise la méthodologie pour proposer à la maîtrise d'ouvrage des scénarios d'améliorations évalués par un panel d'indicateurs de performance.

Comme décrit en page 99 de ce document, la mise en œuvre de la méthodologie nécessite 4 phases, dont 3 interagissant directement avec le tandem maîtrise d'ouvrage/professionnel. Nous allons aborder par la suite, chacune de ces phases, depuis la définition des enjeux, jusqu'à l'obtention d'un classement ordinal d'un sous-ensemble de scénarios d'amélioration énergétique, compatibles et efficaces.

II.2 Déroulement du processus méthodologique

Comme présenté au chapitre II.1 de la Partie 3 du mémoire, le processus méthodologique se déroule en 4 phases successives :

- 1) définition des enjeux ;
- 2) diagnostic global étendu ;
- 3) génération puis évaluation automatisée des alternatives potentielles de rénovation ;
- 4) tri et réalisation d'un classement ordinal des alternatives les plus efficaces.

II.2.1 PHASE 1 / Définition des enjeux

Durée de mise en œuvre de la phase : 5 minutes.

Cette première phase opérationnelle a pour finalité de collecter et de formaliser les préférences de la maîtrise d'ouvrage afin de pouvoir générer des profils de préférences (PGP_{corrigé} et PPR_{corrigé}) nécessaires à la mise en œuvre de la méthodologie. Deux tâches sont à réaliser pour y parvenir : la sélection d'enjeux correspondant le mieux au besoin exprimé, ainsi que la priorisation de ces enjeux.

II.2.1.1 Sélection des enjeux

Parmi la liste des 33 enjeux de rénovation les plus courants pour notre périmètre d'étude (liste complète disponible à la page 152), la maîtrise d'ouvrage sélectionne les enjeux suivants :

- O-11 / Sensations de courants d'air (FO : Amélioration du confort)
- O-13 / Nuisance acoustique (FO : Amélioration du confort)
- O-15 / Surchauffes estivales (FO : Amélioration du confort)
- O-19 / Modification de l'aspect esthétique extérieur (FO : Modernisation du bâti)
- C-1 / Enveloppe budgétaire raisonnable (FC : Maîtrise du budget)

La maîtrise d'ouvrage trouve dans la liste proposée les enjeux qui correspondent à ses attentes, à savoir améliorer le confort général des futurs occupants du bâti (surtout les aspects *confort acoustique* et *confort estival*) tout en maîtrisant l'enveloppe budgétaire.

II.2.1.2 Pondération des enjeux sélectionnés

Afin de bien clarifier les attentes de la maîtrise d'ouvrage, cette dernière doit prioriser ses attentes. Cela permettra d'affecter un poids pertinent aux enjeux sélectionnés. Cette priorisation se fait par familles d'enjeux (FO et FC) en utilisant la méthode de pondération AHP.

Comme présentée dans l'Annexe D, la mise en œuvre de cette méthode de pondération nécessite le remplissage d'une matrice triangulaire supérieure-droite. Cette matrice permet d'affecter à chaque paire de familles d'enjeux sélectionnés, un score correspondant à l'importance relative d'une famille par rapport à l'autre. Ici, « l'amélioration du confort » est considérée comme plus importante que la « modernisation du bâti » (score = 3) ; « l'amélioration du confort » est considérée comme un peu plus importante que la « maîtrise du budget » (score = 2) ; la « modernisation du bâti » est jugée comme un peu moins

importante que la « maîtrise du budget » (score = 1/2). La matrice obtenue en prenant l'échelle de scores présentée en Tableau 48 de l'Annexe D, correspond au Tableau 40.

Tableau 40 – Matrice de comparaison des familles d'enjeux sélectionnés par paire



	Amélioration du confort	Modernisation du bâti	Maîtrise du budget
Amélioration du confort	1	3	2
Modernisation du bâti	1/3	1	1/2
Maîtrise du budget	1/2	2	1

En déroulant la méthode de pondération AHP jusqu'au bout (voir le détail de la procédure en Annexe D), nous obtenons les poids suivants sur les enjeux sélectionnés.

- $w(O-11 : \text{Sensations de courants d'air}) = 0.539$
- $w(O-13 : \text{Nuisance acoustique}) = 0.539$
- $w(O-15 : \text{Surchauffes estivales}) = 0.539$
- $w(C-1 : \text{Enveloppe budgétaire raisonnable}) = 0.297$
- $w(O-19 : \text{Modification de l'aspect esthétique extérieur}) = 0.164$

Ces poids sont réinjectés dans la matrice d'influence générique finale croisant *enjeux de rénovation les plus courants* et *indicateurs de performance* (voir le sous-modèle M4 de la Partie 3 du mémoire). Ensuite, en déroulant l'intégralité de ce sous-modèle dédié à la formalisation des préférences du décideur, nous obtenons les profils de préférences $PPR_{\text{corrigé}}$ et $PGP_{\text{corrigé}}$ spécifiques à ce projet de rénovation. Ces derniers correspondent respectivement au profil de poids relatifs et au profil de niveaux-cibles sur les indicateurs de performance manipulés et utilisés dans les autres sous-modèles de la méthode d'aide à la décision (colonnes 3 et 4 du Tableau 41).

Une fois trié par ordre de valeurs décroissantes de $PPR_{\text{corrigé}}$, le $PGP_{\text{corrigé}}$ sert de vecteur de contraintes successives, lesquelles sont appliquées au réseau bayésien durant la phase 3 de notre méthode, pour rechercher les alternatives potentielles de rénovation les plus efficaces au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage.

Le $PPR_{\text{corrigé}}$, quant à lui, sert à définir les poids relatifs aux critères de décision (i.e. un sous-ensemble spécifique d'indicateurs de performance) utilisés dans les méthodes ELECTRE (phase 4).

Tableau 41 – PGP et PPR générés automatiquement pour l'étude de cas

ID	Indicateurs de Performance	PPR _{corrigé}	PGP _{corrigé}	Valeurs-Cibles													
				Très faible		Faible		Moyen		Bon		Excellent					
12	Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	17	100	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent									
11	Confort Thermique (estival)	14	80	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent									
13	Confort Acoustique (bruits intérieurs)	12	70	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent									
20	Taux de renouvellement d'air	12	70	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent									
10	Confort Thermique (hiver)	10	60	Très faible	Faible	Moyen	Bon	Excellent									
14	Confort Olfactif	8	50	Faible		Moyen	Bon	Bon									
1	Performance énergétique	8	70	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
22	Sécurité Incendie	8	50	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Bonne									
21	QAI (Particules, COx, NOx, COV)	8	50	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
3	Coût initial	8	45	Très onéreux	Onéreux	Moyen	économique	Très économique									
4	Coût de fonctionnement	7	40	Très onéreux	Onéreux	Moyen	économique	Très économique									
18	Modification de l'aspect visuel extérieur	3	18	Aucune	Très légère		Légère	Importante									
16	Temps de mise en oeuvre	2	12	Très long	Long	Moyen	Rapide	Très rapide									
5	Énergie grise	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
24	Protection contre l'intrusion	0	0	Non modifiée		Améliorée											
15	Modification de l'accès à la lumière naturelle	0	0	Légèrement diminué		Améliorée											
8	Changement Climatique	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
7	Déchets totaux	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
2	Projet utilisant des énergies renouvelables?	0	0	Non		Oui											
17	Intensité des travaux en site occupé	0	0	Très forte	Fort	Moyenne	Faible	Très faible									
9	Épuisement des ressources non énergétiques	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
6	Consommation d'eau (non liée à l'usage)	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									
23	Accessibilité	0	0	Réduite		Non modifiée	Améliorée										
19	Modification de la surface habitable	0	0	Réduite		Non modifiée	Agrandie										
25	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	0	0	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Excellente									

Les états colorés en orange correspondent à un niveau de performance insuffisant pour satisfaire les exigences de la maîtrise d'ouvrage. Les états colorés en vert correspondent à un niveau de performance supérieur aux exigences de la maîtrise d'ouvrage. Les états colorés en bleu correspondent au niveau de performance exigé par la maîtrise d'ouvrage (généralisé à partir de la sélection des enjeux de rénovation).

Ces deux profils sont présentés dans le Tableau 41 au niveau des troisième et quatrième colonnes. L'analyse experte multicritère mutualisée dans la matrice d'influence générique, additionnée aux poids sur les enjeux définis via la méthode AHP, nous permet d'obtenir des PPR et PGP cohérents aux regards des attentes exprimées par la maîtrise d'ouvrage. Sans surprise, des poids et niveaux-cibles élevés sont obtenus sur les indicateurs de performance suivant :

- IP-11 / Confort Thermique (estival) > *Excellent*
- IP-12 / Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs) > *Excellent*

Ainsi que des valeurs moyennes pour l'indicateur « IP-3 / Coût initial » (niveau-ciblé > *Moyen*) qui correspond partiellement au poids défini sur l'enjeu « C-1 / Maîtrise de l'enveloppe budgétaire ».

Par ailleurs, la connaissance experte mutualisée dans la matrice d'influence générique a permis de mettre en lumière des poids et niveaux-cibles de performance également assez élevés sur les indicateurs suivants :

- IP-1 / Performance énergétique > *Bonne*
- IP-4 / Coût de fonctionnement > *Moyen*
- IP-10 / Confort Thermique (hiver) > *Bon*
- IP-20 / Taux de renouvellement d'air > *Bon*
- IP-13 / Confort Acoustique (bruits intérieurs) > *Bon*

Ces valeurs et niveaux-cibles, non-négligeables, correspondent aux influences connexes associées aux enjeux sélectionnés ou bien aux niveaux minimums de performance exigés par le panel d'experts qui a contribué à la conception de cette méthode d'aide à la formalisation des préférences des décideurs.

II.2.2 PHASE 2 / Diagnostic global

Durée de mise en œuvre de la phase : 10 minutes.

Cette phase a une double utilité. Elle permet d'évaluer les performances multicritères de la maison individuelle avant rénovation, ainsi que de collecter toutes les informations techniques connues permettant de filtrer les familles de procédés de rénovation qui seront proposées dans les alternatives de rénovation générées à l'issue de la phase 3 du déroulement de la méthode.

II.2.2.1 Évaluation du confort et de la qualité d'usage avant rénovation

En se basant sur une grille d'évaluation de certains indicateurs, sur la liste de réponses sur les spécificités techniques (ST) connues de l'existant et sur la liste de familles de procédés correspondant au mieux à la situation initiale (avant rénovation), le modèle d'inférence probabiliste calcule la performance multicritère des 25 indicateurs de performance et des 4 indicateurs de risques modélisés. En appliquant le processus définis dans le sous-modèle M5 en page 174, nous récupérons, grâce à des formulaires donnés à remplir par le professionnel, les informations suivantes présentées dans les Tableau 42, Tableau 43 et Tableau 44.

▪ Évaluation subjective des indicateurs de performance IP-10 à IP-14 et IP-25

À travers un premier formulaire, le professionnel demande aux occupants d'apprécier le niveau de performance ressenti sur certains indicateurs de performance, pour la situation avant rénovation, avec l'aide des échelles de notations présentées dans le Tableau 42.

Tableau 42 – Notation subjective de 6 indicateurs de performance pour la situation initiale (avant rénovation)

Cible	ID	Indicateurs	Échelles ordinales de notation				
			1	2	3	4	5
Confort	IP-10	Confort thermique (hiver)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	IP-11	Confort thermique (estival)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	IP-12	Confort acoustique (bruits aériens extérieurs)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	IP-13	Confort acoustique (bruits intérieurs)	très faible	faible	moyen	bon	excellent
	IP-14	Confort olfactif	faible	moyen	bon		
Qualité d'usage	IP-25	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	très faible	faible	moyenne	bonne	excellente

Les champs colorés dans le Tableau 42 correspondent aux réponses de la maîtrise d'ouvrage.

▪ Évaluation technique des Spécificités Techniques (ST) connues

Le renseignement des états connus de chaque ST proposée dans un second formulaire de saisie, lors de la phase diagnostic, permet d'alimenter une partie des fonctions d'impacts embarquées dans le réseau bayésien utilisé pour évaluer la performance multicritère de certains indicateurs de performance et indicateurs de risques potentiels.

Les réponses apportées par le professionnel sur cette étude de cas sont capitalisées dans le Tableau 43.

Tableau 43 – Réponses au formulaire de collecte des Spécificités Techniques connues

ID	Spécificités Techniques	états retenus
ST_1	Surventilation nocturne possible	oui
ST_2	Présence de cheminée ou d'un poêle à bois	non
ST_3	Logement traversant	oui
ST_4	Ouvertures de façade importantes « côté Sud »	non
ST_5	Présence de murs mitoyens et/ou de murs enterrés	non

Dans cette étude de cas, toutes les ST sont renseignées. Cela signifie qu'il n'y a aucune inconnue dans le système d'évaluation des performances multicritères à l'aide des fonctions d'impacts décrit dans le sous-modèle M3 de la Partie 3. L'évaluation des indicateurs de performance sera donc déterministe : il n'y aura pas de distributions de probabilités après inférence au niveau des nœuds modélisés de type « indicateurs », mais juste un niveau de performance avec 100 % de probabilité par nœud.

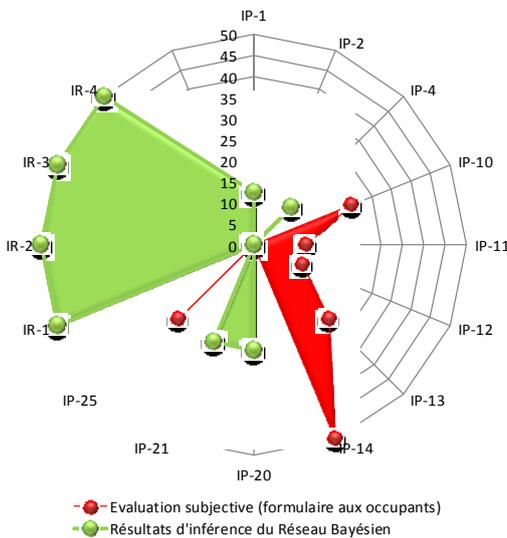
▪ Définition du jeu de familles de procédés décrivant le mieux l'existant

Un troisième formulaire demande à l'utilisateur de renseigner le jeu de familles de procédés correspondant le mieux à la situation avant rénovation. Les réponses apportées par le professionnel en charge du diagnostic sont listées dans le Tableau 44.

Tableau 44 – Liste des familles de procédés retenues pour caractériser l'existant

ID	Approche Fonctionnelle	Familles de procédés retenues
AF_1	Isolation paroi opaque verticale	mur non isolé
AF_2	Isolation plancher bas	non isolé
AF_3	Isolation toiture	sur combles perdus
AF_4	Étanchéité à l'air de l'enveloppe	non traitée
AF_5	Baies Vitrées	simple vitrage
AF_6	Protections Solaires	extérieures
AF_7	Portes	non isolante
AF_8	Ventilation	générale naturelle ou Hybride
AF_9	Chauffage	décentralisé
AF_10	Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	chauffe-eau électrique
AF_11	Panneaux Photovoltaïques	sans

Une fois ces trois formulaires remplis – *Tableau 42, Tableau 43 et Tableau 44* – l'évaluation multicritère des performances de la situation initiale (avant rénovation) peut être faite. Nous obtenons, en appliquant le processus décrit en page 177, la Figure 54.



ID	Indicateurs évalués	Scores sur 50 points	Niveaux équivalents
IP-1	Performance énergétique	13	Faible
IP-2	Projet utilisant des énergies renouvelables?	0	Non
IP-4	Coût de fonctionnement	0	Onéreux
IP-10	Confort Thermique (hiver)	25	Moyen
IP-11	Confort Thermique (estival)	13	Faible
IP-12	Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	13	Faible
IP-13	Confort Acoustique (bruits intérieurs)	25	Moyen
IP-14	Confort Olfactif	50	Moyen
IP-20	Taux de renouvellement d'air	25	Moyen
IP-21	QAI (Particules, COx, NOx, COV)	25	Moyenne
IP-25	Facilité d'utilisation (et d'entretien)	25	Moyenne
IR-1	Perte du potentiel d'amélioration énergétique	50	Faible
IR-2	Pathologies liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide	50	Faible
IR-3	Risques sanitaires liés à la génération de chaleur par combustion	50	Faible
IR-4	Risques d'inconforts acoustiques potentiellement important	50	Faible

Figure 54 – Évaluation multicritère sur 50 points de la situation initiale (avant rénovation)

Dans la Figure 54, nous retrouvons les notes harmonisées sur une échelle commune de 50 points de l'évaluation des performances multicritères de la situation initiale (de la maison de La Rochelle) pour les 11 indicateurs de performance évaluables avant rénovation⁶⁹ et les 4 indicateurs de risques potentiels. Ce profil de performance multicritère matérialise une part de l'expertise-métier capitalisée et formalisée au sein du réseau bayésien (évaluations performantielles en vert sur le diagramme radar). Il permet également d'informer la maîtrise d'ouvrage d'où elle part dans son processus d'amélioration des performances de l'existant ainsi que de mettre en avant de possibles risques à éliminer.

Dans cette étude de cas, en dehors des indicateurs directement évalués par le ressenti des occupants (évaluations performantielles en rouge sur le diagramme radar), les performances

⁶⁹ L'indicateur IP-22 / Sécurité incendie ne possède pas de fonctions d'impacts, par manque de contributions des spécialistes du domaine. Les 13 autres indicateurs de performance sont imposés avec les valeurs mentionnées au Tableau 34.

calculées montrent que les coûts de fonctionnement en l'état peuvent être considérablement améliorés ainsi que les aspects sanitaires. Aucun risque potentiel n'est mis en évidence.

II.2.2.2 Check-list technique de l'existant

Tout renseignement dans cette section de la phase diagnostic permet de déclencher des règles expertes agissant comme des filtres probabilistes sur les choix possibles de familles de procédés de rénovation. Cela en fonction des contraintes techniques et réglementaires applicables à l'opération en cours, ou bien en fonction des opportunités de couplage avec des travaux de maintenance non énergétique programmés.

- Évaluation technique des Contraintes Techniques (CT) connues

Ne sont listées ci-après, que les CT ayant été renseignées par le professionnel lors de la phase diagnostic du bâtiment à rénover. Ici, 14 CT ont été renseignées sur les 15 proposées par l'outil. La CT restante, par défaut incertaine, prend pour valeur les distributions de probabilités marginales préconisées par les spécialistes de la rénovation (voir TPM décrites dans l'Annexe G).

Tableau 45 – Caractéristiques Techniques (CT) renseignées par le professionnel en charge de la rénovation

Type de règle experte déclenchée	ID	Noms	Valeurs sélectionnées
<i>contraintes techniques</i>	CT_1	Présence de balcons extérieurs	non
	CT_2	Présence de modénatures extérieures	non
	CT_3	Taux d'ouverture des façades	NR*
	CT_4	Travaux en site occupé	tolérables
	CT_5	Type d'infrastructure	terre-plein
	CT_6	Type de toiture (typologie)	combles perdus
	CT_7	Présence de conduits de ventilation	oui
	CT_8	Possibilité de mettre en œuvre des capteurs solaires en toiture (PV ou Thermique)	oui
	CT_9	État du raccordement au gaz de ville / possibilité d'accueillir une citerne gaz	raccordement au gaz de ville
	CT_10	Présence d'un local technique possible pour une chaudière	non
<i>contraintes réglementaires ou urbanistiques</i>	CT_11	Zone concernée par les AbF	non
	CT_12	Présence de gaz radon	non
<i>opportunités de couplage</i>	CT_13	Ravalement de façade	oui
	CT_14	Réfection du réseau électrique intérieur	non nécessaire
	CT_15	Réfection de la toiture	non

* NR : donnée non renseignée

II.2.3 PHASE 3 / Élaboration automatisée et évaluation multicritère des alternatives de rénovation les plus performantes

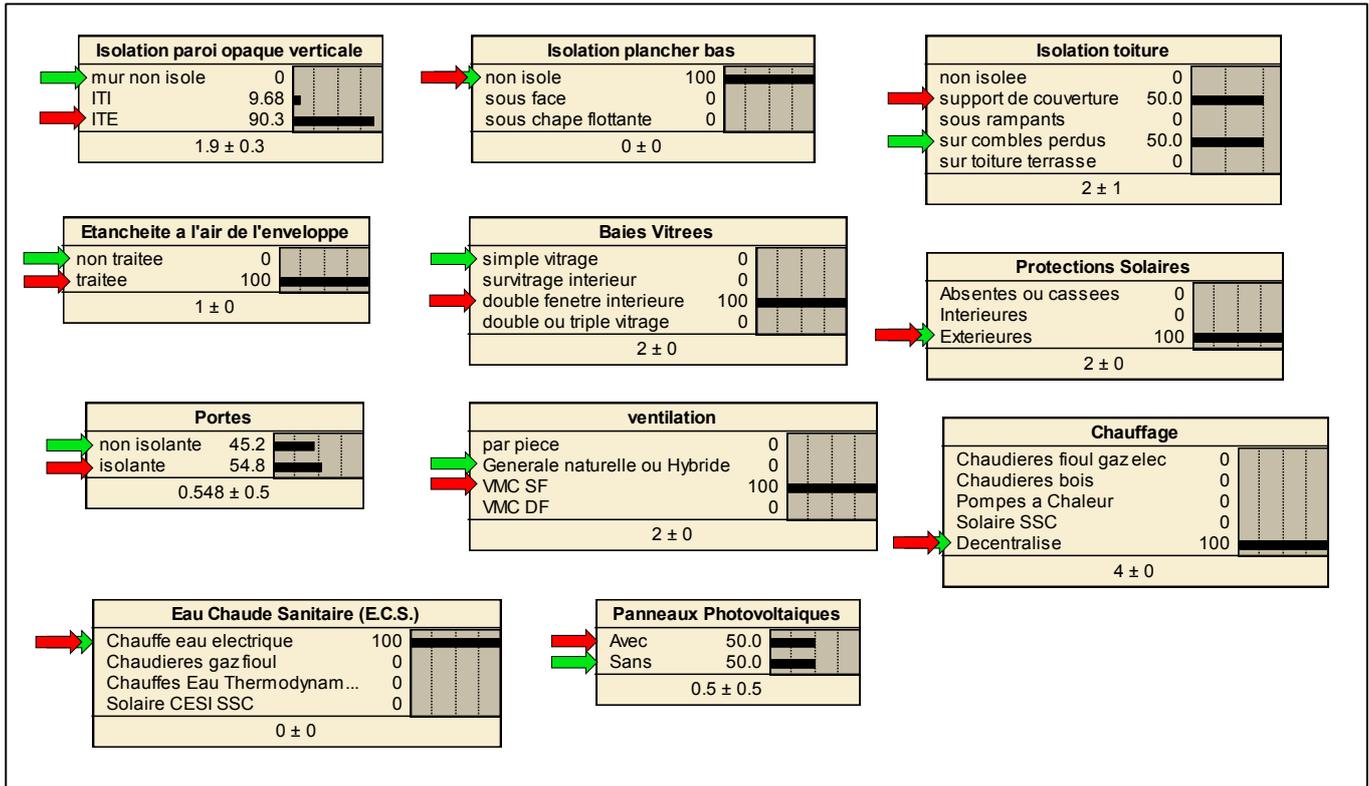
Durée de mise en œuvre de la phase : 20 minutes.

Pour rappel, cette phase est entièrement automatisée et reste invisible pour les utilisateurs de la méthodologie.

II.2.3.1 Recherche par inférence bayésienne du jeu d'alternatives le plus performant

L'algorithme permettant de renseigner les valeurs de CT et ST collectées lors de la phase *diagnostic étendu* dans le réseau bayésien (voir page 178) puis d'imposer successivement les niveaux de performance du PGP_{corrigé} sur les nœuds représentant les indicateurs de

performance, ne trouve plus de solutions au problème d'optimisation sous contraintes lorsque que l'on impose 6 des valeurs du $PGP_{\text{corrigé}}$, et cela sans avoir à diminuer les 5 premiers niveaux-cibles de performance du $PGP_{\text{corrigé}}$. Comme convenu dans le sous-modèle M5 dédié aux utilisations du réseau bayésien, l'algorithme de génération des alternatives potentielles de rénovation, commence par récupérer les distributions de probabilités sur les nœuds de types « Approches Fonctionnelles » lors de l'inférence avec 5 niveaux-cibles de $PGP_{\text{corrigé}}$ imposés. Ainsi nous obtenons la Figure 55 où sont représentées par des flèches rouges, les 11 familles de procédés, une par nœud, ayant la probabilité la plus élevée⁷⁰.



→ Familles de Procédés présentant les probabilités les plus élevées

→ Familles de Procédés ayant servies à la caractérisation de la situation avant rénovation

Figure 55 – Résultats de l'inférence probabiliste sur les nœuds de type « Approches fonctionnelles »

Parmi ces 11 familles de procédés, 4 coïncident avec les familles de procédés ayant servies à la caractérisation de la situation avant rénovation. Les valeurs prises pour ces nœuds sont :

- AF_2 / Isolation plancher bas, la famille de procédés « non isolé » ;
- AF_6 / Protections solaires, la famille de procédés « Extérieures » ;
- AF_9 / Chauffage, la famille de procédés « Décentralisé » ;
- AF_10 / E.C.S., la famille de procédés « Chauffe-eau électrique ».

Cela signifie, qu'au regard de l'expertise générique capitalisée dans le réseau bayésien ainsi que les connaissances spécifiques et les performances souhaitées injectées dans ce même réseau pour cette opération de rénovation, ces 4 familles de procédés représentent les

⁷⁰ Ne sont retenus, s'il y a ex-aequo sur les probabilités maximales de chaque nœud, que les états ne correspondant pas aux familles de procédés ayant servies pour décrire la situation initiale (i.e. avant rénovation).

meilleures familles possibles sous contraintes sur ces nœuds « Approches Fonctionnelles ». Bref, il ne sert à rien de les modifier.

II.2.3.2 Construction d'un plan de simulation

Par jeu combinatoire, comme décrit en page 183, un plan de simulation constitué de $2^7 \cdot 1 - 1 = 127$ alternatives potentielles de rénovation est généré automatiquement.

Tableau 46 – Plan des 127 simulations pour l'opération de rénovation de La Rochelle

N°	AF_1	AF_2	AF_3	AF_4	AF_5	AF_6	AF_7	AF_8	AF_9	AF_10	AF_11
Avant Rénovation	Mur non isolé	Non isolé	Sur combles perdus	Non traitée	Simple vitrage	Extérieures	Non isolante	Générale naturelle ou hybride	Décentralisé	Chauffe-eau électrique	Sans
1	-*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Avec
2	-	-	-	-	-	-	-	VMC SF	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	VMC SF	-	-	Avec
4	-	-	-	-	-	-	Isolante	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	Isolante	-	-	-	Avec
6	-	-	-	-	-	-	Isolante	VMC SF	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	Isolante	VMC SF	-	-	Avec
8	-	-	-	-	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	Avec
10	-	-	-	-	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	-
11	-	-	-	-	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	Avec
...
125	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	-	-	-	Avec
126	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	-
127	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	Avec

* Les cases dotées du symbole « - » correspondent aux familles de procédés décrivant la situation avant rénovation

Grâce aux algorithmes d'impositions successives de contraintes sur le modèle d'inférence probabiliste et de génération d'un plan de simulation par jeu combinatoire, nous sommes passés d'un domaine de recherche constitué initialement de 345 559 alternatives (voir page 111) à un sous-ensemble de 127 alternatives potentielles de rénovation, a priori efficaces, à évaluer puis à classer.

II.2.3.3 *Évaluation multicritère des alternatives générées*

Chacune des alternatives préalablement générées est évaluée grâce à ce même réseau bayésien. Nous obtenons ainsi, pour chaque alternative, une note sur les 25 indicateurs de performance modélisés ainsi qu'une note sur les 4 indicateurs de risques potentiels.

Ce jeu d'alternatives évaluées est par la suite trié et classé afin d'obtenir un classement des meilleures alternatives retenues. Les méthodes ELECTRE sont utilisées pour obtenir ce classement final en tenant compte uniquement des 25 indicateurs de performance. Un indice de risques potentiels est adjoint à chaque alternative en se basant sur les notes des indicateurs de risques potentiels calculés (page 185).

II.2.4 PHASE 4 / Tableau de bord

Durée de mise en œuvre de la phase : 15 minutes.

Cette phase correspond à la restitution des sorties de la méthodologie au tandem maîtrise d'ouvrage/professionnel. Le professionnel peut prendre manuellement le contrôle sur l'élaboration et l'évaluation multicritère des alternatives de son choix.

II.2.4.1 *Classement automatisé*

Le lancement automatisé des méthodes ELECTRE peut être fait après un calage manuel rapide – environ 10 minutes – des valeurs nominales des seuils d'indifférence q , de préférence p et de véto v , ainsi que de la sur-contrainte X appliquée au $PGP_{\text{corrigé}}$ sur 50 points pour le convertir en « alternative de référence ».⁷¹

Les algorithmes ELECTRE TRI puis ELECTRE III, se déroulent ensuite successivement, avec leurs analyses de sensibilité paramétriques, pour obtenir le classement final présenté en Tableau 47 où seules les alternatives classées dans les 10 premiers rangs sont affichées. Avant d'analyser ce classement final, les étapes intermédiaires, invisibles pour l'utilisateur de la méthode, sont analysées ci-après.

En appliquant la méthode de tri ELECTRE TRI sur l'ensemble de 127 alternatives potentielles de rénovation, nous récupérons en sorties, après analyse de sensibilité automatisée, un sous-ensemble constitué des 16 alternatives les plus performantes au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage. L'algorithme de surclassement ELECTRE TRI, qui utilise un profil de référence exigeant pour départager les 127 alternatives en deux catégories (l'une acceptable, l'autre non acceptable), remplit bien son rôle de « dégrossissage » du sous-ensemble de solutions à classer via ELECTRE III.

Ensuite, l'algorithme ELECTRE III, dans sa version simplifiée (voir page 192), permet d'obtenir un classement ordinal des 16 alternatives retenues, tout en permettant la présence d'exæquo. À ce classement final, nous adjoignons automatiquement un symbole « ! » aux alternatives présentant au moins une note non-optimale sur les 4 indicateurs de risques potentiels. Cette information est purement pédagogique et n'interfère pas dans l'ordre du classement final proposé au couple maîtrise d'ouvrage/professionnel.

Des analyses de sensibilités supplémentaires sont réalisées manuellement, en marge de la méthodologie en l'état, pour identifier la pertinence et le domaine d'influence des valeurs

⁷¹ Dans la forme actuelle de la méthodologie, ce travail préalable de paramétrage des valeurs nominales des méthodes ELECTRE est un frein à l'utilisation automatisée de la démarche par un professionnel du bâtiment. Cet obstacle est discuté dans la section II.3.3.4.

prises par les paramètres sensibles des méthodes ELECTRE manipulées. Les résultats de ces études sont disponibles au chapitre §II.3.3.4 de cette partie du mémoire.

Pour cette étude de cas, la méthodologie d'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique préconise l'alternative de rénovation n°92 du Tableau 47 ; elle est constituée des familles de procédés de rénovation suivantes :

- Mise en œuvre d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE)
- Traitement des défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe (Traitée)
- La mise en place d'une double fenêtre intérieure (Double fenêtre intérieure)
- La transformation de la ventilation générale naturelle par une VMC SF (VMC SF)
- La mise en place de panneaux photovoltaïques (Avec)

Nous constatons que les trois premières actions répondent principalement à l'amélioration du confort thermique d'été et à l'amélioration du confort acoustique (vis-à-vis des bruits extérieurs) ; la dernière action vise sûrement à ramener le coût de fonctionnement du bâti à un niveau moyen en réduisant les factures énergétiques par la revente de la production électrique générée par les panneaux photovoltaïques.

Tableau 47 – Classement final d'ELECTRE III (après analyse de sensibilités paramétriques)

ID	Composition des alternatives (en termes de Familles de Procédés)											Rangs finaux	Indice de Risques
	AF_1	AF_2	AF_3	AF_4	AF_5	AF_6	AF_7	AF_8	AF_9	AF_10	AF_11		
SI	Mur non isolé	Non isolé	Sur combles perdus	Non traitée	Simple vitrage	Extérieures	Non isolante	Générale naturelle ou hybride	Décentralisé	Chauffe-eau électrique	Sans		
92	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	Avec	1	-
90	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	Avec	2 ex	< ! >
94	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	-	-	-	Avec	2 ex	< ! >
91	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	-	3 ex	-
95	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	-	3 ex	-
96	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	Avec	4	-
124	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	Avec	5 ex	-
128	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	Avec	5 ex	-
89	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	-	6 ex	< ! >
93	ITE	-	-	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	-	-	-	-	6 ex	< ! >
122	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	Avec	7 ex	< ! >
126	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	-	-	-	Avec	7 ex	< ! >
123	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	VMC SF	-	-	-	8 ex	-
127	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	VMC SF	-	-	-	8 ex	-
121	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	-	-	-	-	-	9 ex	< ! >
125	ITE	-	Support de couverture	Traitée	Double fenêtre intérieure	-	Isolante	-	-	-	-	9 ex	< ! >

< ! > : Risque de niveau « Moyen » pour l'indicateur de risque IR-2 / Risque d'apparition de pathologies liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide

La meilleure des 16 alternatives retenues par ELECTRE TRI, l'alternative N°92, reste bien plus performante que le PGP_{corrigé} pour la plupart des indicateurs de performances modélisés (indépendamment des préférences de la maîtrise d'ouvrage). Seul le niveau de performance évalué sur l'indicateur IP-13 / Confort Acoustique (bruits intérieurs) est un niveau de performance en deçà des exigences attendus (diagramme radar de la Figure 56). Cela est apparemment dû à la présence dans l'alternative de la VMC SF qui, bien que performante sur les aspects tels que le confort thermique ou le renouvellement d'air, ne permet pas d'obtenir le niveau maximal sur cet indicateur pour l'alternative. Nous constatons également la présence en deuxième position exæquo, des alternatives N°90 et N°94. Ces deux dernières sont performantes mais souffrent d'un risque potentiel d'apparition de pathologies de l'enveloppe liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide (IR-3). Cela provient du fait que les combinaisons de familles de procédés, apportées par ces alternatives, poussent à l'étanchéification à l'air de l'enveloppe chauffée, sans pour autant apporter un système de

ventilation contrôlé (et permanent) pour évacuer les surplus de vapeur d'eau pouvant être générés à l'intérieur du bâti.

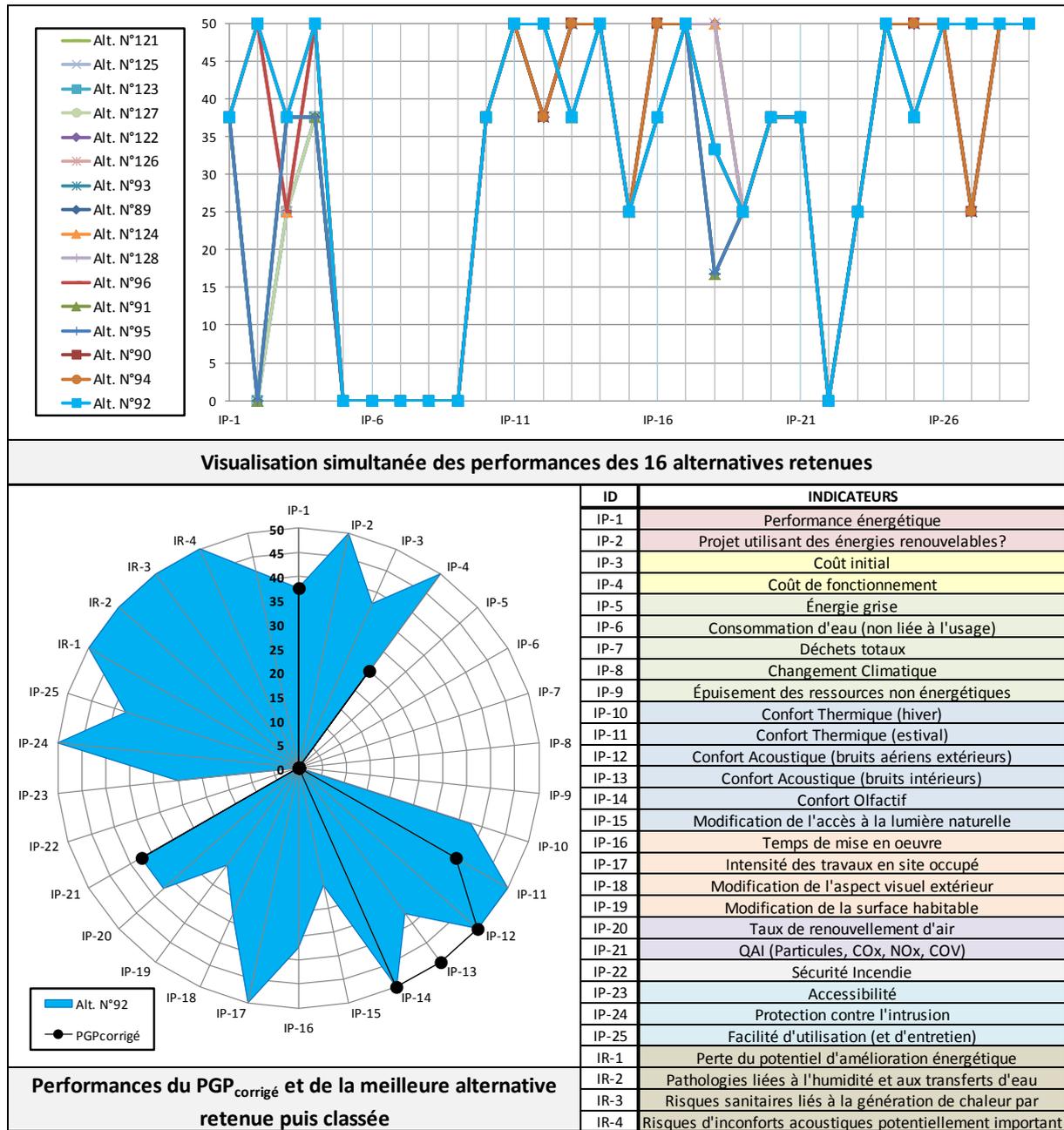


Figure 56 – Visualisations graphiques des performances des 16 alternatives retenues par ELECTRE TRI (en haut) et de la meilleure alternative du classement ELECTRE III (en bas)

Dans la Figure 56, les indicateurs IP-5 à IP-9 ainsi que l'indicateur IP-22 ont une performance équivalente à 0 car le réseau bayésien utilisé ne dispose pas de fonctions d'impacts pour les évaluer. Sur la partie haute de la figure, dans le graphique réunissant les performances multicritères des 16 meilleures alternatives, seules 4 ou 5 alternatives sont partiellement apparentes. Cela est dû à la superposition de performances identiques sur de nombreux indicateurs de plusieurs alternatives.

II.2.4.2 Possibilité de tester son propre bouquet de Familles de procédés

Cette fonctionnalité n'apporte rien de plus à l'analyse scientifique de la démarche proposée. Elle s'apparente plutôt une boîte à outil permettant de tester virtuellement et en temps réel, la

compatibilité et le comportement performantiel de stratégies de rénovation pensées par le professionnel ou la maîtrise d'ouvrage.

Pour cette raison, nous ne présentons pas un cas d'application de cette fonctionnalité dans le corps du document, mais une étude spécifique est proposée dans l'Annexe H.

II.3 Conclusion sur la mise en œuvre de la méthodologie

Cette section vise à répondre aux objectifs énoncés dans le premier chapitre de cette partie du mémoire. À savoir, montrer la faisabilité du processus présenté, analyser les échanges avec un tandem *maîtrise d'ouvrage/professionnel* sur la pertinence de l'approche, examiner la pertinence des résultats produits, identifier les points de blocage et les pistes potentielles d'amélioration. Chacun de ces objectifs est détaillé par la suite.

II.3.1 Faisabilité du processus présenté

La méthodologie développée est fonctionnelle. Sa mise en œuvre à travers un projet de rénovation énergétique est possible et les résultats obtenus sont concluants. Le processus décisionnel en 4 phases opérationnelles (*définition des enjeux, diagnostic étendu, élaboration automatisée et évaluation multicritère des alternatives de rénovation les plus performantes, tableau de bord*) se déroule sans obstacle majeur, le tout pour un temps de saisie, calcul et de restitution des résultats proche de l'heure pour un projet de rénovation de maison individuelle de 93m² de surface habitable.

II.3.2 Échanges avec un tandem *maîtrise d'ouvrage/professionnel* sur la pertinence de l'approche

À l'exception de l'étape de paramétrage manuel des méthodes ELECTRE utilisées pour automatiser le classement multicritère des alternatives de rénovation préalablement générées, le processus décisionnel, largement assisté, est perçu par les utilisateurs comme simple et rapide. Sa prise en main s'écarte peu des outils actuels de Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) qui possèdent également une phase de saisie d'information et une phase de restitution des résultats. La plus-value réside dans la prise en compte des attentes spécifiques de la maîtrise d'ouvrage (dans la phase 1 / *définition des enjeux*) et dans la possibilité d'obtenir à la fois un classement multicritère automatisé de solutions et une interface de pilotage manuelle des scénarios de rénovation (dans la phase 4 / *tableau de bord*).

Bien que la méthodologie proposée soit plus dédiée à la prescription d'alternatives de rénovation qu'à l'évaluation multicritère de ces dernières, une partie des interlocuteurs rencontrés pense obtenir des données quantitatives ainsi que des estimations de coûts pour les aspects financiers. Par conséquent, un travail de communication devra être préalablement fait sur les fonctionnalités de la méthode proposée pour en dessiner le périmètre d'utilisation possible. Afin de pallier ce décalage sur certaines attentes, des exports des sorties actuelles vers des outils d'évaluation plus poussés pourraient être envisagés (point discuté dans la partie Perspectives en page 224).

Le chapitre III de cette quatrième partie du mémoire s'attarde plus longuement sur le ressenti des professionnels du bâtiment ayant donné leurs avis sur la pertinence de la démarche menée.

II.3.3 Analyses de la pertinence des résultats, études des points de blocages et pistes d'amélioration

Cette analyse est menée phase opérationnelle par phase opérationnelle afin de pouvoir commenter les résultats intermédiaires, soulever les points de blocages et identifier des pistes potentielles d'améliorations.

II.3.3.1 Depuis les enjeux vers des préférences formalisées

Aucun problème particulier n'a été soulevé lors de la mise en œuvre de cette première phase opérationnelle de la méthodologie. La transposition des enjeux sélectionnés puis pondérés en profil de poids et en profil de niveaux-cibles à atteindre sur les indicateurs de performance a été bien accueillie.

L'opacité apparente du système permettant de passer du vocable de la maîtrise d'ouvrage vers celui du professionnel, notamment l'absence de visualisation directe de la matrice d'influence experte utilisée, n'a pas été perçue comme un frein à la mise en confiance des utilisateurs de la méthode. Cette éventualité avait été soulevée lors de la présentation du sous-modèle M4 dans la troisième partie de ce mémoire. En effet, le processus de conversion des enjeux en poids et niveaux-cibles de performance sur les indicateurs manipulés aurait pu être remis en question. Il en va de même sur le contrôle de l'expertise capitalisée au sein même de la matrice d'influence. Ce type de critiques est légitime mais reste néanmoins récurrent dans les méthodes et outils utilisés pour aider des non-sachants à raisonner à l'aide de connaissances expertes. Pour éviter ce risque, nous avons mis en place, à titre pédagogique pour les utilisateurs le souhaitant, une option graphique permettant de visualiser à la demande le contenu de la matrice d'influence utilisée (c'est-à-dire les points d'influence et les justifications textuelles des experts ayant renseigné les relations entre indicateurs et enjeux de rénovation).

II.3.3.2 Diagnostic étendu de l'existant et évaluation multicritère de la situation initiale

La phase diagnostic reste minimaliste. Seules les informations nécessaires à l'évaluation des performances avant rénovation et à l'alimentation du réseau bayésien sont capitalisées. Le diagnostic étendu ne nécessite la saisie que d'une trentaine d'informations spécifiques à l'opération de rénovation traitée ; le tout à l'aide de listes prédéfinies et de cases à cocher. Le niveau de description du bâti existant demandé, se limitant au niveau des familles de procédés, reste assez peu précis et cela force parfois l'utilisateur à affecter les procédés techniques qu'il souhaiterait renseigner à des familles de procédés qui ne lui semblent pas légitime. Ce point sensible est connu et la transposition de la méthode proposée vers un niveau de décomposition du bâti plus précis reste possible. Elle nécessite l'acquisition de connaissances expertes supplémentaires pour caractériser ce niveau de description (c'est-à-dire, structurer les procédés souhaités et renseigner les évaluations multicritères intrinsèques servant de base au système d'évaluation des performances utilisé).

La possibilité de ne pas remplir certains champs demandés tels que les CT ou ST est l'un des réels avantages de notre méthode d'aide à la décision dans un environnement incertain. Cette propriété héritée des réseaux bayésiens, donnant la possibilité de raisonner à l'aide de distributions de probabilités contextuelles lorsque certaines connaissances sont partielles ou absentes, permet d'obtenir des résultats même avec très peu d'informations. On regrettera dans la mise en œuvre du prototype actuel, l'absence de possibilité de renseigner manuellement un état de connaissance incertain à l'aide d'une densité de probabilité. Bien que cette fonctionnalité soit possible, pour des raisons de temps, nous avons limité cette fonctionnalité à un fonctionnement binaire. Soit on connaît l'information et l'on sélectionne l'état de CT ou ST le plus pertinent, soit on ne renseigne aucune information.

II.3.3.3 *Qualité et pertinences des scénarios prescrits*

La démarche méthodologique employée permet de présenter aux utilisateurs les scénarios optimaux d'améliorations énergétiques pour leur projet de rénovation. Les solutions prescrites ne sont pas forcément celles imaginées par le professionnel en charge de la rénovation, mais elles n'ont pas été remises en question.

Certains utilisateurs ont souhaité connaître les raisons de la mise en avant de certaines familles de procédés constituant les alternatives de rénovation bien classées. En ce sens, il serait intéressant de développer une brique pédagogique dans le sous-modèle M5 *d'évaluation multicritère et d'optimisation sous contraintes des scénarios de rénovation*. Cette fonctionnalité supplémentaire permettrait d'expliquer aux utilisateurs le cheminement expert qui a été mené pour constituer les scénarios optimaux (par exemple, savoir quelles ont été les règles métiers utilisées). De la même manière, une explication sur la non présence d'autres familles de procédés serait perçue comme un plus à l'appropriation de la méthodologie mise en œuvre.

Sur un plan plus scientifique, la pertinence des scénarios optimaux proposés peut également être remise en question. En effet, l'évaluation des alternatives de rénovation repose sur des fonctions d'impacts construites sur le principe d'agrégation de performances locales par sommes pondérées. Le phénomène de compensation associé à ce type de méthode (débatte en page 147) peut provoquer la mise en avant de combinaisons de familles de procédés discutables. D'autres méthodes d'agrégation de performances locales devraient être testées (ex : par produits pondérés) afin de vérifier si les mêmes optimaux ressortent.

II.3.3.4 *Analyses sur l'utilisation du Tableau de bord*

Sont rassemblées ci-après, les analyses sur l'obtention d'un classement automatisé des meilleures alternatives de rénovation grâce à l'utilisation des méthodes ELECTRE, puis les retours des utilisateurs sur la fonctionnalité laissant à ces derniers l'opportunité de constituer eux-mêmes des alternatives personnalisées (voir ce volet dans l'Annexe H).

A. Retours sur la procédure d'obtention d'un classement automatisé

Le calibrage manuel des valeurs nominales des paramètres modélisant les préférences des décideurs nécessite comme prérequis une formation didactique sur la nature de ces paramètres et le fonctionnement des algorithmes utilisés. En effet en l'état, un professionnel du bâtiment ne maîtrisant pas les principes de fonctionnement des méthodes ELECTRE ne peut pas réaliser cette étape de paramétrage sans être assisté ; et par extension obtenir un classement automatisé pertinent⁷².

Dans l'application de la méthodologie décrite pour la maison de La Rochelle, ce calibrage manuel a été réalisé par moi-même. Les valeurs nominales des paramètres préférentiels (q , p , v , λ , w_i et b_i) ont été obtenues après quelques tests au bout d'une dizaine de minutes. Ensuite, le processus d'enchaînement des méthodes ELECTRE TRI et ELECTRE III, avec leurs analyses de sensibilité, s'est déroulé automatiquement jusqu'à l'obtention d'un classement préférentiel final.

Les 72 classements finaux obtenus lors des analyses de sensibilités paramétriques réalisées sur cette étude de cas tendent à placer les alternatives N° 92, N° 90 et N°94 respectivement aux rangs 1 et 2^{ex}. Les alternatives placées au rang « 3^{ex} », N°91 et N°95 sont permutées avec celles du rang « 5^{ex} » (N°124 et N°128) lorsque nous

⁷² Dans le moins bon des cas, il obtiendrait soit aucune alternative de rénovation retenue comme « acceptable » en sortie de la méthode ELECTRE TRI, soit trop d'alternatives de rénovation classées au même rang en sortie de la méthode ELECTRE III.

passons du profil de valeurs nominales des poids relatifs à ses variantes. Enfin les alternatives attribuées aux autres rangs ont une position stable dans le classement final. Par conséquent, le classement final affiché aux utilisateurs de la méthode, construit via un traitement par l'occurrence maximale des affectations des alternatives à un rang sur les 72 tirages, permet d'obtenir un résultat stable et cohérent.

Bien que ces méthodes de tri (ELECTRE TRI) et de classement (ELECTRE III) remplissent leur rôle avec brio, leur mise en œuvre reste assez complexe. Il serait intéressant d'utiliser d'autres types de méthodes d'aide à la décision multicritère pour comparer les résultats obtenus (PROMETHEE, AHP).

B. Retours sur la fonctionnalité laissant la possibilité de construire et tester ses propres alternatives de rénovation

Laisser la possibilité aux professionnels l'opportunité d'élaborer et tester leurs propres scénarios de rénovation à partir de notre base de familles de procédés a été appréciée. Cette fonctionnalité permet aux utilisateurs de reprendre la main sur le processus de prescription d'alternatives tout en jouissant des connaissances expertes capitalisées dans la méthodologie. La simplicité de l'interface proposée et de l'affichage en temps réel des résultats est mise en avant par les utilisateurs (Annexe H). Le point à améliorer dans le prototype informatique utilisé – qui embarque la méthodologie générale – reste néanmoins le volet explicatif sur les raisons pour lesquelles certaines solutions sont considérées comme non compatibles ou risquées. Cet aspect, purement pédagogique et sans verrous techniques ou scientifiques, est connu et discuté dans la partie *Perspectives*.

Le chapitre suivant s'attarde plus longuement sur le ressenti des professionnels du bâtiment ayant donné leurs avis sur la pertinence de la démarche menée.

III. Retours des professionnels du bâtiment

Deux types de professionnels ont été interviewés au cours de ces travaux de thèse. Les entrevues prenaient la forme d'un échange non directif suivi d'une présentation de la méthode. Le premier groupe visait les utilisateurs potentiels de la méthodologie (artisans, entrepreneurs) au niveau de leur ressenti sur la possible application d'un tel processus décisionnel au quotidien dans leur métier. Le second groupe, centré sur les principaux acteurs de la conception de stratégies de rénovation pour des opérations de plus grandes envergures (bureaux d'études, architectes, bailleurs, etc.), avait pour objectif d'analyser l'intérêt de la transposition de la démarche méthodologique engagée sur d'autres types de bâtiments (immeubles collectifs, tertiaires, etc.).

III.1 Professionnels de la mise en œuvre (artisans, entrepreneurs...)

Lors de l'élaboration puis de la mise en application de la méthodologie développée sur quelques études de cas, des artisans, entrepreneurs et propriétaires de maisons individuelles ont été sollicités pour discuter de l'intérêt de la démarche menée et proposer leur point de vue.

Ces derniers, lors de l'élaboration de la méthodologie, ont signalé un fort intérêt à l'utilisation d'un outil permettant de prévenir l'apparition de contre-performances ou de situations favorisant le développement de pathologies liées à l'humidité. Ils ont également tenu à garder la main sur la possibilité de constituer et évaluer leurs propres scénarios de rénovation. La proposition d'une démarche visant la prescription, manuelle ou automatisée, de scénarios d'amélioration énergétique leur a fait penser aux Diagnostic de Performance Énergétique (DPE). Le rapport DPE est un document technique servant à communiquer sur

les performances énergétiques de chaque bâtiment construit ou rénové. Un volet de ce document est normalement dédié à la prescription, par le diagnostiqueur, d'améliorations énergétiques chiffrées. Dans les faits, peu de solutions pertinentes y sont proposées. Sinon, sur le contenu technique de la méthodologie, peu de remarques ont été faites.

Lors de tests de la méthodologie via le prototype informatique développé, les professionnels en charge de la rénovation de maisons individuelles n'ont pas rencontré d'obstacles majeurs à la mise en œuvre du processus décisionnel. L'absence de chiffrage économique reste néanmoins quelque chose d'assez perturbant étant donné que cet aspect reste la clé de voûte de leur approche.

III.2 Professionnels de la conception

Lors de l'élaboration de la méthodologie d'aide à la décision, avant qu'un prototype informatique soit fonctionnel et puisse servir de test, des discussions ont été engagées avec divers professionnels du bâtiment (bureaux d'études spécialisés dans l'efficacité énergétique, bailleurs sociaux publics et privés, économistes-mètres...). Bien que ces professions ne correspondent pas directement au type de personnes visées par le périmètre de la méthodologie, leur analyse permet d'identifier la pertinence de la démarche et sa possible transposition à d'autres types d'opération (notamment le logement collectif, voire les bâtiments tertiaires).

Côté maîtrise d'œuvre, l'outil est basé sur les connaissances expertes qui émanent de ce type d'acteurs de la construction (bureaux d'études spécialisés, architectes, etc.). La méthodologie développée ne fait que reproduire une partie de leur démarche en automatisant et systématisant le processus d'aide à la prescription de solutions. Dans ce contexte, ils ne voient pas directement de plus-values à notre démarche en dehors du fait que la systématisation du processus permettrait d'éviter d'omettre certains points-clés en fonction du contexte. Ils notent également l'absence de phasage dans le temps des travaux d'amélioration énergétique proposés. Cette dimension, non pertinente pour de petites opérations (i.e. rénovations légères de maisons individuelles), devient prépondérante lorsque les budgets engagés deviennent importants. Néanmoins, ils restent cependant curieux et intéressés par la démarche, surtout par la rapidité et la simplicité d'utilisation annoncée.

Côté maîtrise d'ouvrage, l'avis est plus partagé. Pour la plupart des opérations de rénovation traitées, les scénarios d'amélioration énergétique proposés par les professionnels missionnés en phase amont de la conception (souvent présentés dans les rapports d'audits énergétiques) sont rarement ceux retenus dans le choix final. Ce décalage peut principalement s'expliquer par un écart important entre l'enveloppe budgétaire fixée et l'estimation des coûts économiques des scénarios proposés, mais également par l'absence d'écoute des besoins exprimés et d'indicateurs de performance crédibles permettant de transcrire ces besoins. Encore en 2014, la plupart des 2 à 4 scénarios proposés à la maîtrise d'ouvrage par l'approche traditionnelle (tirés des conclusions d'un audit énergétique) pour une opération de rénovation sont évalués par seulement deux types d'indicateurs : une estimation économique (coûts d'investissement ou/et temps de retour sur investissement actualisé) et un indicateur de performance énergétique (Cep). Les autres aspects de la performance sont analysés par le professionnel afin d'orienter le choix des solutions proposées mais ils ne sont jamais formalisés de manière claire. En ce sens, la maîtrise d'ouvrage est fortement intéressée par une méthode permettant de traduire des enjeux en niveaux-cibles de performance et permettant de piloter la génération de scénarios d'amélioration.

Cependant il faut garder à l'esprit, que les maîtres d'ouvrage interviewés (essentiellement des bailleurs sociaux), choisissent systématiquement les scénarios permettant de soulever le

maximums de subventions afin d'alléger la facture de l'opération finale⁷³. La méthode développée à ce jour ne permet pas de répondre aux critères stricts d'attribution de la plupart des subventions (calculs énergétiques réglementaires nécessaires) mais pourrait aider à comparer les performances des solutions subventionnées par rapports aux solutions répertoriées dans l'outil. Ceci dans le but d'explorer des pistes d'amélioration initialement non envisagées. L'évaluation des scénarios retenus par la méthode devra être réalisée, quoi qu'il arrive, par des professionnels maîtrisant les méthodes et outils demandés par les organismes de subventions.

⁷³ Dans le cas spécifique des bailleurs sociaux, l'augmentation du prix des loyers reste rarement possible.

Conclusion Générale

L'objectif initial de ces travaux de thèse était de proposer une méthode d'aide à la décision pour la prescription de travaux d'amélioration énergétique, appliquée au secteur du logement individuel. Le caractère innovant de la démarche résidait dans sa capacité à surmonter les trois obstacles majeurs présentés à la fin de l'état de l'art et qui étaient :

- Collecter et formaliser des connaissances expertes, multicritères et génériques, dans un outil unique d'inférence probabiliste pour générer et évaluer en temps réel des scénarios d'amélioration énergétique compatibles au regard des spécificités de l'opération traitée et efficaces au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage.
- Tenir compte des incertitudes associées à la caractérisation de l'existant : les repérer, les codifier, puis les propager dans le processus d'aide à la décision.
- Établir une méthode robuste et intuitive permettant d'assister le professionnel dans la formalisation des préférences de la maîtrise d'ouvrage en un format performantiel, interprétable par des outils d'analyses multicritères.

À première lecture, le travail réalisé répond à la problématique. La méthode proposée, construite autour de 6 sous-modèles interconnectés (schéma en page 106), permet de déployer un prototype d'outil informatique fonctionnel démontrant la faisabilité de la démarche. Les résultats obtenus sur l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire sont plutôt cohérents ce qui tend à prouver que les sous-modèles jouent leur rôle.

Nous allons dans la suite de cette conclusion, commencer par argumenter les choix scientifiques et techniques qui ont été faits, puis préciser le contenu et le périmètre de validité de la méthode développée, pour ensuite analyser les résultats obtenus lors de sa mise en œuvre sur une étude de cas.

Au cours de la première partie de ce mémoire, centrée sur le contexte de la rénovation en France, nous avons commencé par définir la notion d'*opération de rénovation énergétique légère en milieu résidentiel* afin de mieux comprendre les attentes des maîtres d'ouvrage, d'identifier le type d'interventions envisageables et d'étudier les méthodes d'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. De cette première analyse, nous avons dégagé l'intérêt et la pertinence de proposer une méthodologie d'aide à la prescription de scénarios d'amélioration énergétique, en phase d'études préalables, centrée sur les maisons individuelles construites durant la période 1945-1974 en France métropolitaine. Ce choix de périmètre d'étude a un triple intérêt : un parc important de bâtiments aux typologies clairement identifiées, des gains potentiels d'économie d'énergie conséquents pour cette période constructive, une maîtrise d'ouvrage (i.e. les propriétaires occupants) missionnant des professionnels de proximité (éco-artisans, entrepreneurs...) pour la conception-réalisation des travaux d'amélioration énergétique qui ne possèdent souvent pas les multiples compétences nécessaires à la réalisation d'une opération de rénovation via une approche globale, intégrée, multicritère. Ce manque de recours aux spécialistes de la conception (bureaux d'études techniques, architectes) est le résultat d'un manque de connaissance de la maîtrise d'ouvrage sur l'importance de cette phase d'étude ainsi que du manque systématique de trésorerie pour s'offrir ce type de prestations.

Ensuite, par la traversée de l'état de l'art, nous avons successivement mis en lumière les connaissances actuelles de la communauté scientifique sur diverses thématiques pouvant potentiellement contribuer à l'élaboration de la méthodologie : études typologiques, gestion des données incertaines, évaluation des performances, modélisation des connaissances

expertes avec des outils d'intelligence artificielle et méthodes d'analyses multicritères (d'optimisation et d'aide à la décision). Par l'analyse de ces travaux, nous avons mis en évidence les principales lacunes des méthodes actuelles d'aide à la décision pour prescription de scénarios de rénovation énergétique. À savoir :

- peu de prise en considération des enjeux spécifiques de réhabilitation exprimés par les maîtrises d'ouvrage dans l'identification de solutions de rénovation pertinentes ;
- une prise en compte, pour l'habitat individuel, souvent trop rapide et incomplète des spécificités techniques des bâtis existants dans la détermination de stratégies de rénovation adaptées (pouvant donner naissance à des problèmes de compatibilité ou générer des pathologies de l'enveloppe) ;
- aucune intégration des incertitudes associées à la caractérisation de l'existant et au processus décisionnel ;
- peu de méthodes proposant une analyse globale (systémique et multicritère) des performances d'un bâtiment, avant ou après rénovation.

En 2014, nous n'avons pas recensé de méthodes et outils permettant de traiter l'ensemble de ces aspects pour la rénovation de logements.

Pour répondre à ces lacunes, nous avons décidé de concevoir une méthode générale d'aide à la décision constituée en 4 phases opérationnelles (*définition des enjeux, diagnostic global, élaboration automatisée et évaluation multicritère des alternatives de rénovation, tableau de bord*). Ce processus d'aide à la décision est lui-même construit sur une architecture fonctionnelle structurée autour de 6 sous-modèles assurant chacun une ou plusieurs tâches spécifiques. Ce choix nous a permis de clarifier la démarche par une approche systémique et de pouvoir mettre à niveau, au grès des avancées, chacun de ces sous-modèles de manière indépendante.

Le premier sous-modèle, M1, a pour vocation d'aider à la structuration des procédés techniques (de rénovation ou/et servant à la description de la situation avant rénovation) autour d'une décomposition fonctionnelle de la maison individuelle. Cette décomposition sous forme d'une arborescence de notions à 4 niveaux de détails⁷⁴ nous a permis de mettre en lumière un nombre important d'alternatives potentielles de rénovation (i.e. scénarios de rénovation) par jeu combinatoire. Le niveau de détail mis en œuvre par la suite dans la méthodologie, celui des « Familles de Procédés » (3^{ème} niveau), nous a déjà permis de disposer d'un jeu d'environ 345 600 alternatives. Nous avons imaginé pousser plus en détail la description technique et performantielle de l'ensemble des « Procédés Techniques » du 4^{ème} niveau, mais ceci nécessiterait alors de mobiliser de nouvelles ressources expertes. Par ailleurs augmenter le nombre potentiel d'alternatives semble au premier abord un gain pour les utilisateurs mais cela pose également un problème de gestion et de traitement d'un nombre extrêmement important d'alternatives. Dans ce contexte, se limiter au 3^{ème} niveau de détails semble un bon compromis.

Dans le cadre du second sous-modèle (M2), dédié à la capitalisation et à la formalisation de connaissances expertes génériques et incertaines, collectées auprès de spécialistes du bâtiment et de la rénovation, le choix s'est porté sur le formalisme structurant des réseaux bayésiens (une technologie d'intelligence artificielle permettant de raisonner par chaînage mixte en environnement incertain). Un seul travail de recherche avait été engagé en 2008 sur la thématique de la performance énergétique des bâtiments avec cette technologie ; et il

⁷⁴ Niv.1 : Lots ; Niv.2 : Approche Fonctionnelle ; Niv.3 : Familles de Procédés ; Niv.4 : Procédés Techniques.

s'était centré sur l'aide au commissionnement pour la conception de bâtiments à faible consommation énergétique [48]. Dans ces travaux de thèse, le recours à cette technologie nous a permis deux choses. La première fut la capitalisation dans un modèle unique d'inférence, des différentes connaissances expertes utiles à notre cause (contraintes techniques de mise en œuvre, impacts multicritères, risques, etc.) collectées auprès de sources disparates (guides spécialisés, bases de connaissances, retours d'expérience, etc.) sous la forme de relations causales probabilisées. La seconde fut la manipulation de ces connaissances expertes génériques avec les informations disponibles sur un projet spécifique de rénovation⁷⁵ pour pratiquer de l'inférence en milieu incertain (optimisation et évaluation multicritère d'assemblages de solutions de rénovation dans le sous-modèle M5). Dans l'exercice particulier qu'est la collecte et la formalisation de connaissances expertes sur la rénovation de bâtiments, la principale difficulté rencontrée, qui n'est pas propre à cette étude, fut le temps nécessaire à l'analyse et à la transformation de ce savoir, exprimé en langage naturel, sous la forme de relations causales certaines ou probabilisées. La prise en compte des incertitudes, dans le formalisme des réseaux bayésiens, se fait à deux niveaux : sur les connaissances expertes génériques (sous la forme de distributions de probabilités via les TPM⁷⁶) et sur les mécanismes d'inférence proprement dits (directement sur les relations causales via les TPC⁷⁷). Le premier type d'incertitude a été codifié avec succès ; le second reste possible est sera réalisé dans les mois à venir.

Le sous-modèle M3 dédié à la modélisation des performances multicritères d'un bâtiment devait pouvoir servir à deux usages bien spécifiques. Le premier était l'évaluation multicritère des scénarios de rénovation ; le second, était l'utilisation du modèle d'évaluation pour faire de l'optimisation multicritère afin de rechercher les meilleurs assemblages d'action d'amélioration au regard des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage. Le choix de modélisation s'est orienté vers l'évaluation qualitative et relative (par jugements d'experts) des performances intrinsèques associées à chaque action de rénovation retenue dans le premier sous-modèle, pour ensuite construire des fonctions d'impacts (appelées également fonctions d'utilité) utilisant le principe d'agrégation par somme pondérée. Ces fonctions d'impacts permettent d'attribuer une note à l'échelle du projet de rénovation pour chaque combinaison d'actions de rénovation, et cela pour 25 indicateurs de performance modélisés. Ce choix de recourir à une évaluation globale par agrégation de performances locales issues de jugements d'experts provient de la nécessité de trouver un formalisme commun à tous les indicateurs et qui soit interprétable par les réseaux bayésiens dans le sous-modèle M5. Cette modélisation de l'évaluation des performances des indicateurs, en fonctions d'impacts, correspond exactement au formalisme exigé par les réseaux bayésiens en Tables de Probabilités Conditionnelles permettant de propager des connaissances incertaines entre variables modélisées dans un graphe relationnel. Cette approche simple et homogène permet de raisonner aussi bien en chaînage avant (évaluation multicritère) qu'en chaînage arrière (optimisation combinatoire). Cependant l'utilisation du principe d'agrégation par somme pondéré est à double tranchant : il permet de déduire rapidement une note pour un nombre important de combinaisons d'actions, mais il subit le phénomène de compensation entre les différentes performances locales qui ont été agrégées.

La formalisation des préférences des décideurs a donné lieu à un sous-modèle spécifique, le M4, peut-être le plus original et le plus nécessaire de l'ensemble de ces travaux de thèse. Au cours de l'état de l'art nous avons mis en évidence la difficulté générale des maîtres d'ouvrage à exprimer directement leurs besoins dans le langage utilisé par les professionnels de la construction, celui des performances chiffrées. Afin de pallier cette difficulté, nous avons créé un processus automatisé permettant de convertir des enjeux de rénovation, exprimés dans le langage de la maîtrise d'ouvrage, en poids relatifs et niveaux-

⁷⁵ Issues d'un diagnostic.

⁷⁶ TPM : Tables de Probabilités Marginales présentées en page 166.

⁷⁷ TPC : Tables de Probabilités Conditionnelles présentées en page 166.

cibles de performance sur les indicateurs, le tout utilisable par des outils d'optimisation et d'aide à la décision multicritère ; cela à l'aide d'une matrice d'influence experte. Les résultats obtenus sur la dizaine de cas-tests utilisés pour calibrer le processus semblent cohérents. Néanmoins, une évaluation critique de la valeur ajoutée de l'analyse experte capitalisée au sein de cette matrice d'influence ne pourra être jugée que par son utilisation sur le long terme.

Le sous-modèle M5, dédié à l'évaluation multicritère et l'optimisation sous contraintes des alternatives de rénovation, utilise un modèle d'inférence probabiliste (les réseaux bayésiens) pour confronter les règles expertes génériques du sous-modèle M2 avec les informations spécifiques disponibles sur chaque opération de rénovation traitée (collectées lors d'un diagnostic). Une fois les notions de types « familles de procédés », « indicateurs de performance » et « caractéristiques techniques » codifiées sous la forme de nœuds ; les « règles expertes » capitalisées dans le second sous-modèle – *et parmi lesquelles nous retrouvons les « fonctions d'impacts » du sous-modèle M3* – codifiées sous la formes de relations causales probabilistes (i.e. tables de probabilités marginales et conditionnelles) ; le modèle bayésien devient fonctionnel. Il permet à la fois de rechercher et générer les assemblages de familles de procédés (i.e. les alternatives potentielles de rénovation) compatibles avec les spécificités de l'existant et efficaces aux yeux de la maîtrise d'ouvrage (avec l'aide des niveaux-cibles de performance générés sur les indicateurs modélisés dans le sous-modèle M4) ; et à la fois de réaliser une évaluation multicritère de ces alternatives préalablement générées. Ce sous-modèle, en charge de l'optimisation des assemblages de familles de procédés et de l'évaluation multicritère, correspond à la phase opérationnelle de la méthode d'aide à la décision pour la prescription de scénarios d'amélioration. La méthode d'optimisation multicritère s'apparente à un processus de programmation par contraintes successives où l'ordre d'imposition des contraintes reste un aspect déterminant pour la suite. L'algorithme proposé permet de générer un sous-ensemble efficace et compatible d'alternatives potentielles de rénovation. La taille de ce sous-ensemble dépend des particularités de chaque opération de rénovation, en fonction des degrés de liberté autorisés (nombre de contraintes techniques à respecter, exigences sur les niveaux de performances souhaités). À l'heure actuelle, les alternatives générées pour les études de cas traitées sont globalement cohérentes. Un travail dans la durée sur l'affinage de la calibration de certaines fonctions d'impacts utilisées dans le modèle permettra de gagner en robustesse.

Le dernier sous-modèle de la méthodologie, M6, a pour finalité d'aider le tandem maîtrise d'ouvrage/professionnel à identifier les meilleures alternatives de rénovation qui s'offrent à lui parmi le sous-ensemble déjà efficace d'alternatives potentielles générées puis évaluées. Pour y parvenir nous avons automatisé les processus respectifs de catégorisation et de classement multicritère ELECTRE TRI et ELECTRE III, pour obtenir en sortie, un classement par ordre de préférences des alternatives les plus performantes. Le choix de recourir à ces méthodes provient de leurs capacités à tenir compte des évaluations performantielles incertaines (à travers les notions de seuils d'indifférence et de seuils de préférence) et à évacuer partiellement le phénomène de compensation entre critères lors du processus d'agrégation des performances (seuil de véto). De par leur nature, ces méthodes nécessitent des analyses de sensibilité pour étudier la robustesse de la méthode (domaine de stabilité des affectations et classements finaux obtenus). Nous avons proposé un processus automatisé d'analyses paramétriques pour pallier ce problème.

Enfin, cette méthode proposée se veut modulaire : chaque sous-modèle peut être remplacé par un autre aux grès des besoins ou des avancées scientifiques dans les domaines de recherche ciblés. L'utilisation de la méthode se veut également modulable ; en effet l'utilisateur peut très bien ne s'intéresser qu'à un ou deux sous-modèles en particulier et délaisser l'exhaustivité de la démarche.

L'étude de cas menée dans la quatrième partie de ce mémoire confirme la faisabilité de la démarche. Les 4 phases du processus décisionnel (définition des enjeux, diagnostic global, élaboration automatisée et évaluation multicritère des alternatives de rénovation les plus performantes, tableau de bord) s'enchaînent sans encombre et les résultats obtenus correspondent globalement aux prescriptions qui auraient pu être faites par un spécialiste de la conception d'opérations de rénovation.

Pour conclure, la méthodologie développée permet de manière théorique, comme nous venons de le montrer, de concevoir des scénarios d'amélioration énergétique tenant compte des préférences multiples de la maîtrise d'ouvrage et en raisonnant dans l'incertain. Le choix d'optimiser la génération de scénarios et d'évaluer ces derniers à l'aide de fonctions d'impacts issues de l'agrégation de performances locales peut faire débat. Néanmoins la méthode, incarnée dans un prototype fonctionnel, permet de traiter une opération de rénovation – *via la prescription d'un sous-ensemble de scénarios d'amélioration énergétique évalués à l'aide un panel de 29 indicateurs*⁷⁸ – dans un temps très raisonnable (moins d'une heure). Cette méthode n'a pas vocation à intervenir en phase de conception détaillée d'une opération de rénovation, mais elle permet de réaliser très rapidement une étude d'opportunité sur des choix techniques qui pourront être affinés en un second temps par le professionnel en charge de l'opération. Le savoir expert embarqué dans la méthodologie ne se substitue pas aux compétences métiers d'un bureau d'études ou d'un cabinet d'architecture missionné pour ce type de mission, mais il permet de pallier, en partie, l'absence de ce type de personne lorsque la maîtrise d'ouvrage n'est pas en mesure de financer une mission d'aide à la conception ou que le professionnel en charge de l'opération de rénovation du logement individuel ne dispose pas d'une vision globale et multicritères des actions d'amélioration qu'il peut préconiser.

Enfin, comme présentée plus tard dans la partie *Perspectives*, de nombreux points d'améliorations sont identifiés afin de parfaire le processus décisionnel et ôter les hypothèses simplificatrices utilisées pour s'assurer de la viabilité de la démarche avant de complexifier le modèle global. Nous garderons à l'esprit que le travail engagé cible deux utilisations principales : l'évaluation rapide des performances multicritères d'un bâtiment d'une part, et l'optimisation multicritère et sous contraintes de scénarios de rénovation d'autre part.

Non seulement la méthodologie proposée d'aide à la décision pour la prescription de scénarios de rénovation fonctionne, mais à l'usage elle s'avère être en plus :

- un moyen de faciliter la communication entre les différents acteurs de la rénovation (cet outil permet de justifier à la maîtrise d'ouvrage que le professionnel en charge de l'opération a bien compris les objectifs et y a répondu) ;
- un outil de test et de validation de choix techniques et architecturaux pour l'amélioration énergétique de logements (via sa fonctionnalité de customisation des scénarios de rénovation).

⁷⁸ 25 indicateurs de performance + 4 indicateurs de risques potentiels

Perspectives

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse de doctorat offre de nombreuses perspectives en termes de renforcement du niveau de connaissances expertes capitalisées, de mise à jour méthodologique du processus décisionnel décrit, mais aussi en termes de transposition de la méthode à d'autres périmètres d'étude (notamment les immeubles collectifs).

En tout premier lieu et avant d'exposer les perspectives potentielles à court et moyen termes, l'enjeu principal à relever pour assurer la pérennité d'une telle méthode dans la durée repose sur l'acquisition de nouvelles connaissances expertes auprès des spécialistes de la rénovation. Ces connaissances permettraient de renforcer la matrice d'influence du sous-modèle M4 (matrice croisant les enjeux de rénovation les plus courants avec les indicateurs de performance) et le réseau bayésien du sous-modèle M5 (structure graphique probabilisée se nourrissant des différentes types de règles expertes proposées). Pour y parvenir, deux plateformes collaboratives en ligne (non présentées dans ce travail de thèse) ont été créées pour donner l'opportunité aux « sachants » de participer, d'ajouter et d'améliorer le jeu de connaissances expertes actuellement utilisé dans le prototype informatique de la méthodologie.

Les perspectives à court terme envisagées sur ce travail de recherche visent l'amélioration des sous-modèles du cœur méthodologique par la suppression de la plupart des hypothèses simplificatrices sciemment prises afin de pouvoir terminer le cursus doctoral dans les délais.

- Le premier point d'amélioration est l'élaboration d'un algorithme permettant de rechercher automatiquement le jeu de valeurs nominales pour les paramètres sensibles de la méthode ELECTRE TRI permettant d'obtenir un sous-ensemble d'alternative de rénovation compris entre 10 et 20 items dans le sous-modèle M6 ; et cela pour chaque opération de rénovation traitée. Cette amélioration permettrait d'automatiser complètement le processus de l'élaboration et de classement préférentiel d'alternatives de rénovation efficaces et compatibles.
- Le second point d'amélioration vise la mise en œuvre d'un niveau supplémentaire de description du bâti dans le sous-modèle M1, permettant ainsi de raisonner à l'échelle des « Procédés Techniques » et non plus des « Familles de Procédés ». Le passage à cette échelle de description plus fine nécessite néanmoins une capitalisation de connaissances nouvelles auprès des spécialistes de la construction ; et cela afin de pouvoir affiner les fonctions d'impacts multicritères du sous-modèle M3.
- Un troisième point d'amélioration consiste à permettre aux professionnels de caractériser le bâti existant à l'aide de données partielles ou incomplètes (sous la forme de jeux de valeurs contextuelles, d'indices de confiance sur la donnée saisie, voire de distributions de probabilité), lors de la phase de diagnostic étendu, lorsqu'ils ne connaissent pas précisément une entrée à renseigner. Cela permettrait de mieux gérer les connaissances incertaines au niveau des Tables de Probabilités Marginales (TPM) dans le sous-modèle M5 en reflétant exactement le niveau de connaissance connu de l'existant.
- Un autre point d'amélioration est l'ajout d'une fonctionnalité permettant de limiter le côté « boîte noire » et d'expliquer aux utilisateurs *quelles règles expertes ont été déclenchées et pourquoi certaines familles de procédés génériques ont été écartées ou au contraire préconisées*. Cette fonctionnalité, purement pédagogique et sans verrous techniques apparent, permettrait de gagner en compréhension sur les choix techniques de rénovation mis en avant par le processus décisionnel. De plus, cela permettrait d'envisager une utilisation plus orientée « formation professionnelle » de la méthodologie proposée. La mise en place de cette amélioration serait à faire au

niveau du sous-modèle M5, en listant les règles déclenchées lors de la constitution d'assemblage de familles de procédés de rénovation.

Les perspectives à moyen terme sont encore plus nombreuses. Elles gravitent principalement autour de la consolidation des connaissances expertes embarquées dans le modèle, de l'adaptation de la méthodologie à d'autres types de bâtiments, de la prise en compte d'un phasage temporel des travaux, ou de la spécialisation de la méthode pour répondre à des exigences particulières.

- Avec le temps, si le nombre d'opérations de rénovation traitées via la méthode est conséquent, nous pourrions tenter de remplacer, par apprentissage statistique (i.e. une méthode de reconstruction automatisée des relations probabilistes des réseaux bayésiens à partir d'un jeu de données expérimentales), une partie des TPM et TPC du réseau bayésien actuel dans le sous-modèle M5. Cela permettrait, entre autres, de fiabiliser le modèle d'évaluation des performances.
- La méthodologie actuelle (processus décisionnel et connaissances métiers) peut très bien être transposée, à moindre frais, à d'autres typologies de bâtiments comme des maisons individuelles construites en dehors de la période 1945-1974 ou bien des immeubles collectifs. Pour ce faire, il faudrait juste adapter le jeu de familles de procédés de rénovation dans le sous-modèle M1, puis évalué dans le sous-modèle M3, pour intégrer les installations collectives (centrales de traitement d'air, chaudières collectives, réseaux de chaleurs urbains...) et contextualiser les distributions de probabilités utilisées pour modéliser les TPM et TPC du réseau bayésien dans le sous-modèle M5. Cette variante de la méthodologie originelle serait néanmoins plus utile à des représentants de la maîtrise d'ouvrage (bailleurs sociaux, gestionnaires de parc) que les professionnels de la conception qui opèrent traditionnellement dans ce type de rénovation (bureaux d'études spécialisés, architectes...). Dans le cas où la méthodologie serait adaptée à des bâtiments du tertiaire (bureaux, agences, cabinets...), le sous-modèle M4 serait également à reprendre car les enjeux de rénovation pour ce type de cible différent de ceux de l'habitat. Enfin à moindre coûts et dans la même veine, cette méthodologie de prescription de systèmes constructifs et de systèmes énergétiques pourrait très bien s'appliquer à la conception de bâtiments neufs.
- Un autre axe de recherche, toujours compatible avec notre démarche mais plutôt adapté aux immeubles collectifs et aux bâtiments tertiaires, serait d'optimiser le phasage dans le temps des solutions de rénovation apportées constituant chaque alternative élaborée. Pour y parvenir, l'utilisation de la technologie des Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD) est plus qu'envisageable. Cette variante des réseaux bayésiens traditionnels consiste à rajouter une dimension temporelle à la structure causale relationnelle utilisée. Ce type de fonctionnalité permettrait d'assister la création de plans pluriannuels de travaux d'amélioration énergétique lorsque les enveloppes budgétaires allouées sont planifiées. Seuls les sous-modèles M2 et M5 seraient à adapter pour intégrer cette dimension temporelle aux règles expertes capitalisées.
- La modélisation des aspects économiques, actuellement pris en compte sous la forme de fonctions d'impacts modélisant deux indicateurs de performances (*IP-3 / Coût initial* et *IP-4 / Coût de fonctionnement*), pourrait être retravaillée afin de devenir des critères de décision à part entière. L'implémentation d'indicateurs économiques quantitatifs comme le coût global, le temps de retour sur investissement ou le taux de rentabilité interne est envisagée. Cette perspective nécessite cependant l'apport

d'une véritable base de coûts à fusionner avec la base de solutions d'amélioration énergétique actuelle.

- Enfin, la spécialisation de la méthodologie à des finalités particulières (adaptation du bâti au vieillissement des occupants, aide au choix entre « rénovation lourde / rénovation légère / déconstruction » de bâtiments, aide à la rénovation de parcs de bâtiments...) en adaptant les jeux de solutions de rénovation (sous-modèle M1) et d'indicateurs de performance (sous-modèle M3) est également étudié. Dans la même veine, une autre idée consisterait à développer des passerelles vers des outils de conception détaillée (conception assistée par ordinateur, simulations énergétiques ou multi physiques, outils de dimensionnement, ...). Dans ce cas précis, notre méthodologie servirait de point d'entrée à la conception de l'acte de rénovation, permettant de bien appréhender les besoins exprimés, puis de proposer quelques scénarios de rénovation pertinents et efficaces. Les sorties de ce premier volet pourraient alimenter ensuite les entrées d'outils de conception détaillée pour faciliter le dimensionnement et l'évaluation fine des performances des approches retenues.

Pour conclure, la méthodologie générale d'aide à la décision pour la prescription de solutions d'amélioration énergétique proposée dans ce travail peut finalement être décollée de son application au monde du bâtiment. D'un côté nous avons proposé une démarche complète et automatisable, de l'autre un périmètre d'étude et des connaissances métiers. Le processus d'aide à la décision, depuis les enjeux jusqu'aux classements multicritères automatisés et l'interface manuelle de pilotage des solutions, pourrait être formalisé afin d'être décliné à de multiples applications requérant des outils de support décisionnel.

Bibliographie

1. SOeS, *La consommation énergétique des bâtiments et de la construction*. 2007, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (Commissariat général au Développement durable).
2. Carassus, J., B. Duplessis, and M. Labarre, *Économie et développement urbain durable : modèles économiques appliqués à la ville, financement et coût de l'investissement durable*. De Réseau Économie et développement urbain durable, Rencontre. Vol. Analyse des mécanismes incitatifs à la rénovation des logements. 2010: Ecole des mines.
3. EPBD, *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings* in *Official Journal* 2002. p. P. 0065 - 0071.
4. EPBD, *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*. 2010, Official Journal of the European Union.
5. EU, *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency*. 2012, Official Journal of the European Union.
6. Pelletier, P., *Grenelle de l'Environnement - Comité Opérationnel "Rénovation des bâtiments existants"*. 2008, DGUHC, ADEME.
7. Traisnel, J.-P., et al., *Habitat Facteur 4 : Etude d'une réduction des émissions de CO2 liées au confort thermique de l'habitat à l'horizon 2050*, in *Le Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement*, IDDRI, Editor. 2010.
8. Joffroy, P., *La réhabilitation des bâtiments: conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements*. 1999: Le Moniteur.
9. Orselli, J., *Recherche et développement sur les économies d'énergie et les substitutions entre énergies dans les bâtiments*, C.g.d.p.e. chaussées, Editor. 2005, Ministère du Transport, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.
10. Régis Bonetto and G. Sauce, *Gestion du patrimoine immobilier - Les activités de références*. Editions CSTB. 2006.
11. Debaveye, H. and P. Haxaire, *170 séquences pour mener une opération de construction. Méthodes*. 2012 (8ième édition): Le Moniteur. 394.
12. Perera, B., *La réhabilitation énergétique des maisons individuelles*. Formation-action. 2010: A.RE.COOP.
13. MOP, *Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée*.
14. DDT 25 - Service Urbanisme, H.e.v., *Fiche Technique DDT25 : Les acteurs dans le domaine du bâtiment - Rôles et responsabilités*, F. Technique, Editor. 2011, Etat Français: Département du Doubs. p. 4.
15. Kolokotsa, D., et al., *Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings*. *Advances in Building Energy Research*, 2009. **3**(1): p. 121-146.
16. Laumonier, C., *Évaluation du potentiel d'amélioration énergétique des bâtiments d'habitation existants*. 2006, CSTB.
17. Vergne, F. *Environnement et énergie : qu'en pensent les Français ?* Eau & énergie 2012 20 janvier 2012]; Available from: <http://www.lemoniteur.fr/197-eau-energie/article/actualite/872350-environnement-et-energie-ou-en-sont-les-francais?16272725=16272734>.
18. ADEME, CAH, and BUIS, *Observatoire permanent de l'amélioration énergétique de l'habitat (OPEN)*. 2008. p. 43.
19. Outrequin, P. and C. Charlot-Valdieu, *La méthode RECOBAT pour une REhabilitation COhérente des BATiments : Analyse, évaluation et optimisation de programmes de réhabilitation*, L. Calade, Editor. 2007. p. 82.
20. MARIE. *1 2 3 Réno en régions méditerranéennes et alpines*. 2013; Outil en ligne d'aide à la génération de bouquets d'amélioration énergétique permettant d'atteindre le facteur 4 sur des typologies de logements clairement identifiées. Pilotage par enjeux]. Available from: <http://www.123reno-med.eu/>.
21. Diakaki, C., E. Grigoroudis, and D. Kolokotsa, *Performance study of a multi-objective mathematical programming modelling approach for energy decision-making in buildings*. *Energy*, 2013. **59**(0): p. 534-542.
22. Rivallain, M., *Etude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation séquentielle des bâtiments existants*, in *Sciences de l'Ingénieur*. 2013, Université Paris-Est: Pas. p. 412.

Bibliographie

23. TABULA, *Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks : Existent Experiences in European Countries and Common Approach - first TABULA Synthesis Report*, <http://www.building-typology.eu/>, Editor. 2010, EU.
24. Pouthier, A., RGE = « Rien ne garantit l'efficacité » pour l'UFC – Que Choisir, in *LeMoniteur.fr*. 2014.
25. Soboul, A., *La Maison rurale française*. 1995.
26. Graulière, P., *Typologie des bâtiments d'habitation existants en France. Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique*. 2005: METL.
27. Ferry, A. and R. Lahrech, *Base de connaissances bâtiments existants : Cartographie du parc, secteur résidentiel : les bâtiments construits entre 1949 et 1974 in Modernisation Durable de l'Existant*. 2011, CSTB. p. 141.
28. INSEE, *Enquête Logement 2006*. 2006.
29. BPIE, *Data hub for the energy performance of buildings*. 2010, Buildings Performance Institute Europe.
30. POUGET and CSTB, *Guide ABC : Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs construits de 1850 à 1974*. EDIPA ed. 2011, Paris.
31. Chaumont, S., *Présentation des fichiers fonciers MAJIC*. 2009, DRE Limousin.
32. NREL. *National Residential Efficiency Measures Database (NREMD)*. 2010; Base de données publiques sur les mesures d'amélioration énergétique et les coûts d'actions de rénovation associés pour l'industrie des bâtiments aux USA]. Available from: <http://www.nrel.gov/ap/retrofits/>
33. CSTB. *ELODIE, logiciel d'analyse de cycle de vie des bâtiments* 2011; Available from: <http://www.elodie-cstb.fr/>.
34. *Cocon, un outil d'estimation de QEB (Qualité Environnementale de Bâtiments)*. Available from: <http://www.eosphere.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html>.
35. MEDDE, *Base de donnée Pégase*. 2012, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Commissariat général au Développement durable. p. Base de données des coûts de l'énergie pour les secteurs du bâtiment et de l'industrie. Les prix sont révisés régulièrement.
36. LeMoniteur, *Batiprix : Base de donnée de coûts de la construction*. 2012, Groupe LeMoniteur.
37. Batiactu, *Annuel des prix : Base de données des coûts de la construction*. 1995, Groupe Batiactu.
38. Fery, A. and R. Lahrech, *Base de connaissances bâtiments existants, Cartographie du parc : Secteur résidentiel - les bâtiments construits entre 1949 et 1974, in Modernisation Durable de l'Existant*. 2011, CSTB.
39. Porritt, S. *Adapting Dwellings to Climate Change : Retrofit Advice Tool*. 2012; Available from: <http://www.iesd.dmu.ac.uk/crew/index.php>.
40. *Solutions innovantes pour la réhabilitation des maisons individuelles: Vers des bâtiments "Facteur 4"*. 2013: CSTB.
41. ADEME, *Ventilation des bâtiments existants : préconisations pour améliorer les performances des installations*, ed. G. Pratique. 2007.
42. *Les travaux de rénovation thermique les plus efficaces*, ed. L.G. Pratiques. 2010: ANAH.
43. Salomon, T. and C. Aubert, *Fraîcheur sans clim' : Le guide des alternatives écologiques*. Habitat. 2004: Terre Vivante Editions.
44. RAGE, *Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 - Retours d'expériences dans les bâtiments à basse consommation & risques de non-qualité - Résultats 2011*. 2012.
45. RAGE, *VMC simple flux en habitat individuel : Conception et dimensionnement, installation et mise en oeuvre, entretien et maintenance*, in *Recommandations Professionnelles - Rénovation*, R.d.l.A.G.E. 2012, Editor. 2013.
46. Construction, A.Q. and F.E. SMA, *Fiches pathologie bâtiment*. 2013: Agence Qualité Construction Editions.
47. CSTB, *ALICE : Amélioration des Logements en Intégrant les Contraintes du Confort d'Été*, in *e-Cahiers du CSTB - Cahier 3619*. 2008.
48. Hannachi-Belkadi, N.K., *Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie*, in *Génie Civil*. 2008, Université Paris Est: Paris. p. 227.
49. Ministère de l'emploi, d.l.c.s.e.d.l., *Arrêté su 15 Septembre relatif aux méthodes et procédures applicables au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposé à la vente en France métropolitaine*. 2006.

50. Ministère de l'écologie, d.d.d., des transports et du logement, *Arrêté du 8 février 2012 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine* 2012.
51. Phénix_Evolution, et al. *ODMIR4 : Outils d'aide à la Décision pour des Maisons Individuelles Réhabilitées Facteur 4*. 2011; Available from: <http://www.batiment-energie.org/index.php?p=5>.
52. Loga, T. and J. Calisti, *TABULA WebTool UserGuide*. 2011.
53. Bluysen, P.M., *EPIQR and IEQ: indoor environment quality in European apartment buildings*. Energy and Buildings, 2000. **31**(2): p. 103-110.
54. Caccavelli, D. and J.-L. Genre, *Diagnosis of the degradation state of building and cost evaluation of induced refurbishment works*. Energy and Buildings, 2000. **31**(2): p. 159-165.
55. Figueira, J., S. Greco, and M. Ehrgott, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. 2005: Springer.
56. Maystre, L.-Y. and D. Bollinger, *Aide à la négociation multicritère*. Collection gérer l'environnement, ed. P.P.e.U. Romandes. 1999, Lausanne.
57. IFEN, *Aménagement du territoire et environnement : politiques et indicateurs*. 2000.
58. Moura, P., *Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain*, in *Génie Civil*. 2008, INSA: Lyon. p. 349.
59. Vanderpooten, D., *Aide multicritère à la décision : Concepts, méthodes et perspectives*, L.-U.P. Dauphine, Editor. 2008: ENS Cachan.
60. Roy, B., *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, ed. ECONOMICA. 1985.
61. Wang, J.-J., et al., *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13** (9): p. 2263-2278.
62. IZUBA. *EQUER : logiciel d'analyse de cycle de vie (ACV) du bâtiment*. Available from: <http://www.izuba.fr/logiciel/equer>.
63. ISO, *15686-5 : Bâtiments et biens immobiliers construits, Prévion de la durée de vie - Approche en coût global*. 2008, AFNOR.
64. CEN, *EN ISO 7730 in Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* 2006.
65. de Dear, R. and G.S. Brager, *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. 1998.
66. Sanselme, B. *NF X 35-103 une norme française en cours de révision*. Eclairage et santé 2008; Available from: <http://www.afe-eclairage.com.fr/uploads/documentation/635-ext.pdf>.
67. Reiter, S. and A. De Herde, *L' éclairage naturel des bâtiments*. 2004: Presses universitaires de Louvain.
68. CEN, *NF EN 13501-1+A1 : Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu* 2013.
69. *Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation* JORF, Editor. 1986.
70. MEDDE, *La modélisation de la ville : de la représentation au projet*, in *Collection « RéférenceS » de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)*. 2012.
71. Rivers, N. and M. Jaccard, *Combining Top-Down and Bottom-Up approaches to energy-economy modelling using discrete choice methods*. The Energy Journal, 2005. **26**(11): p. 83-106.
72. Forbus, K.D., *Qualitative modeling*, in *Handbook of knowledge representation*. Foundation of artificial intelligence, Elsevier. p. 361-393.
73. Bazzana, M., *Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliquée aux systèmes constructifs*, in *Génie civil et sciences de l'habitat*. 2011, Université de Grenoble: Chambéry.
74. Jouvenel, H.d., *La démarche prospective : Un bref guide méthodologique*. Futuribles, 1999. **n°247**.
75. Martin, L., *Identification sources et influences des incertitudes dans la construction de logements à haute performance énergétique*. Thèse de Mastère, 2011.
76. Bernier, J., *Statistique Pour L'environnement : Traitement Bayésien De L'incertitude*. 2000.
77. Curt, C. and D. Boissier, *Utilisation de la théorie des possibilités pour l'évaluation de la performance des barrages*, in *16ème congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement* 2008: Avignon.

Bibliographie

78. Tacnet, J.M., et al., *Expertise, décision et incertitude : jusqu'où une approche interdisciplinaire est-elle possible dans le cadre de la gestion intégrée des risques naturels en montagne?* OPDE 2010, 2010.
79. SOLAMEN, *Incertitudes & sensibilité, Descriptif des pratiques de l'industrie - Préconisations pour l'analyse thermique bâtiment.* 2011.
80. Douguet, J.-M. *Evaluation de la qualité des connaissances.* 2006; Available from: <http://e-sige.ensmp.fr/uved/risques/index.html>
81. Spitz, C., *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments,* in *Génie Civil.* 2012, Université de Grenoble.
82. Jacques, J., *Pratique de l'analyse de sensibilité : comment évaluer l'impact des entrées aléatoires sur la sortie d'un modèle mathématique.* 2011, Université de Lille.
83. Morris, M.D., *Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments.* *Technometrics*, 1991. **33**(2): p. 161-174.
84. de Wit, S. and G. Augenbroe, *Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications.* *Energy and Buildings*, 2002. **34**(9): p. 951-958.
85. looss, B., *Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques.* 2010.
86. Campolongo, F., A. Saltelli, and J. Cariboni, *From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach.* *Computer Physics Communications*, 2011. **182**(4): p. 978-988.
87. Spitz, c., L. Mora, and E. Wurtz, *Analyse de sensibilité du comportement thermique d'un logement vis-à-vis des paramètres thermo-physiques de l'enveloppe,* in *IBPSA.* 2010, INES, LOCIE.
88. Tian, W. and P. de Wilde, *Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study.* *Automation in Construction*, 2011. **20**.
89. Beaulieu, L., *Analyse de sensibilité d'un indice de risque de perte de phosphore en zone cultivée.* 2005, Université de Laval.
90. Saucier, R., *Computer Generation of Statistical Distributions.* 2000, Army Research Laboratory.
91. Macdonald, I. and P. Strachan, *Practical application of uncertainty analysis.* *Energy and Buildings*, 2001. **33**(3): p. 219-227.
92. Guyonnet, D., et al., *Projet IREA - Traitement des incertitudes en évaluation des risques d'exposition.* 2005, BRGM.
93. Zadeh, L.A., *Fuzzy sets.* *Information and Control*, 1965. **8**(3): p. 338-353.
94. Fawcett, W., et al., *Flexible strategies for long-term sustainability under uncertainty.* *Building Research & Information*, 2012. **40**(5): p. 545-557.
95. Hilsson, D. *Describing probability: The limitations of natural language.* in *PMI Global Congress 2005 EMEA Proceedings.* 2005. Edinburgh, UK.
96. Bouchon-Meunier, B., *La Logique floue et ses applications.* 1995: Addison-Wesley France.
97. Rohmer, J., *La théorie des possibilités comme outil de représentation des incertitudes épistémiques d'une chaîne de traitement du risque sismique.* 7ème Colloque National AFPS, 2007.
98. Patrick Naïm, et al., *Réseaux Bayésiens*, ed. Algorithmes. 2007: Eyrolles.
99. Pietquin, O., *Gestion de L'Incertain*, Supélec, Editor. 2010.
100. Sedki, K., *Modèles logiques et graphiques pour l'aide à la décision.* 2011, Séminaire LAMIH.
101. Buchanan, B. and E. Shortliffe, *Rule-Based Expert Systems : The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project.* 1984.
102. Heckerman, D., *Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors.* *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 1986: p. 167-196.
103. Nabil, B., *Méthodes de classification multicritère, méthodologie et alications à l'aide au diagnostic médical,* in *Institut de statistique et de recherche opérationnelle.* 2000, Université libre de Bruxelles: Bruxelles. p. 156.
104. Thorel, M., C. Buhé, and F. Andrieux, *Aide à la décision multicritère pour la réhabilitation énergétique: Application aux bâtiments résidentiels,* in *31ème Rencontres de l'AUGC.* 2013: E.N.S. Cachan.
105. Pollino, C.A., et al., *Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment.* *Environmental Modelling & Software*, 2007. **22**(8): p. 1140-1152.
106. Delcroix, V., *Modèles graphiques probabilistes pour les problèmes récurrents d'ADMC,* in *Actes IAF 2012.* 2012, Unuiversité de Valenciennes.
107. Gérard Scorletti and G. Binet, *Réseaux de Pétri.* 2006, Université de Caen / Basse-Normandie: Caen. p. 105.

108. Déterminer les cibles à atteindre. 2007; Available from: <http://www.lesenr.fr/hqe/demarche-hqe/22-les-cibles-hqe.html?start=1>.
109. Huang, S.-L., et al., *A Sensitivity Model (SM) approach to analyze urban development in Taiwan based on sustainability indicators*. Environmental Impact Assessment Review, 2009. **29**(2): p. 116-125.
110. Pernodet-Chantrelle, F., *Méthode d'optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires. Application à l'évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride.*, in *MEGA*. 2010, ENTPE: Lyon.
111. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1989: Addison-Wesley.
112. Sauce, G., *Aide à la conception d'esquisse de bâtiment d'habitation par la manipulation de critères de qualité*. 1984, INSA: Lyon. p. 159.
113. Chardon, S., et al., *Développement d'un outil pratique d'optimisation utilisant des algorithmes génétiques pour l'aide à la conception économique et énergétique des maisons individuelles, in conférence IBPSA France*. 2014: Arras.
114. Taillandier, F., A. Ndiaye, and C. Fernandez, *Optimisation par essaim particulière de la planification des actions de maintenance d'un parc immobilier, in 31ème Rencontres de l'AUGC*. 2013: E.N.S. Cachan.
115. Bornatico, R., et al., *Optimal sizing of a solar thermal building installation using particle swarm optimization*. Energy, 2012. **41**(1): p. 31-37.
116. Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi, *Optimization by Simulated Annealing*. Science, 1983. **220**(4598): p. 671-680.
117. Glover, F. and M. Laguna, *Tabu search*. 1997, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
118. Dorigo, M. and L.M. Gambardella, *Ant colonies for the traveling salesman problem*. BioSystems, 1997. **43**: p. 73-81.
119. Fonsesa, C.M. and P.J. Fleming, *An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization*. Evolutionary Computation, 1995. **3**(1): p. 1-16.
120. Vanderpooten, D. *Aide multicritère à la décision : concepts, méthodes et perspectives*. 2008. ENS Cachan.
121. Bertsch, V., O. Rentz, and J. Geldermann. *Preference Elicitation and Sensitivity Analysis in Multi-Criteria Group Decision Support for Nuclear Remediation Management*. in *Proceedings ISCRAM2007*. 2007.
122. Zeleny, M., *Multiple criteria decision making*. New York: McGraw-Hill, 1982.
123. Churchman, C.W. and R.L. Ackoff, *An approximate measure of value*. Journal of the Operational Research Society of America, 1954. **2**(2): p. 172-187.
124. Saaty, T., *The analytic hierarchy process (AHP)*. McGraw Hill, 1980.
125. Zou, Z.-h., Y. Yun, and J.-n. Sun, *Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment*. Journal of Environmental Sciences, 2006. **18**(5): p. 1020-1023.
126. Taillandier, F., *La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier, in génie civil*. 2009, Université de Savoie: Bourget-du-Lac. p. 333.
127. Ben Mena, S., *Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision*. Biotechnol. Agron. Soc. Environ, 2000. **2**: p. 83-93.
128. Martel, J.-M., *L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications, in CORS-SCRO*. 1999: Windsor, Canada.
129. YU, W., *Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri : Concepts, Méthodes et Applications*. 1992, Université de Paris-Dauphine.
130. Taillandier, F., Z.M. Sbartaï, and D. Breysse. *Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier – Développement méthodologique et étude de cas*. in *31èmes Rencontres de l'AUGC*. 2013. E.N.S. Cachan.
131. Zanakis, S.H., et al., *Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods*. European Journal of Operational Research, 1998. **107**(3): p. 507-529.
132. Lindsay, R.K., et al., *DENDRAL: A case study of the first expert system for scientific hypothesis formation*. Artificial Intelligence, 1993. **61**(2): p. 209-261.
133. MEDDE. *Le crédit d'impôt développement durable dédié aux travaux d'économies d'énergie et aux équipements d'énergies renouvelables*. 2014 [Janvier 2014]; Available from: http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-credit-d-impot-developpement_28834.html.
134. MEEDAT, *Méthode de calcul TH-C-E ex, Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul*. Journal Officiel de la République Française, 2008.

135. METL, *Arrêté du 30 avril 2013 portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*. 2013.
136. METL, *Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine : ANNEXE 1 - Méthode 3CL-DPE v1.3*. 2012, JORF.
137. ADEME, *Un air sain chez soi*. L'habitat, ed. j.é. J'éco-rénove. 2013: ADEME.
138. OQAI, *Observatoire de la qualité d'air intérieur : dix ans de recherche*. CSTB Editions. 2011.
139. OQAI, *Campagne nationale "Logements" : Etat de la qualité de l'air intérieur dans les logements français*. 2007.
140. OQAI and ADEME, *La pollution de l'air*. 2008: Dunod.
141. AQC, ed. *Réhabilitation et développement durable*. BATIMAT 2007, ed. N. spécial. 2007.
142. AQC, *Prévention des risques en réhabilitation de grands ouvrages de bâtiment*, AQC, Editor. 2012. p. 38-41.
143. HQE, A., *les 14 cibles du référentiel*.
144. Thorel, M., et al., *Preferences clarification method from expert analysis for multi-criteria decision support in a building energy renovation process*. Building Research & Information, 2014.
145. Maystre, L.Y., et al., *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. 1994: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
146. Abdulhamid rahal, A., *Contribution à l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment hospitalier*, in *LOCIE*. 2011, Université de Savoie: Chambéry.
147. Neapolitan, R.E., *Learning Bayesian networks*. 2004: Pearson Prentice Hall.
148. Pearl, J., *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference (2nd ed.)*. 1988, San Francisco: Morgan Kaufmann. 552.
149. *HUGIN Expert*. Available from: <http://www.hugin.com/productsservices/products/feature-list>.
150. Norsys. *Netica application*. 1998; Available from: <http://www.norsys.com>.
151. *BayesiaLab*. Available from: <http://www.bayesia.com/en/products/bayesialab.php>.
152. Cano, A. *Home Page for users of the Elvira System*. 2001; Available from: <http://leo.ugr.es/elvira/>.

Annexes

A. Glossaire Technique	234
B. Arborescences de procédés techniques	237
C. Méthode de pondération AHP	250
D. Matrice d'influence finale.....	254
E. Fonctions d'impacts	255
F. Base de règles expertes	266
G. Mode « Personnalisation des scénarios de rénovation ».....	271

A. Glossaire Technique

Une partie de la terminologie technique utilisée dans la méthode d'aide à la décision proposée est définie ci-après. Hors de ce contexte, la signification de certaines notions peut varier.

Alternatives (potentielles de rénovation)

Assemblage de procédés techniques (ou à minima de familles de procédés) répondant chacun à une approche fonctionnelle. Ce sont les alternatives qui constituent les scénarios d'amélioration énergétique, évalués puis comparés, dans la méthodologie d'aide à la décision proposée.

Synonymes : variantes, actions, scénarios de rénovation, assemblage de familles de procédés, assemblage de procédés techniques.

Approche fonctionnelle

Ensemble de structures ou de systèmes répondant à une fonctionnalité première du bâti. Par exemple : chauffage, ventilation, isolation des planchers bas, baies vitrées...

Critère de décision

Indicateurs de performance participant aux méthodes d'aide à la décision multicritère utilisées dans la méthodologie développée. Leur nature et leur nombre dépend des préférences exprimées par la maîtrise d'ouvrage.

Enjeux de rénovation

Objectifs ou contraintes pragmatiques, exprimés par une maîtrise d'ouvrage, poussant à l'acte de rénover son bâtiment.

Famille de procédés

Ensemble de solutions techniques, de rénovation ou permettant de décrire un bâti existant, répondant à une approche fonctionnelle précise. Par exemple, les solutions d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) sont une famille de procédés répondant à l'approche fonctionnelle « Isolation des parois opaques verticales ».

Synonymes : famille de solutions de rénovation.

Fonction d'impact

Fonction mathématique permettant d'évaluer la performance sur un indicateur d'une alternative de rénovation à partir d'un jeu de données d'entrées. Dans notre cas, la fonction mathématique est une fonction d'agrégation par sommes pondérées ; les jeux de données d'entrées sont une évaluation intrinsèque, sur une échelle commune de notation, de tous les variables pouvant contribuer à la modification de niveau de performance d'un indicateur.

Synonymes : fonction d'utilité, fonction de coût.

Indicateur de performance

Unité de mesure de la performance d'un bâtiment ou d'un projet de rénovation pour un aspect donné (énergie, environnement...).

Maîtrise d'œuvre (MOE)

Personne devant apporter une réponse architecturale, technique et économique au programme. Il dirige et contrôle l'exécution des travaux. Dans le contexte de la rénovation énergétique de maisons individuelles, ce rôle est rempli par le professionnel en charge de la conception-réalisation de l'opération.

Maîtrise d'ouvrage (MOA)

Personne pour laquelle l'ouvrage est construit ou rénové.

Synonymes : décideur, propriétaire, particulier...

Méthodologie d'aide à la décision

Processus structuré d'aide à la décision visant à assister les acteurs d'une opération de rénovation de bâtiment pour concevoir des scénarios de rénovation adaptés à un besoin exprimé et efficace du point de vue de la performance énergétique.

MOP

Maîtrise d'ouvrage publique.

Prescription (aide à la)

Ensemble de recommandations techniques, plus ou moins détaillées, sur des actions ou un processus à réaliser. Dans ce travail de thèse, la notion de prescription fait référence à l'élaboration de scénarios de rénovation.

Profil Global de Performance (PGP)

Profil de valeurs-cibles sur les indicateurs de performance modélisés pour satisfaire les enjeux de rénovation, sélectionnés et priorisés par la maîtrise d'ouvrage.

Profil de Poids Relatifs (PPR)

Profil de poids relatifs sur les indicateurs de performance modélisés. Ils représentent l'importance relative de chaque aspect performantiel pour une maîtrise d'ouvrage et pour une opération de rénovation donnée.

Procédé Technique

Le procédé technique générique représente la brique élémentaire de notre système d'évaluation de la performance des alternatives de rénovation. Un procédé technique est obligatoirement rattaché à une unique famille de procédés. Il permet également de décrire les situations avant rénovation.

Synonymes : solutions de rénovation, actions élémentaires d'amélioration de la performance énergétique.

Professionnel (en charge de l'opération de rénovation)

Principal utilisateur de la méthodologie d'aide à la décision développée, il est la personne en charge de la conception-réalisation d'une opération de rénovation. Dans notre périmètre d'étude, celui de la maison individuelle, la notion de « professionnel » correspond aux métiers du bâtiment tels que ceux d'artisans ou d'entrepreneurs.

Synonymes : Maîtrise d'œuvre (MOE).

Règles Expertes

Ensemble de règles ou recommandations métiers permettant d'orienter intelligemment les choix techniques et architecturaux en fonction d'un contexte préalablement défini. Nous renverrons le lecteur à la page 113 pour en apprendre d'avantage.

Réseau bayésien

Un réseau bayésien est un modèle graphique probabiliste représentant des variables aléatoires sous la forme d'un graphe orienté acyclique. Intuitivement, ils sont à la fois des modèles de représentation des connaissances et des machines d'intelligence artificielle permettant de raisonner. Une définition plus complète est proposée en page 71. Ce type de technologie est utilisé dans ce mémoire pour optimiser et évaluer des alternatives de rénovation.

Rénovation énergétique

La définition de ce terme, centre d'intérêt de cette étude, est détaillée en page 10 du mémoire.

Synonymes : réhabilitation énergétique, opération d'amélioration énergétique d'un bâtiment existant.

Spécificité Technique

Caractéristique architecturale ou technique de bâtiment intervenant dans l'élaboration des fonctions d'impacts de la méthodologie développée. Une plus ample définition est proposée en page 116.

Table de Probabilités Conditionnelles (TPC)

Formalisation particulière des connaissances expertes génériques modélisées dans un réseau bayésien. Définition en page 163.

Synonymes : Table de Probabilités jointes (TPJ).

Table de Probabilités Marginales (TPM)

Formalisation particulière des connaissances expertes génériques modélisées dans un réseau bayésien. Définition en page 163.

Synonymes : Loi de probabilité marginale.

Typologie

Démarche consistant à définir un certain nombre de types afin de faciliter l'analyse, la classification et l'étude de réalités complexes. Par extension, la typologie désigne la liste des types propres à l'ensemble d'étude. Aucune typologie n'a de valeur scientifique reconnue ; aussi, l'établissement d'une typologie donnée doit correspondre à l'objectif fixé de l'étude.

[Définition d'après Daniel Quenard, CSTB]

B. Réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens reposent sur un formalisme basé sur la fusion des théories des probabilités et des graphes. Ils permettent à un ou plusieurs experts de formaliser leur connaissance sous forme d'un modèle graphique de relations causales (causes → effets) indiquant les dépendances entre les variables. Cette description graphique est transformée ensuite en loi de probabilité équivalente afin de prendre en compte les aspects incertains.

Concrètement, un réseau bayésien est le rassemblement de deux aspects conceptuels :

- un aspect graphique, appelé graphe orienté sans circuit (DAG⁷⁹ en anglais), qui structure la dépendance et la causalité entre les variables sous forme de nœuds et d'arcs orientés ;
- un aspect quantitatif, appelé espace probabilisé fini, qui décrit cette dépendance entre les variables sous forme de tables de probabilités conditionnelles.

Un réseau bayésien est donc un graphe relationnel auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente.

Généralités

L'utilisation première d'un réseau bayésien est l'inférence de connaissances. Une révision des observations sur un système modélisé permet de mettre à jour dynamiquement les tables de probabilités de tous les nœuds du réseau afin de réviser potentiellement son jugement. Il permet donc de voir comment le système évolue au regard d'un complément d'observation, mais aussi d'identifier quels nœuds d'observation sont les plus critiques et donc de focaliser l'action ou la recherche d'informations complémentaires sur ces derniers.

La propriété fondamentale des réseaux bayésiens, basée directement sur le théorème de Bayes, établit que la probabilité conditionnelle d'une valeur d'une variable X_i sachant la valeur d'une autre variable X_j peut être calculée par l'équation suivante :

$$P(X_i|X_j) = \frac{P(X_j|X_i) \cdot P(X_i)}{P(X_j)}$$

Par ce principe, les réseaux bayésiens permettent de représenter d'une manière compacte une distribution de probabilité jointe, associée à l'ensemble des variables en utilisant la notion d'indépendance. La distribution de probabilité jointe est décomposée sous forme d'un produit des distributions de probabilités locales selon la règle de chaînage suivante :

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | pa(X_i))$$

où $pa(X_i)$ représente l'ensemble des parents du nœud X_i dans le graphe. En d'autres termes, la probabilité d'une observation (un nœud) dépend des probabilités des observations parentes (nœuds parents).

Par rapport aux outils d'inférence fonctionnant à base de règles logiques, le plus souvent utilisés sans les systèmes experts, les réseaux bayésiens permettent d'intégrer l'incertitude dans le raisonnement, aussi bien au niveau des observations que dans les règles conditionnelles. La quantification de l'incertain sous forme de probabilités permet d'associer à chaque décision, un coefficient ou indicateur de risque, très utile selon la nature de la décision à prendre.

⁷⁹ DAG : Directed Acyclic Graph

Les réseaux bayésiens permettent de rassembler au sein d'un même modèle graphique des données de nature différente (observations, expertises, réglementations, retours d'expérience) pour en extraire des connaissances utiles à la prise de décision, mais aussi contrôler ou prévoir le comportement d'un système, ou encore diagnostiquer les causes d'un phénomène.

Ce type de modélisation de la connaissance est utilisé dans de nombreux domaines : santé (diagnostic, localisation de gènes), industrie (contrôle d'automates ou de robots), informatique et réseaux (agents intelligents), marketing (data mining, gestion de la relation client), banque et finances (scoring, analyse financière), management (aide à la décision, knowledge management, gestion du risque), etc. [98].

Construction d'un réseau bayésien

La construction de réseaux bayésiens s'effectue en trois étapes reprises dans la Figure 57. Chacune de ces étapes peut impliquer un recueil d'expertise, au moyen de questionnaires écrits, d'entretiens individuels, ou encore de séances de brainstorming [98].

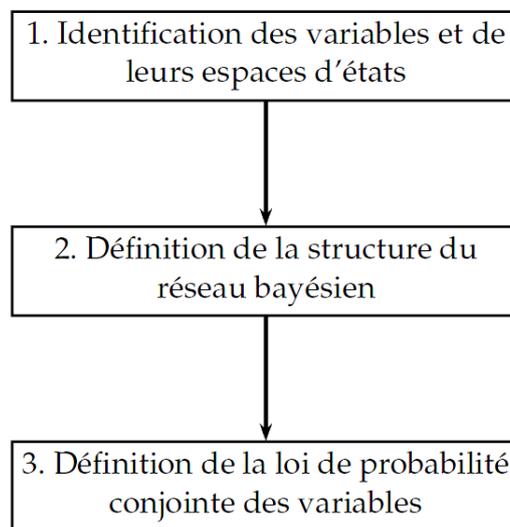


Figure 57 – Étapes de construction d'un réseau bayésien

La première étape de construction consiste à déterminer l'ensemble des variables caractérisant le système. Il faut chercher le compromis entre précision de la représentation et la maniabilité du modèle. Pour cette étape, des analyses de sensibilité sur les paramètres du système à modéliser peuvent aider à trouver ce compromis. Lorsque toutes les variables souhaitées sont identifiées, il faut définir leurs espaces d'états. C'est-à-dire qu'il faut décrire l'ensemble des valeurs possibles que chaque variable peut avoir⁸⁰. Il est important de limiter le nombre de valeur possible par variable car la taille des tables de probabilités conditionnelles (décrites pour les nœuds ayant des *parents*) croît exponentiellement avec le nombre de parents et le nombre de valeurs possibles par variable.

La seconde étape permet de structurer les variables précédemment définies en relations causales. L'information doit pouvoir circuler des observations marginales (nœuds sans *parents*) jusqu'aux effets terminaux (nœuds sans *enfants*) en évitant l'apparition de circuit orienté (exemple en Figure 58, interdit dans le formalisme des réseaux bayésiens, mais possible dans les diagrammes cognitifs). L'interrogation d'experts permet d'identifier les interactions entre variables et d'orienter convenablement les flèches des causes aux effets. Lorsque l'on dispose de données statistiques suffisantes ou de retours d'expérience sur les

⁸⁰ La majorité des logiciels de réseaux bayésiens ne traite que les modèles à variables discrètes, ayant un nombre fini de valeurs possibles.

variables du système, la structure du réseau bayésien peut être apprise automatiquement par des techniques d'*apprentissage*. Nous n'aborderons pas cet aspect des réseaux bayésiens dans cette étude. Pour en apprendre d'avantage, consultez l'ouvrage de référence écrit par Patrick Naïm sur ce sujet [98].

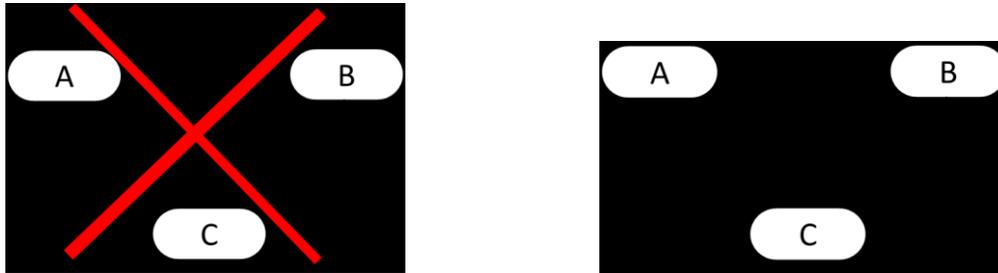


Figure 58 – Cycle orienté (à gauche), Cycle non orienté (à droite)

La troisième et dernière étape consiste à renseigner les tables de probabilités associées aux différentes variables. Cette étape est souvent délicate car les experts se montrent souvent réticents à quantifier la plausibilité d'un évènement qu'ils n'ont jamais observé. Cependant les appréciations qualitatives de ces derniers sur la dépendance de certains couplages de variables permet de chiffrer la probabilité d'apparition d'un évènement, soit directement sous la forme de probabilité conditionnelle, soit en utilisant des tables de traduction de termes linguistiques en probabilités quantitatives équivalentes (voir le Tableau 8 dans la partie *Traversée de l'état de l'art*).

De manière applicative, deux types de probabilités contribuent au bon fonctionnement d'un réseau bayésien en fonction de la position de la variable (nœud) dans ce dernier :

- Les variables sans parents : l'expert doit préciser la loi de probabilité **a priori** (appelée également loi marginale⁸¹) de la variable.
- Les variables possédant des parents : l'expert doit exprimer la dépendance de chaque variable en fonction des variables parentes. Pour y parvenir, deux alternatives s'offrent à l'expert [147] :
 - le remplissage de tables de probabilités conditionnelles (TPC) (loi conjointe de probabilités) ;
 - l'affectation d'équations ou fonctions déterministes.

Utilisation d'un réseau bayésien

Les réseaux bayésiens sont une formalisation synthétique et probabiliste de connaissances génériques. Leur finalité est de produire des connaissances nouvelles à partir d'observations spécifiques injectées dans le réseau en utilisant des méthodes d'inférence probabiliste. Pour réaliser de l'inférence dans un réseau bayésien, on commence par compiler ses lois de probabilités à l'aide d'arbres de jonction (Junction Tree [148]) qui permettent de réaliser une factorisation partielle du graphe, puis on lui applique un algorithme d'inférence. Deux grandes familles d'algorithmes d'inférence peuvent être utilisées : les méthodes d'inférence exacte (i.e. application du théorème de Bayes) et les méthodes d'inférence approchée (ex : *variable elimination, Gibbs sampling, expectation propagation, importance sampling...*). Les premières donnent des résultats exacts mais sont extrêmement coûteuses en temps et en mémoire pour des réseaux de grandes tailles ; les secondes nécessitent moins de ressources mais les résultats obtenus ne sont que des approximations de la solution exacte.

⁸¹ Ou encore appelée Table de Probabilités Marginales (TPM)

Logiciels de modélisation de réseaux bayésiens

Les outils informatiques les plus connus⁸² permettant de modéliser des réseaux bayésiens et procéder à des inférences bayésiennes sont :

- Hugin [149]
- Netica [150]
- BayesiaLab [151]
- Elvira [152] (OpenSource)

⁸² Une liste mise à des outils (logiciel, toolbox et API) utilisant la technologie des réseaux bayésiens est accessible à l'adresse internet suivante :
<http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/bnsoft.html>

C. Arborences de procédés techniques

Les nœuds sur fond de couleur violette représentent des Familles de Procédés (FP). Les nœuds sur fond de couleur grise représentent des attributs techniques. Par définition, un Procédé Technique (PT) est obligatoirement rattaché à une famille de procédés et est constitué d'un ou d'un assemblage possible d'attributs techniques. En d'autres termes, sur les arborences de nœuds présentées ci-après, chaque cheminement de nœuds rattachés par des flèches, représente un procédé technique.

a. Procédés techniques de l'AF_1 « Isolation des parois opaques verticales »

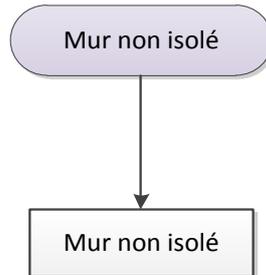


Figure 59 – Arborescence du seul PT de la FP « mur non isolé »

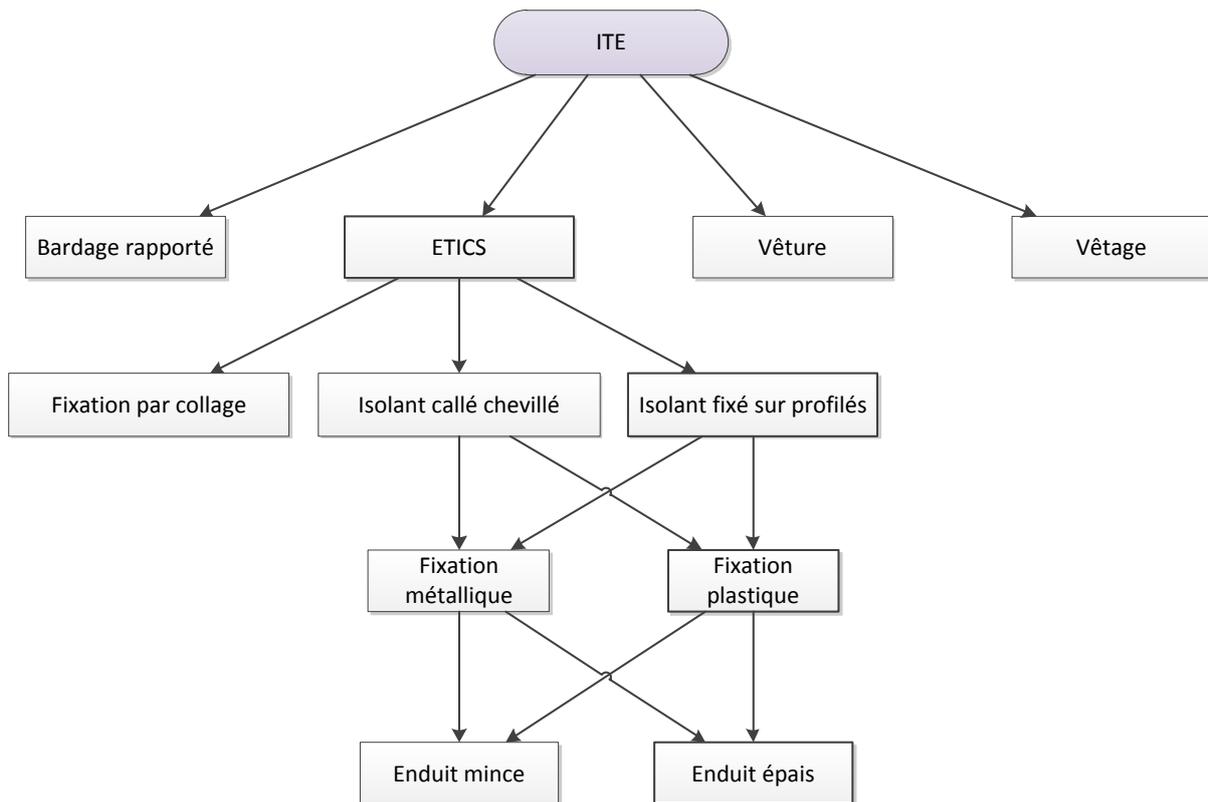


Figure 60 – Arborescence des 12 PT de la FP « ITE »

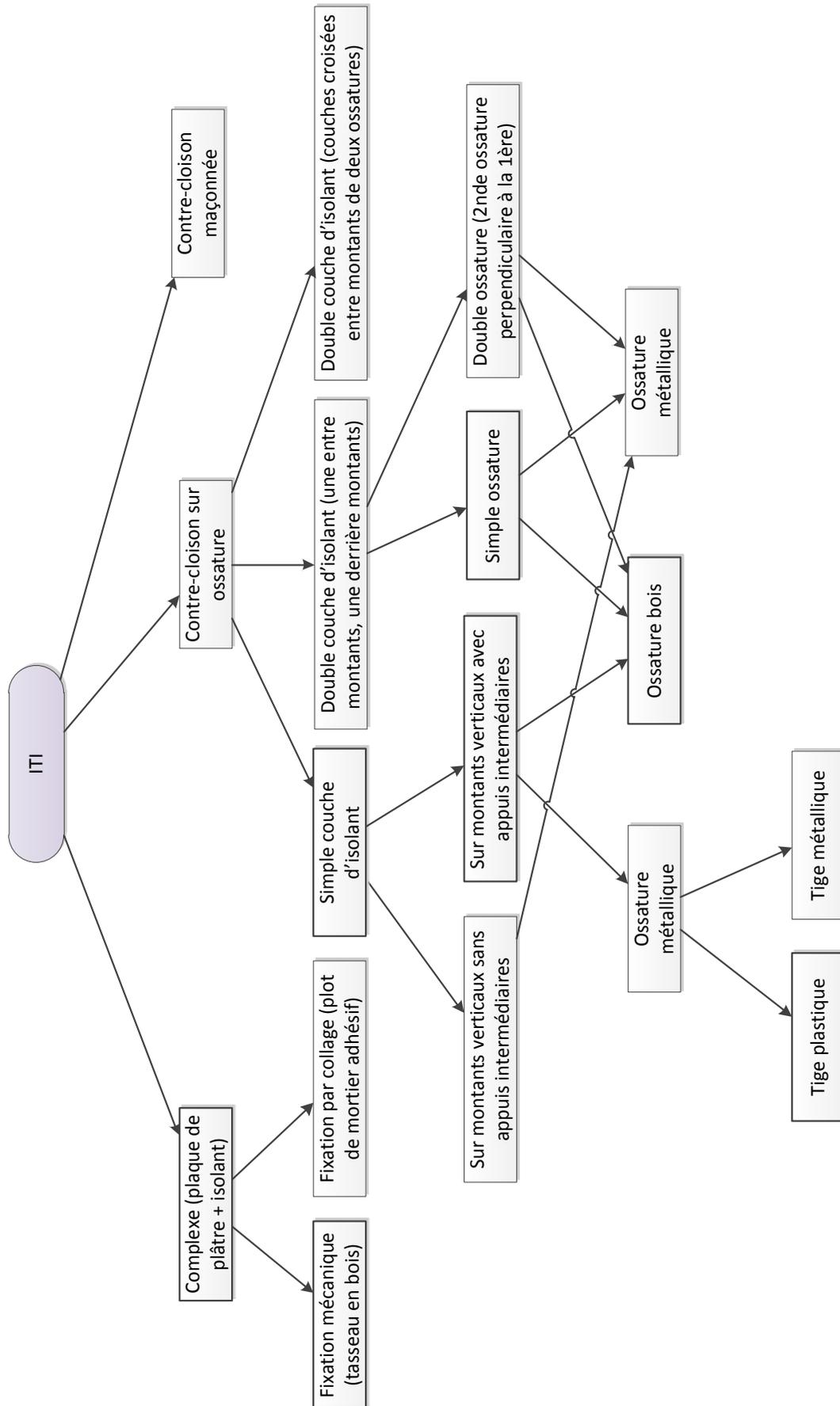


Figure 61 – Arborescence des 11 PT de la FP « ITI »

b. Procédés techniques de l'AF_3 « Isolation des planchers hauts et toitures »

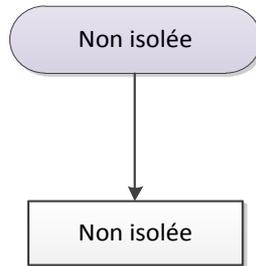


Figure 62 – Arborescence du seul PT de la FP « non isolée »

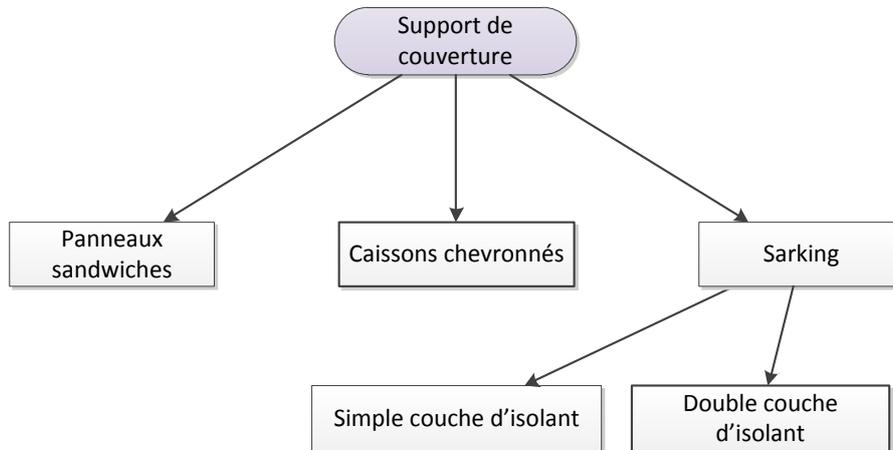


Figure 63 – Arborescence des 4 PT de la FP « support de couverture »

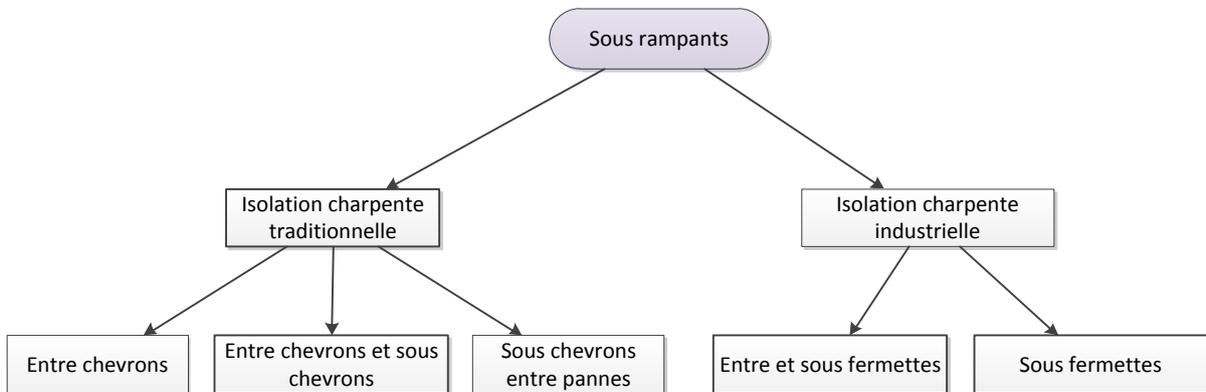


Figure 64 – Arborescence des 5 PT de la FP « [isolation] sous rampants »

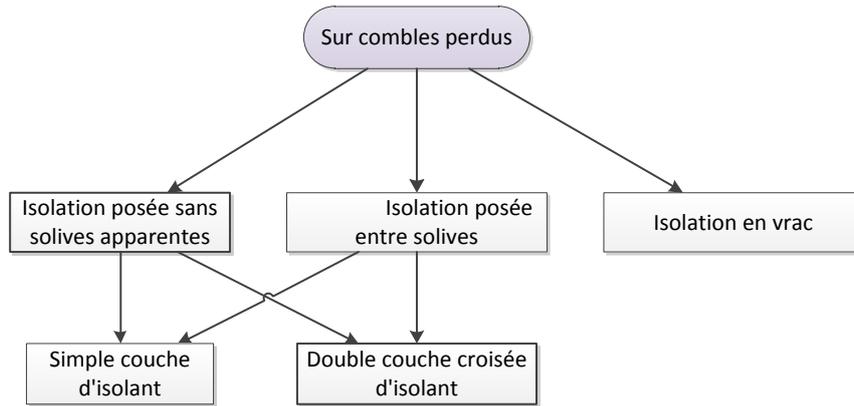


Figure 65 – Arborescence des 5 PT de la FP « [isolation] sur combles perdus »

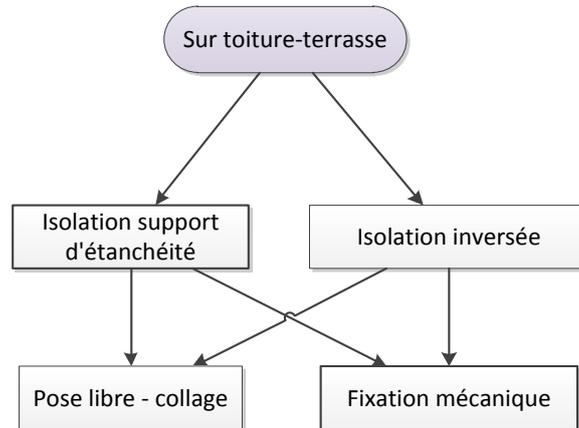


Figure 66 – Arborescence des 4 PT de la FP « [isolation] sur toiture-terrasse »

c. Procédés techniques de l'AF_8 « ventilation »

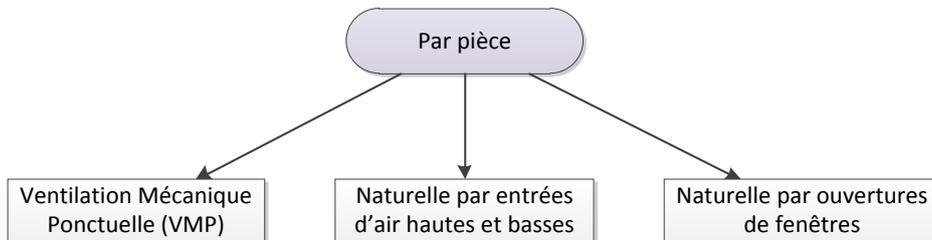


Figure 67 – Arborescence des 3 PT de la FP « [ventilation] par pièce »

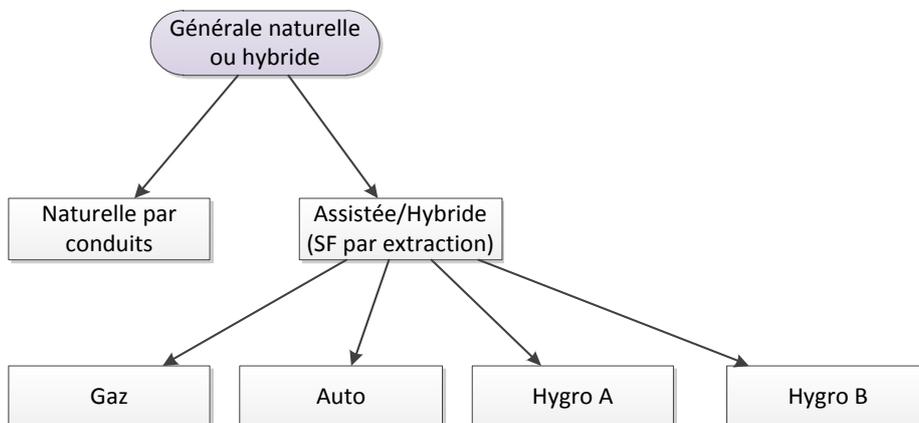


Figure 68 – Arborescence des 5 PT de la FP « [ventilation] générale naturelle ou hybride »

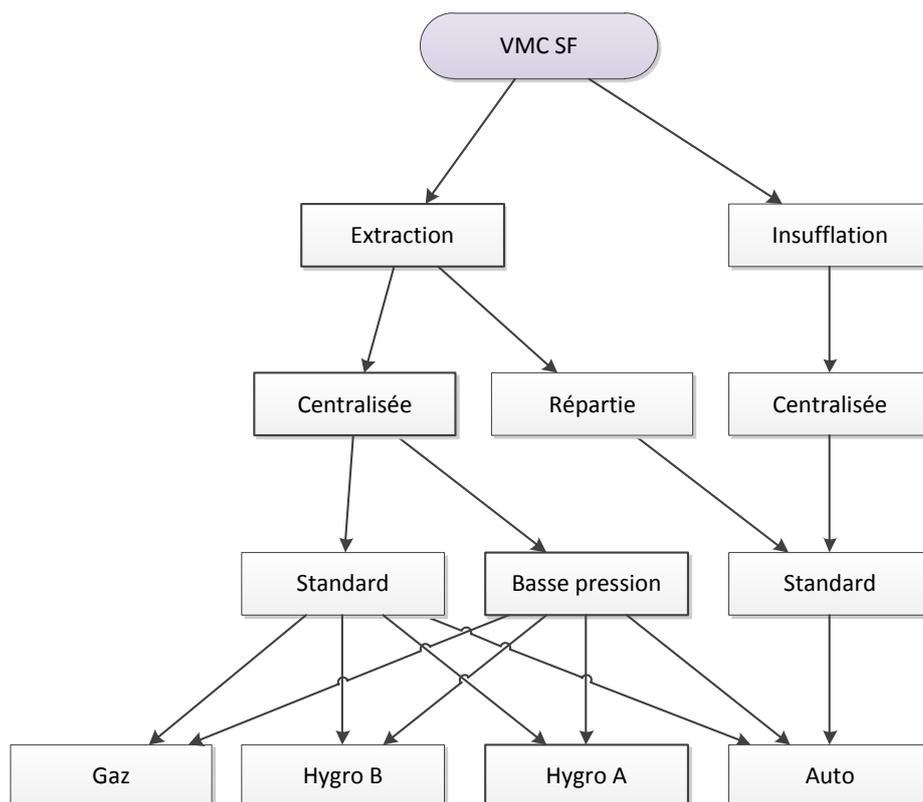


Figure 69 – Arborescence des 10 PT de la FP « VMC SF »

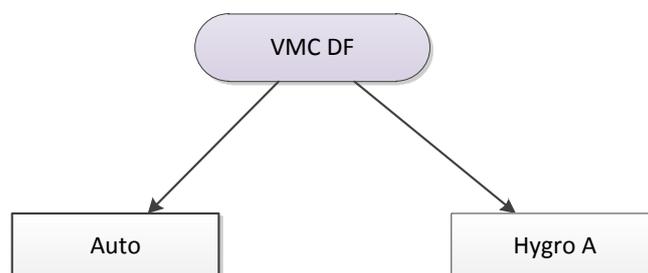


Figure 70 – Arborescence des 2 PT de la FP « VMC DF »

d. Procédés techniques de l'AF_9 « chauffage »

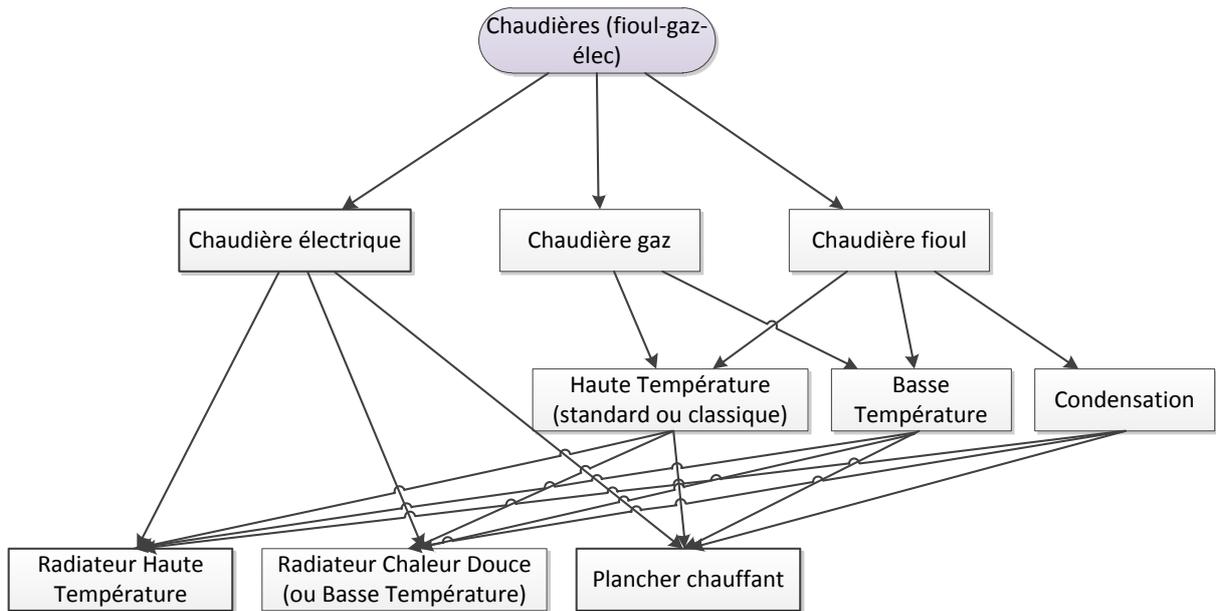


Figure 71 – Arborescence des 21 PT de la FP « Chaudières (fioul-gaz-électricité) »

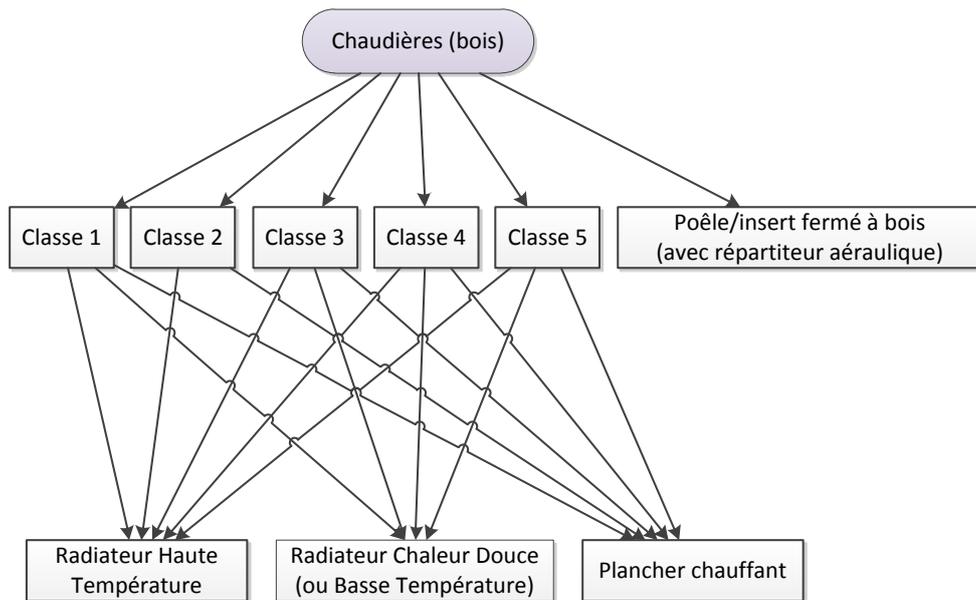


Figure 72 – Arborescence des 16 PT de la FP « Chaudières bois »

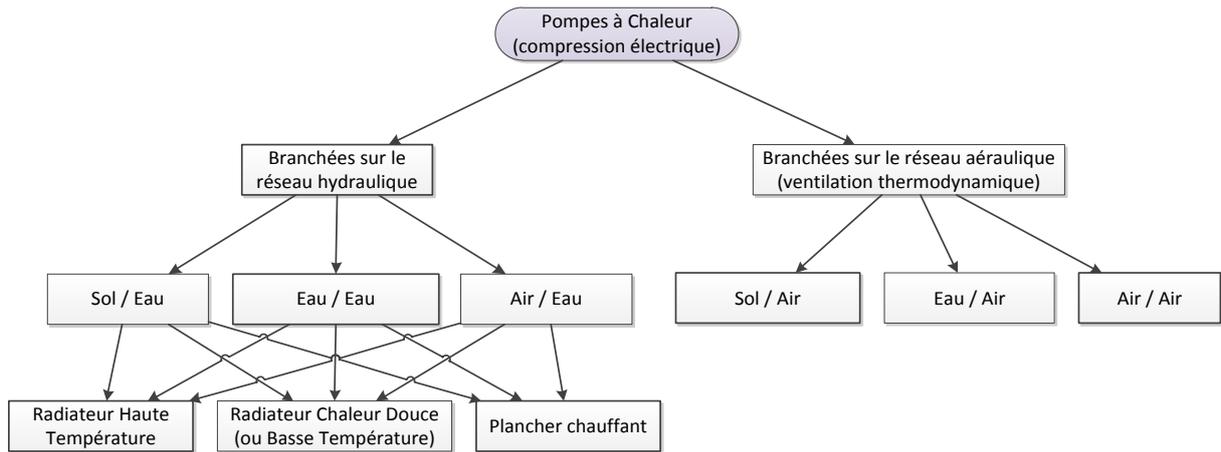


Figure 73 – Arborescence des 12 PT de la FP « PAC »

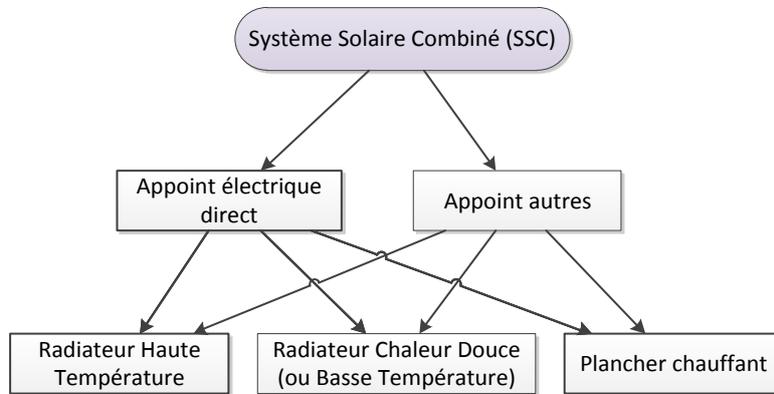


Figure 74 – Arborescence des 6 PT de la FP « SSC »

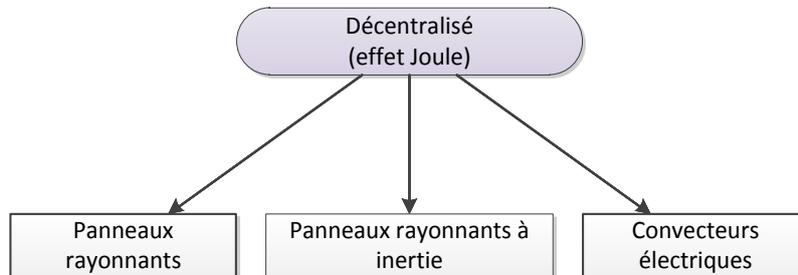


Figure 75 – Arborescence des 3 PT de la FP « Décentralisé »

e. Procédés techniques de l'AF_10 « ECS »

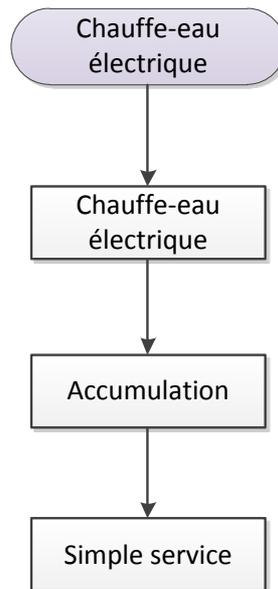


Figure 76 – Arborescence du seul PT de la FP « Chauffe-eau électrique »

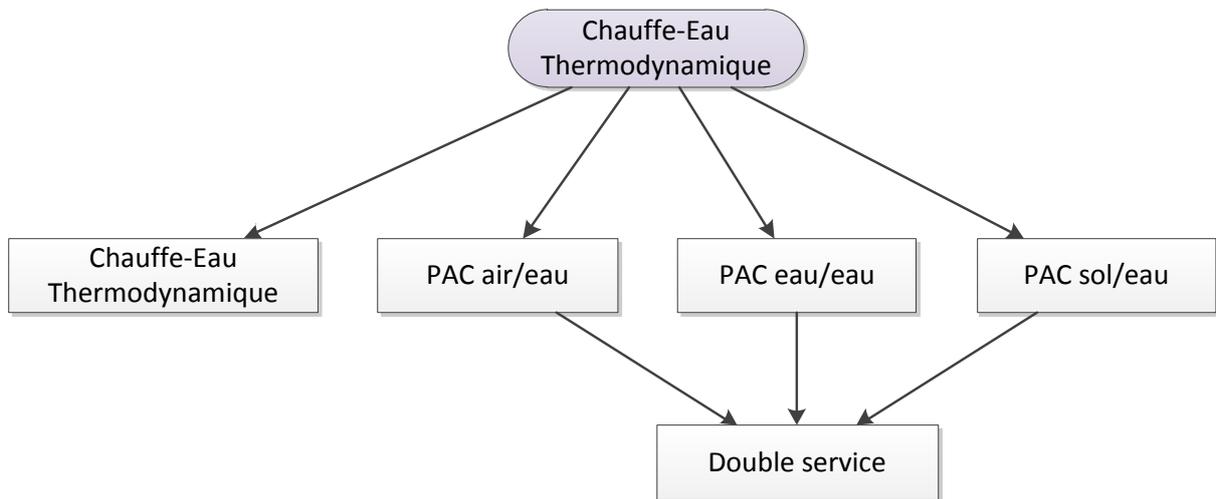


Figure 77 – Arborescence des 4 PT de la FP « Chauffe-eau thermodynamique »

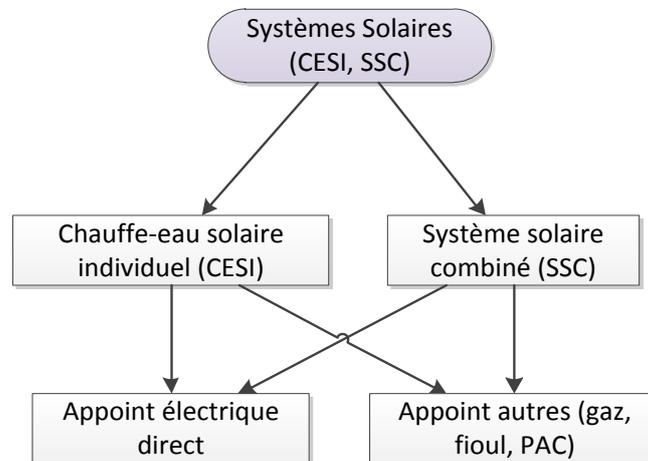


Figure 78 – Arborescence des 4 PT de la FP « Systèmes Solaires (CESI, SSC) »

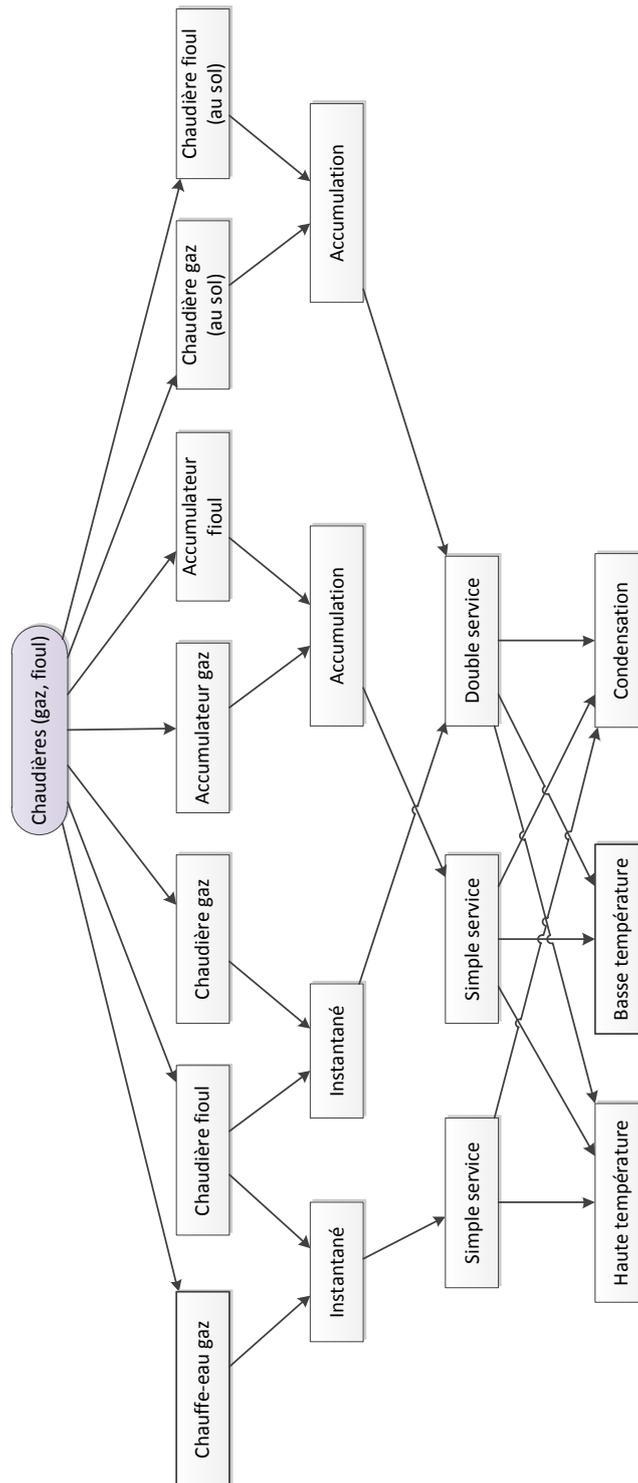


Figure 79 – Arborescence des 22 PT de la FP « Chaudières (Gaz, fioul)»

D. Méthode de pondération AHP

Le processus d'analyse hiérarchique ou AHP (Analytic Hierarchy Process) est une méthode d'évaluation multicritère développée par T. Saaty [124]. Elle repose sur le principe de comparaison d'importance relative par paire de critères mis en concurrence. Nous l'utilisons ici pour obtenir les poids relatifs des enjeux de réhabilitation sélectionnés dans chaque projet de rénovation étudié (voir le sous-modèle M4 de la méthode présenté en page 148).

III.2.1.1 Principe de la comparaison par paires

La comparaison par paires consiste à réaliser des comparaisons de critères deux à deux. L'importance relative de chaque couple de critères est émise par les jugements comparatifs de l'expert, ce qui permet d'attribuer des poids relatifs aux critères. Saaty propose l'échelle de jugement comparatif entre critères suivantes :

Tableau 48 – Échelle numérique pour un jugement comparatif de critères

Valeur	Signification / Interprétation	Valeur	Signification / Interprétation
1	De même importance	1	De même importance
2	Un peu plus important	1/2	Un peu moins important
3	Plus important	1/3	Moins important
4	Vraiment plus important	1/4	Vraiment moins important
5	Considérablement plus important	1/5	Considérablement moins important

Les critères que l'on va comparer sont les familles d'objectifs (colonne de gauche du Tableau 25) et des familles de contraintes externes (colonne de gauche du Tableau 26) associées à un projet de réhabilitation. Ce choix d'effectuer la comparaison d'importance des objectifs à ce niveau supérieur d'abstraction (une famille rassemblant plusieurs enjeux) vient du fait que la méthode AHP devient fastidieuse à dérouler lorsque le nombre de critères à comparer croît.

Afin de faciliter la compréhension, nous allons prendre un exemple applicatif comme fil conducteur pour expliquer les étapes de la méthode AHP. Dans cet exemple, le décideur sélectionne les enjeux suivants :

- Volets extérieurs cassés (famille : Remplacement d'un équipement défectueux)
- Sensation de paroi froide (famille : Amélioration du confort)
- Surchauffes estivales (famille : Amélioration du confort)
- Réduction des coûts annuels liés aux consommations énergétiques (famille : Réduction des coûts d'exploitation)
- Modification de l'aspect esthétique extérieur (famille : Modernisation du bâti)
- Enveloppe budgétaire raisonnable (famille : maîtrise du budget)

Une fois les enjeux sélectionnés, une matrice carrée à double entrée (Tableau 49) est alors générée. Le décideur doit remplir la partie triangulaire supérieure droite par jugement comparatif sur le niveau d'importance relative des couples de familles d'objectifs⁸³.

⁸³ La partie grisée du Tableau 49 est complétée automatiquement car elle représente la symétrie inverse de la partie triangulaire supérieure droite.

Dans ce même exemple :

- **Amélioration du confort** est « *Considérablement plus important (=5)* » que **Modernisation du bâti**
- **Remplacement d'un équipement défectueux** est « *moins important (=1/3)* » que **Amélioration du confort**
- ...

Tableau 49 – Matrice de comparaison des critères par paires



	Remplacement d'un équipement défectueux	Amélioration du confort	Réduction des charges d'exploitation	Modernisation du bâti	Maîtrise du budget
Remplacement d'un équipement défectueux	1	1/3	2	3	1/3
Amélioration du confort	3	1	3	5	1/2
Réduction des charges d'exploitation	1/2	1/3	1	3	1/3
Modernisation du bâti	1/3	1/5	1/3	1	1/5
Maîtrise du budget	3	2	3	5	1

III.2.1.2 Calcul des poids relatifs

Le calcul des poids relatifs des critères se fait en 3 étapes.

- Étape 1 : calcul du total de chaque colonne

Tableau 50 – AHP, étape 1

	Remplacement d'un équipement défectueux	Amélioration du confort	Réduction des charges d'exploitation	Modernisation du bâti	Maîtrise du budget
Remplacement d'un équipement défectueux	1	1/3	2	3	1/3
Amélioration du confort	3	1	3	5	1/2
Réduction des charges d'exploitation	1/2	1/3	1	3	1/3
Modernisation du bâti	1/3	1/5	1/3	1	1/5
Maîtrise du budget	3	2	3	5	1
Σ Colonnes	7,83	3,87	9,33	17,00	2,37

- Étape 2 : calcul des valeurs relatives de la matrice initiale (en divisant son contenu par la somme de chaque colonne calculée à l'étape 1), puis somme des lignes.

Tableau 51 – AHP, étape 2

	Remplacement d'un équipement défectueux	Amélioration du confort	Réduction des charges d'exploitation	Modernisation du bâti	Maîtrise du budget	Σ lignes
Remplacement d'un équipement défectueux	0,13 = 1/ 7,83	0,09 = (1/3)/ 3,87	0,21	0,18	0,14	0,75
Amélioration du confort	0,38 = 3/ 7,83	0,26 = 1/ 3,87	0,32	0,29	0,21	1,47
Réduction des charges d'exploitation	0,06 = (1/2)/ 7,83	0,09 = (1/3)/ 3,87	0,11	0,18	0,14	0,57
Modernisation du bâti	0,04 = (1/3)/ 7,83	0,05 = (1/5)/ 3,87	0,04	0,06	0,08	0,27
Maîtrise du budget	0,38 = (3)/ 7,83	0,52 = (2)/ 3,87	0,32	0,29	0,42	1,94

- **Étape 3 :** Calcul des poids relatifs des critères (en divisant les totaux des lignes calculés dans l'étape 2 par le nombre de critères à comparer (ici 5))

Tableau 52 – AHP, étape 3

Critères	Poids relatifs
Remplacement d'un équipement défectueux	0,15
Amélioration du confort	0,29
Réduction des charges d'exploitation	0,11
Modernisation du bâti	0,05
Maîtrise du budget	0,39

III.2.1.3 Calcul de l'indice de cohérence (IC)

L'indice de cohérence permet d'évaluer la cohérence du jugement du décideur lorsqu'il remplit la matrice de comparaisons des critères par paires (Tableau 49), en vérifiant que la majorité des relations d'importance entre paires de critères respecte la propriété de transitivité⁸⁴. En général, lorsqu'il s'agit de comparer moins de 9 critères, l'indice de cohérence ne doit pas dépasser le seuil de tolérance fixé à IC=10 %. Un seuil de tolérance supérieur pourrait être toléré pour des comparaisons impliquant plus de 9 critères [146].

L'indice de cohérence est calculé de la manière suivante :

- **Étape 1 :** Multiplication des totaux des colonnes de la matrice de comparaison des critères par paires avec les poids relatifs de chaque critère, puis somme des termes obtenus.

	Remplacement d'un équipement défectueux	Amélioration du confort	Réduction des charges d'exploitation	Modernisation du bâti	Maîtrise du budget
Totaux Colonnes	7,83	3,87	9,33	17,00	2,37
Poids relatifs	0,15	0,29	0,11	0,05	0,39
Totaux Colonnes X Poids relatifs	1,17	1,12	1,03	0,85	0,92
Σ (Totaux Colonne X Poids relatifs)	5,10				

- **Étape 2 :** On retranche au résultat obtenu le nombre de critère comparés, puis on divise le tout par le *nombre de critères moins 1* afin d'obtenir l'indice de cohérence de cette matrice de comparaisons de critères par paires.

$$IC = \frac{5,10 - 5}{5 - 1} = 0.025 \leq 10 \%$$

Dans ce cas d'application, l'indice de cohérence vaut 2.5 %. Cette valeur est inférieure au seuil de 10 % ; par conséquent on juge la matrice de comparaisons des critères par paires

⁸⁴ Exemple de propriété de transitivité appliquée à notre étude : si A est plus important que B, et B est plus important que C, alors A doit être plus importante que C.

cohérente. Dans le cas opposé, il aurait été nécessaire d'améliorer la cohérence en révisant les importances relatives entre paires de critères.

E. Matrice d'influence finale

Cette matrice d'influence agrège les analyses multicritères des experts ayant contribué à la mise en évidence des relations « enjeu-indicateur » avec le protocole présenté en page 153.

ID	IP-1	IP-2	IP-3	IP-4	IP-5	IP-6	IP-7	IP-8	IP-9	IP-10	IP-11	IP-12	IP-13	IP-14	IP-15	IP-16	IP-17	IP-18	IP-19	IP-20	IP-21	IP-22	IP-23	IP-24	IP-25
FO-1	O-1	0	0	0	0.33	0	0	0	0	0.33	0	0	0	0.5	0	0	0	2.33	0	0	0	0	0	0	0
	O-2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	2	0	2.5	2	0	0	0	0
	O-3	0.5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
	O-4	0.5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
	O-5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1.5	0	3	0	0	0	0	0
	O-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	O-8	1.5	0	1	0.5	0	0	0	0	2	3	1	0.5	0	3	1	0	2	0	0	0	0	2.5	1	2
	O-9	3	0	2	1.5	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2.5
	O-10	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5
	O-11	2	0	0	2	0	0	0	0	3	1	1.5	0.5	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0
	O-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
	O-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-14	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0
	O-16	0.5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	O-17	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-18	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-19	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0
	O-20	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	O-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
	O-22	1.5	0.5	0.5	0	2.5	0	0.5	3	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-23	2.5	3	1	1	0.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.5	1.5	0	0	0	0.5	0	0	0
	O-24	1	2.5	3	1.5	1	2.5	2.5	1	1	0	0.5	0	0	2.5	3	0	3	3	3	0	0	1	0	0
	O-25	1	2.5	3	1.5	1	2.5	2.5	1	1	0	0	0	0	1	3	2	3	3	3	0	0	0	0	0
	O-26	1	0	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	1.5	0	2.5	2.5	0	0	0	0	0	0
	O-27	2.5	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	O-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5	2.5	0	0	0	0
	O-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
FC-1	C-31	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FC-2	C-32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	C-33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 80 – Matrice d'influence finale (croisant enjeu et indicateurs de performance)

F. Fonctions d'impacts

a. Facteurs influents pour les 25 indicateurs de performance modélisés

Le chiffre présenté dans chaque case bleue du Tableau 53, correspond au poids relatif du facteur influent (en violet pour les Approches Fonctionnelles, en vert pour les Spécificités Techniques) sur l'indicateur de performance visé.

Tableau 53 – Poids des facteurs influents pour les 25 indicateurs de performance modélisés

Indicateurs de performance		IP-1	IP-2	IP-3	IP-4	IP-5	IP-6	IP-7	IP-8	IP-9	IP-10	IP-11	IP-12	IP-13	IP-14	IP-15	IP-16	IP-17	IP-18	IP-19	IP-20	IP-21	IP-22	IP-23	IP-24	IP-25		
Approches Fonctionnelles																												
AF_1	Isolation paroi opaque verticale	2	5	2							3	1	1			1	3	2	4	1								
AF_2	Isolation plancher bas	2	5	1						3	1					5	3											
AF_3	Isolation toiture	3	3	3						2	3	1				2	1	3										
AF_4	Étanchéité à l'air de l'enveloppe	1	1							1	2	2			1	1	1				1	1						
AF_5	Baies Vitrées	2	3	3						3	3	5				1	2	1	2									
AF_6	Protections Solaires	1	2							1	5					1	1	1	4									
AF_7	Portes	1	1							1						1	1	1	1									
AF_8	Ventilation	1	1	1						2	2	3	2	3	2	3	2	1	1									
AF_9	Chauffage	2	1	3	3					1						2	2	1	1			2	3					
AF_10	Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	1	1	2	2											2	1	1	1									
AF_11	Panneaux Photovoltaïques																											
Spécificités Techniques																												
ST_1	Surventilation nocturne possible																											
ST_2	Présence de cheminée ou d'un poêle à bois	1									3												1					
ST_3	Logement traversant										5																	
ST_4	Ouvertures importantes cote Sud										2																	
ST_5	Présence d'un mur mitoyen																											

Légende couleur :

- Absence de relation d'influence
- Relation d'influence quantifiée
- Relation d'influence non renseignées par manque de contributions expertes

b. Évaluation des performances multicritères intrinsèques des familles de procédés & états des spécificités techniques

Sont présentés ci-après, les tableaux de performances intrinsèques des familles de procédés et des états possibles des spécificités techniques intervenant dans les fonctions d'impacts de chaque indicateur de performance.

Pour chaque tableau, la lecture se fait de la manière suivante :

- la première ligne du tableau correspond au nom de l'indicateur de performance étudié (IP-X) ;
- la deuxième ligne, appelée « Parents », correspond aux facteurs influents sur l'indicateur modélisé (les Approches Fonctionnelles sont dotées d'un fond violet, les Spécificités Techniques sont dotées d'un fond vert pastel) ;
- les lignes ayant pour première colonne une mention « Opt. X » correspondent aux états possibles des facteurs influents (soit des Familles de Procédés, soit des états de Spécificités Techniques). À chacun de ces états correspond une note allant de 1 à 5 (échelles de notation disponibles sur le Tableau 27 en page 153) ;
- la dernière ligne correspond au poids relatif associé à chaque facteur influent intervenant dans la fonction d'impact de l'indicateur étudié (les valeurs des poids sont les mêmes que celles présentées dans le Tableau 53 à la page précédente) ;
- les deux dernières colonnes de chaque tableau listé correspondent respectivement :
 - aux niveaux possibles de l'indicateur de performance étudié ;
 - aux seuils bas et hauts intervenant dans la détermination d'un niveau de performance final pour l'indicateur en fonction du score total pondéré calculé pour chaque combinaisons d'états de facteurs influents avec la méthode d'affectation décrite à partir de la page 138 ;
- le nombre de combinaisons indiqué en bas de tableau correspond à chaque configuration possible d'états de facteurs influents intervenant dans les fonctions d'impacts. À chacune de ces lignes est associé un niveau de performance ainsi qu'une ligne de TPC codifiée dans le réseau bayésien.

Les tableaux correspondant aux évaluations des performances intrinsèques des indicateurs IP-5 à IP-9 (Cible « Environnement ») et IP-22 (Cible « Sécurité ») ne sont pas présentés ci-après car aucun expert sollicité n'a encore eu le temps de les renseigner.

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

L.1 / Performance énergétique										Valeurs seuils de l'indicateur		
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Etanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	ST_2 / Présence de cheminée ou d'un poêle à bois	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Mur non isolé 1	Non isolé 1	Non isolée 1	Non traitée 1	Simple vitrage 1	Absentes (ou cassées) 1	Non isolante 1	Par pièce 2	Chaudières (fioul-gaz-élec) 3	Chauffe-eau électrique 1	Oui, sans trappe de fermeure 1	Très faible 20 - 32
Opt. 2	ITI 3	Sous-face 5	Support de couverture 5	Traitée 5	Survitrage intérieur 3	Intérieures 3	Isolante 5	Générale naturelle ou Hybride 3	Chaudières (bois) 4	Chaudières (gaz, fioul) 3	Oui, avec trappe de fermeure 4	Faible 33 - 45
Opt. 3	ITE 5	Sous chape flottante 4	Sous rampants 5		Double fenêtre 5	Extérieures 5		VMC SF 5	Pompes à Chaleur 4	Chauffes-Eau Thermodynamique 4	Non 3	Moyenne 46 - 58
Opt. 4			Sur combles perdus 5		Double ou triple vitrage 5			VMC DF 5	Solaire (SSC) 4	Solaire (CESI, SSC) 5		Bonne 59 - 70
Opt. 5			Sur toiture-terrasse 5						Décentralisé 2			Excellente 71 - 82
Poids	2	2	3	1	2	1	1	1	2	1	1	Min = 20 Max = 82

518 400 COMBINAISONS

IP-2 / Projet utilisant des énergies renouvelables?			Valeurs seuils de l'indicateur
PARENTS	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	AF_11 / Panneaux Photovoltaïques
Opt. 1	Chaudières (fioul-gaz-élec) 1	Chauffe-eau électrique 2	Avec 2
Opt. 2	Chaudières (bois) 2	Chaudières (gaz, fioul) 1	Sans 1
Opt. 3	Pompes à Chaleur 2	Chauffes-Eau Thermodynamique 2	
Opt. 4	Solaire (SSC) 2	Solaire (CESI, SSC) 2	
Opt. 5	Décentralisé 1		
Poids	1	1	1

40 COMBINAISONS

IP-3 / Coût initial										Valeurs seuils de l'indicateur		
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Etanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	AF_11 / Panneaux Photovoltaïques	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Mur non isolé 5	Non isolé 5	Non isolée 5	Non traitée 5	Simple vitrage 5	Absentes (ou cassées) 5	Non isolante 5	Par pièce 5	Chaudières (fioul-gaz-élec) 5	Chauffe-eau électrique 3	Avec 5	Très onéreux 40 - 58
Opt. 2	ITI 3	Sous-face 3	Support de couverture 3	Traitée 1	Survitrage intérieur 4	Intérieures 4	Isolante 4	Générale naturelle ou Hybride 2	Chaudières (bois) 3	Chaudières (gaz, fioul) 2	Sans 3	Onéreux 59 - 77
Opt. 3	ITE 1	Sous chape flottante 1	Sous rampants 1		Double fenêtre intérieure 2	Extérieures 2		VMC SF 2	Pompes à Chaleur 2	Chauffes-Eau Thermodynamique 2		Moyen 78 - 96
Opt. 4			Sur combles perdus 4		Double ou triple vitrage 3			VMC DF 2	Solaire (SSC) 2	Solaire (CESI, SSC) 1		économique 97 - 115
Opt. 5			Sur toiture-terrasse 2						Décentralisé 5			Très économique 116 - 135
Poids	5	5	3	1	3	2	1	1	3	2	1	Min = 40 Max = 135

345 600 COMBINAISONS

IP-4 / Coût de fonctionnement							Valeurs seuils de l'indicateur			
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Bales Vitrées	AF_5 / Ventilation	AF_6 / Chauffage	AF_7 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	AF_8 / Panneaux Photovoltaïques	ST_5 / Présence d'un mur mitoyen	
Opt. 1	Mur non isolé	2 Non isolé	3 Non isolée	1 Simple vitrage	1 Par pièce	5 Chaudières (fioul-gaz-élec)	3 Chauffe-eau électrique	5 Avec	Oui avec un logement	
Opt. 2	ITI	5 Sous-face	5 Support de couverture	3 Survitrage Intérieur	3 Générale naturelle ou Hybride	2 Chaudières (bois)	3 Chaudières (gaz, fioul)	3 Sans	Autres situations	
Opt. 3	ITE	5 Sous chape flottante	5 Sous rampants perdus	5 Double fenêtre	5 VMC SF	1 Pompes à Chaleur	4 Chauffes-Eau Thermodynamique			
Opt. 4			5 Sur combles perdus	5 Double ou triple vitrage	5 VMC DF	1 Solaire (SSC)	3 Solaire (CESI, SSC)			
Opt. 5			5 Sur toiture-terrasse	5		3 Décentralisé				
Poids	2	1	3	3	1	3	2	3	1	
57 600 COMBINAISONS										
I-10 / Confort Thermique (hiver)										
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Bales Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	ST_2 / Présence de cheminée ou d'un poêle à bois
Opt. 1	Mur non isolé	3 Non isolé	1 Non isolée	1 Non traitée	2 Simple vitrage	1 Absentes (ou cassées)	1 Non isolante	2 Par pièce	3 Chaudières (fioul-gaz-élec)	Oui, sans trappe de fermeture
Opt. 2	ITI	5 Sous-face	5 Support de couverture	5 Traitée	3 Survitrage Intérieur	3 Intérieures	2 Isolante	5 Générale naturelle ou Hybride	2 Chaudières (bois)	Oui, avec trappe de fermeture
Opt. 3	ITE	5 Sous chape flottante	5 Sous rampants perdus	5	5 Double fenêtre Intérieure	5 Extérieures	5	5 VMC SF	4 Pompes à Chaleur	Non
Opt. 4			5 Sur combles perdus	5	5 Double ou triple vitrage	5	5	5 VMC DF	5 Solaire (SSC)	
Opt. 5			5 Sur toiture-terrasse	5					3 Décentralisé	
Poids	3	3	2	1	3	1	1	2	1	3
129 600 COMBINAISONS										
IP-11 / Confort Thermique (estival)										
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Bales Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Ventilation	ST_1 / Surventilation nocturne possible	ST_3 / Logement traversant	ST_4 / Ouvertures importantes côté Sud
Opt. 1	Mur non isolé	3 Non isolé	3 Non isolée	1 Non traitée	1 Simple vitrage	1 Absentes (ou cassées)	1 Par pièce	3 Oui	5 Oui	5 Oui
Opt. 2	ITI	5 Sous-face	5 Support de couverture	5 Traitée	4 Survitrage Intérieur	4 Intérieures	4 Générale naturelle ou Hybride	3 Non	3 Non	5
Opt. 3	ITE	5 Sous chape flottante	5 Sous rampants perdus	5	5 Double fenêtre Intérieure	5 Extérieures	5 VMC SF	3		
Opt. 4			5 Sur combles perdus	5	5 Double ou triple vitrage	5	5 VMC DF			
Opt. 5			5 Sur toiture-terrasse	5						
Poids	1	1	3	2	3	5	2	5	5	2
34 560 COMBINAISONS										

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

IP-12 / Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)						
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'air de	AF_5 / Baies Vitrées	AF_8 / Ventilation	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Mur non isolé	2 Non isolée	1 Non traitée	1 Simple vitrage	1 Par pièce	2 Très faible
Opt. 2	ITI	5 Support de couverture	5 Traitée	5 Survitrage intérieur	1 Générale naturelle ou Hybride	2 Faible
Opt. 3	ITE	5 Sous rampants	4	Double fenêtre intérieure	5 VMCSF	3 Moyen
Opt. 4		Sur combles perdus	5	Double ou triple vitrage	4 VMCSF	5 Bon
Opt. 5		Sur toiture-terrasse	4			Excellent
Poids	1	1	2	5	3	Min = 16 Max = 60

480 COMBINAISONS

IP-13 / Confort Acoustique (bruits intérieurs)						
PARENTS	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	Valeurs seuils de l'indicateur		
Opt. 1	Par pièce	4 Chaudières (fioul gaz-élec)	4 Chauffe-eau électrique	5	19 - 20	Très faible
Opt. 2	Générale naturelle ou Hybride	4 Chaudières (bois)	4 Chaudières (gaz, fioul)	3	21 - 22	Faible
Opt. 3	VMCSF	3 Pompes à Chaleur	4 Chauffe-Eau Thermodynamique	4	23 - 25	Moyen
Opt. 4	VMCSF	2 Solaire (SSC)	4 Solaire (GESI, SSC)	4	26 - 27	Bon
Opt. 5		Décentralisé	5		28 - 28	Excellent
Poids	2	3	1		Min = 19 Max = 28	

80 COMBINAISONS

IP-14 / Confort Olfactif						
PARENTS	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_8 / Ventilation	Valeurs seuils de l'indicateur			
Opt. 1	Non traitée	2 Par pièce	1	Faible	5 - 6	
Opt. 2	Traitée	3 Générale naturelle ou Hybride	3	Moyen	7 - 11	
Opt. 3		VMCSF	3	Bon	12 - 12	
Opt. 4		VMCSF	3		-	
Poids	1	3		Min = 5 Max = 12		

8 COMBINAISONS

IP-15 / Modification de l'accès à la lumière naturelle						
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	Valeurs seuils de l'indicateur		
Opt. 1	Mur non isolé	3 Simple vitrage	3 Absentes (ou cassées)	3	Légèrement diminué	5 - 5
Opt. 2	ITI	2 Survitrage intérieur	2 Intérieures	2	Très légèrement diminué	6 - 8
Opt. 3	ITE	2 Double fenêtre intérieure	1 Extérieures	2	Non modifié	9 - 9
Opt. 4		Double ou triple vitrage	1			-
Poids	1	1	1		Min = 5 Max = 9	

36 COMBINAISONS

IP-16 / Temps de mise en œuvre

PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	AF_11 / Panneaux Photovoltaïques	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt.1	Mur non isolé 5	Non isolé	Non isolée 5	Non traitée 5	Simple vitrage 5	Absentes (ou cassées) 5	Non isolante 5	Par pièce 5	Chaudières (fouil) gaz-élec 3	Chauffe-eau électrique 3	Avec 4	Très long 42 - 54
Opt.2	ITI 3	Sous-face 4	Support de couverture 4	Traitée 4	Survitrage intérieur 4	Intérieures 4	Isolante 4	Générale naturelle ou Hybride 4	Chaudières (bois) 2	Chaudières (gaz, fouil) 2	Sans 3	Long 55 - 67
Opt.3	ITE 2	Sous chape flottante 1	Sous rampants 3		Double fenêtre intérieure 3	Extérieures 3		VMC SF	Pompes à Chaleur 2	Chauffe-Eau Thermodynamique 2		Moyen 68 - 80
Opt.4			Sur combles perdus 4		Double ou triple vitrage 3			VMC DF	Solaire (SSC) 1	Solaire (CESI, SSC) 1		Rapide 81 - 93
Opt.5			Sur toiture-terrasse 3						Décentralisé 5			Très rapide 94 - 108
Poids	3	5	2	1	2	1	1	2	2	2	1	Min = 42 Max = 108

345 600 COMBINAISONS

IP-17 / Intensité des travaux en site occupé

PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_3 / Isolation toiture	AF_4 / Étanchéité à l'air de	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt.1	Mur non isolé 5	Non isolé 5	Non isolée 5	Non traitée 5	Simple vitrage 5	Absentes (ou cassées) 5	Non isolante 5	Par pièce 5	Chaudières (fouil-gaz-élec) 3	Chauffe-eau électrique 3	Très forte 28 - 35
Opt.2	ITI 1	Sous-face 5	Support de couverture 5	Traitée 3	Survitrage intérieur 3	Intérieures 4	Isolante 3	Générale naturelle ou Hybride 3	Chaudières (bois) 4	Chaudières (gaz, fouil) 4	Fort 36 - 43
Opt.3	ITE 5	Sous chape flottante 1	Sous rampants 2		Double fenêtre intérieure 2	Extérieures 5		VMC SF	Pompes à Chaleur 2	Chauffe-Eau Thermodynamique 3	Moyenne 44 - 51
Opt.4			Sur combles perdus 4		Double ou triple vitrage 1			VMC DF	Solaire (SSC) 4	Solaire (CESI, SSC) 3	Faible 52 - 59
Opt.5			Sur toiture-terrasse 5						Décentralisé 4		Très faible 60 - 68
Poids	2	3	1	1	1	1	1	1	2	1	Min = 28 Max = 68

172 800 COMBINAISONS

IP-18 / Modification de l'aspect visuel extérieur

PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_3 / Isolation toiture	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	AF_11 / Panneaux Photovoltaïques	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt.1	Mur non isolé 1	Non isolée 1	Simple vitrage 1	Absentes (ou cassées) 1	Non isolante 1	Par pièce 2	Chaudières (fouil-gaz-élec) 2	Chauffe-eau électrique 2	Avec 4	Aucune 21 - 23
Opt.2	ITI 1	Support de couverture 4	Survitrage intérieur 4	Intérieures 1	Isolante 1	Générale naturelle ou Hybride 1	Chaudières (bois) 2	Chaudières (gaz, fouil) 2	Sans 2	Très légère 24 - 35
Opt.3	ITE 4	Sous rampants 1	Double fenêtre 1	Extérieures 4		VMC SF	Pompes à Chaleur 3	Chauffe-Eau Thermodynamique 3		Légère 36 - 50
Opt.4		Sur combles perdus 1	Double ou triple vitrage 3			VMC DF	Solaire (SSC) 4	Solaire (CESI, SSC) 4		Importante 51 - 78
Opt.5		Sur toiture-terrasse 1				Décentralisé 1				-
Poids	4	3	2	4	1	1	1	1	4	Min = 21 Max = 78

57 600 COMBINAISONS

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

IP-19 / Modification de la surface habitable		Valeurs seuils de l'indicateur
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque verticale	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Mur non isolé	2 Réduite 1 - 1
Opt. 2	ITI	1 Non modifiée 2 - 2
Opt. 3	ITE	2 Agrandie 3 - 3
Poids	1	Min = 1 Max = 2

3 COMBINAISONS

IP-20 / Taux de renouvellement d'air			Valeurs seuils de l'indicateur
PARENTS	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_8 / Ventilation	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Non traitée	1 Par pièce	1 Très faible 3 - 4
Opt. 2	Traitée	5 Générale naturelle ou Hybride	4 Faible 5 - 7
Opt. 3		VMC SF	4 Moyen 8 - 9
Opt. 4		VMC DF	5 Bon 10 - 13
Opt. 5			Excellent 14 - 15
Poids	1	2	Min = 3 Max = 15

8 COMBINAISONS

IP-21 / QAI (Particules, COx, NOx, COV)					Valeurs seuils de l'indicateur
PARENTS	AF_4 / Étanchéité à l'air de l'enveloppe	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	ST_2 / Présence de cheminée ou d'un poêle à bois	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Non traitée	2 Par pièce	2 Chaudières (fioul-gaz-élec)	4 Oui, sans trappe de fermeture	1 Très faible 17 - 20
Opt. 2	Traitée	4 Générale naturelle ou Hybride	3 Chaudières (bois)	4 Oui, avec trappe de fermeture	2 Faible 21 - 21
Opt. 3		VMC SF	4 Pompes à Chaleur	5 Non	5 Moyenne 22 - 25
Opt. 4		VMC DF	5 Solaire (SSC)		Bonne 26 - 29
Opt. 5			Décentralisé		Excellent 30 - 34
Poids	1	3	2	1	Min = 17 Max = 34

120 COMBINAISONS

IP-23 / Accessibilité				Valeurs seuils de l'indicateur	
PARENTS	AF_1 / Isolation paroi opaque	AF_2 / Isolation plancher bas	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	Valeurs seuils de l'indicateur
Opt. 1	Mur non isolé	2 Non isolé	2 Simple vitrage	Absentes (ou cassées)	1 réduite 4 - 4
Opt. 2	ITI	1 Sous-face	2 Survitrage intérieur	2 Intérieures	2 Non modifiée 5 - 8
Opt. 3	ITE	2 Sous chape flottante	1 Double fenêtre intérieure	1 Extérieures	3 Améliorée 9 - 9
Opt. 4			2 Double ou triple vitrage		
Poids	1	1	1	1	Min = 4 Max = 9

108 COMBINAISONS

IP-24 / Protection contre l'intrusion				Valeurs seuils de l'indicateur	
PARENTS	AF_5 / Baies Vitrées	AF_6 / Protections Solaires	AF_7 / Portes	Valeurs seuils de l'indicateur	
Opt. 1	Simple vitrage	1 Absentes (ou cassées)	1 Non isolante	1 Non modifiée 3 - 3	
Opt. 2	Survitrage intérieur	1 Intérieures	1 Isolante	2 Améliorée 4 - 6	
Opt. 3	Double fenêtre intérieure	2 Extérieures			
Opt. 4	Double ou triple vitrage				
Poids	1	1	1	Min = 3 Max = 6	

24 COMBINAISONS

IP-25 / Facilité d'utilisation (et d'entretien)					Valeurs seuils de l'indicateur	
PARENTS	AF_8 / Ventilation	AF_9 / Chauffage	AF_10 / Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)	Valeurs seuils de l'indicateur		
Opt. 1	3 Par pièce	5 Chaudières (fioul/gaz-élec)	3 Chaudières (fioul/gaz-élec)	5 Chauffe-eau électrique	5 Très faible 8 - 9	
Opt. 2	5 Générateur naturelle ou Hybride	3 Chaudières (bois)	2 Chaudières (gaz, fioul)	4 Chauffe-Eau Thermodynamique	4 Faible 10 - 11	
Opt. 3	3 VMC SF	2 Pompes à chaleur	3 Chauffe-Eau Thermodynamique	3 Solaire (CESI, SSC)	3 Moyenne 12 - 13	
Opt. 4		1 VMC DF	2 Solaire (SSC)	2 Solaire (CESI, SSC)	2 Bonne 14 - 15	
Opt. 5			5 Décentralisé	5	5 Excellente 16 - 20	
Poids	1	1	1	1	Min = 8 Max = 20	

240 COMBINAISONS

c. Probabilisation des fonctions d'impacts

Nous utilisons les réseaux bayésiens pour transformer les fonctions d'impacts (appelées aussi fonctions d'utilité), élaborées pour chaque indicateur de performance par la méthode décrite dans le sous-modèle M3 présenté en page 138, en ...

- outil d'optimisation multicritère ;
- outil d'évaluation multicritère en milieu déterministe ou incertain.

Les fonctions d'impacts générées pour chaque indicateur de performance sont en réalité déjà des Tables de Probabilité Conditionnelles (TPC) interprétables par n'importe quel outil embarquant un algorithme d'inférence bayésienne. En effet, à chaque combinaison d'états des facteurs influents intervenant dans une fonction d'impact, correspond un niveau de performance attribué à l'échelle du bâtiment.

Nous allons voir par la suite, des exemples d'utilisation d'une fonction d'impact transformée en réseau bayésien équivalent. Les actions présentées ci-après sont exactement les utilisations faites par notre méthode d'aide à la décision pour l'évaluation multicritère des indicateurs de performance et la recherche des assemblages de familles de procédés les plus pertinents. La fonction d'impact prise est celle de l'indicateur IP-11 / Confort thermique (estival).

La performance de cet indicateur est conditionnée par les états pris par 7 nœuds « Approches Fonctionnelles » (AF) et 3 nœuds « Spécificités Techniques » (ST). Chacun de ces nœuds est représenté dans la Figure 81 qui est le réseau bayésien compilé⁸⁵ équivalent à la fonction d'impact de l'indicateur IP-11. Le nœud central correspond à l'indicateur de performance ; sa TPC correspond exactement à sa fonction d'impact. Par défaut, les TPM

⁸⁵ Avec l'outil NETICA de la société NORSYS.

des nœuds-parents (i.e. les nœuds de types AF et ST) sont des distributions de probabilité suivant une loi uniforme.

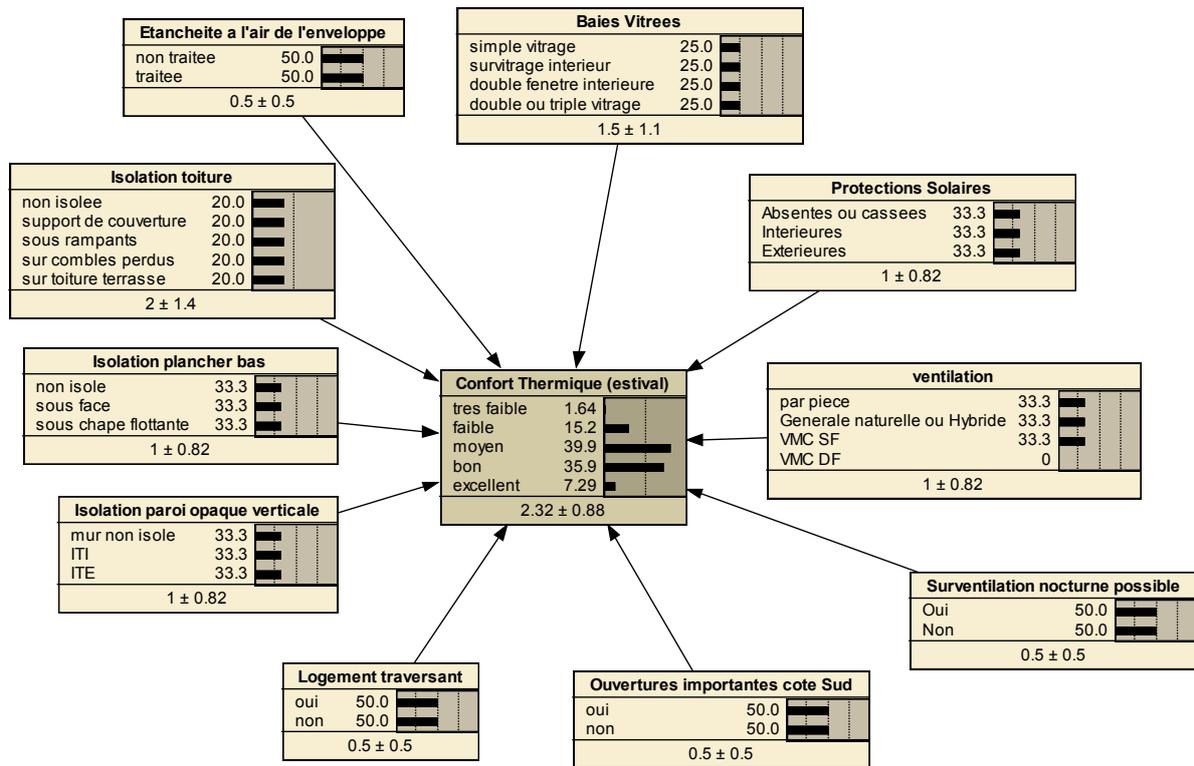


Figure 81 – Réseau bayésien compilé équivalent à la fonction d'impact de l'indicateur IP-11

▪ **Utilisation N°1 : Évaluation multicritère**

À partir du réseau bayésien compilé de la Figure 81, nous pouvons évaluer directement le niveau de performance pour n'importe quelle combinaison d'états des nœuds parents. Si lors de la phase « diagnostic de l'existant », il n'y a pas d'inconnus, l'utilisateur est capable de renseigner au moins un état par nœud parent. Il obtient alors, comme dans la Figure 82, un niveau de performance avec une probabilité de 100 % sur le nœud central représentant l'indicateur de performance IP-11. Dans le cas où l'utilisateur ne connaît pas certaines ST, l'inférence probabiliste permet de déterminer une distribution de probabilité correspondant à ce niveau de connaissance sur les nœuds parents (en utilisant des TMP pour caractériser les nœuds parents non connus). Ce cas de figure, présenté dans la Figure 83, illustre une situation d'inconnue partielle dans la méthode d'évaluation des performances.

Grâce aux réseaux bayésiens, il est possible d'évaluer un indicateur, même si certains nœuds parents ne sont pas connus précisément. Nous utilisons ce type d'utilisation des réseaux pour évaluer la performance d'un bâtiment avant sa rénovation ainsi que les alternatives de rénovation générées.

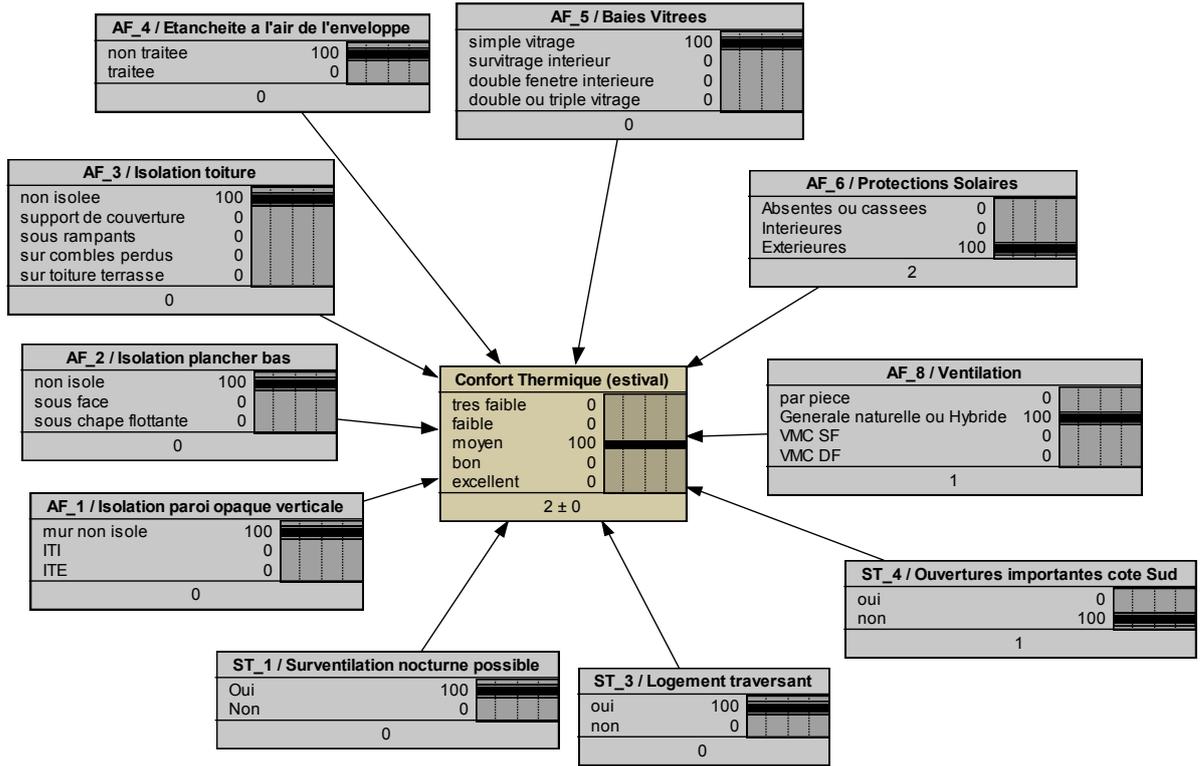


Figure 82 – Évaluation de l'indicateur OP-11 en l'absence d'inconnue

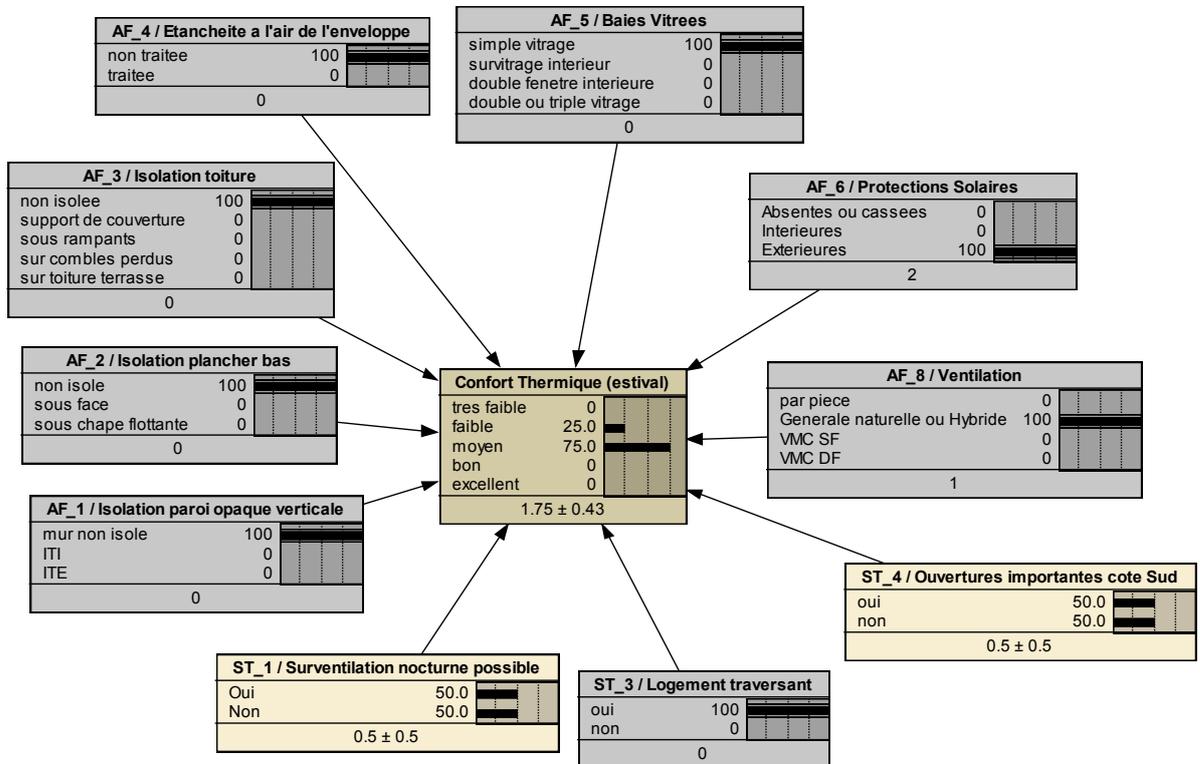


Figure 83 – Évaluation de l'indicateur OP-11 en situation d'inconnues partielles

▪ **Utilisation N°2 : Optimisation sous contraintes**

À partir du même réseau bayésien (Figure 81), nous pouvons rechercher quel est l'assemblage de Familles de Procédés (FP) (représentées par les états sur les nœuds de types AF), sachant ou non les états des nœuds ST, permettant d'obtenir un niveau-cible pour un nœud modélisant un indicateur de performance. C'est ce que nous réalisons dans la Figure 84. Ici, le niveau-cible imposé correspond à l'état « Excellent » et les états des 3 nœuds ST sont connus. Après inférence, les FP de chaque nœud AF présentant la probabilité la plus haute, correspondent aux choix les plus judicieux pour atteindre cette performance.

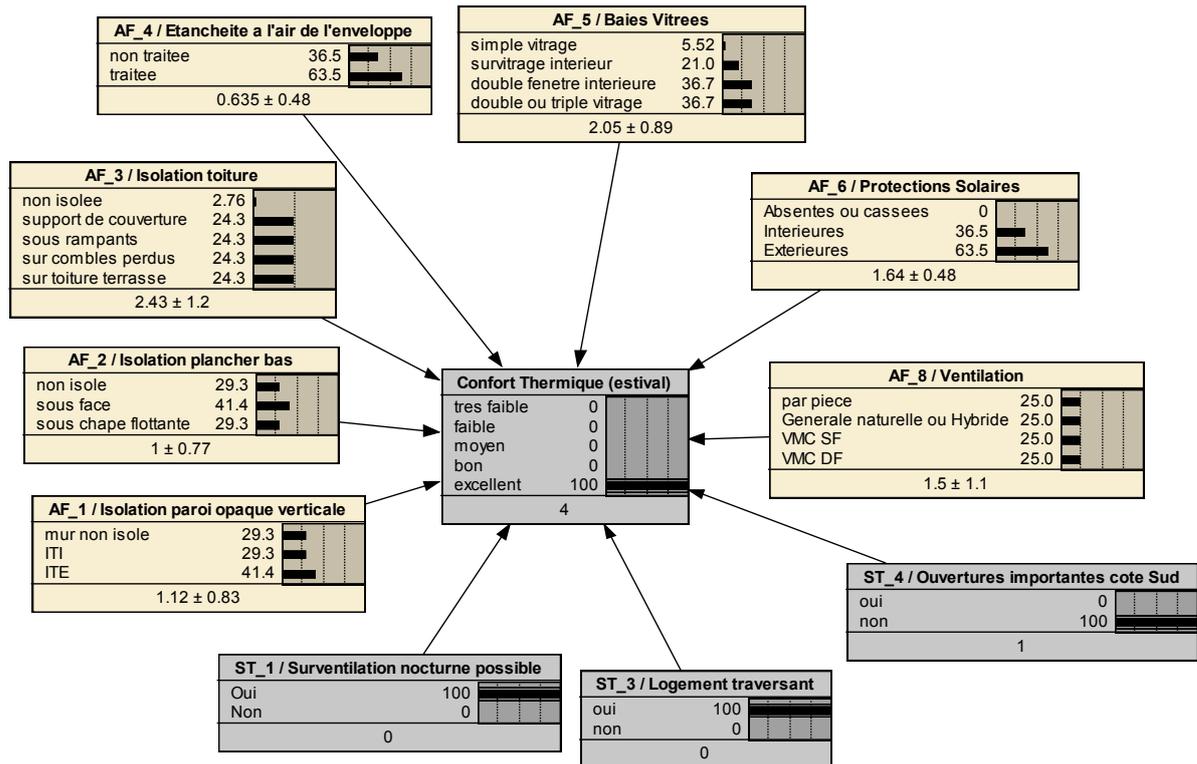


Figure 84 – Recherche des assemblages de FP permettant d'atteindre le niveau "Excellent"

Dans ce second type d'utilisation, nous utilisons les réseaux bayésiens comme support à un algorithme d'optimisation multicritère avec contraintes, pour rechercher les assemblages de FP permettant de respecter les règles expertes déclenchées (contraintes techniques, opportunités de couplage,...) tout en satisfaisant au mieux les niveaux-cibles de performance définis dans le PGP_{corrigé} élaboré.

G. Base de règles expertes

Sont répertoriées ci-après les règles expertes de types « Contraintes Techniques », « Contraintes Réglementaires ou Urbanistiques » et « Opportunités de couplages »⁸⁶ mises en œuvre dans le prototype informatique utilisé pour appliquer la méthodologie d'aide à la décision dans la quatrième partie de ce mémoire. Pour les Caractéristiques Techniques (CT), représentant la majorité des entrées de ces types de règles, des Tables de Probabilités Marginales (TPM) sont proposées pour pallier l'absence complète de connaissances sur ces entrées lors d'un diagnostic d'une maison individuelle. Les distributions de probabilités de ces TPM correspondent à des lois statistiques, a priori représentatives du parc français de maisons individuelles de la période 1945-1974.

a. Contraintes Techniques

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_1 : Présence de balcons (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	50%	Autorisé	Autorisée	Écartée
Non	50%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_2 : Présence de modénatures extérieures (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	20%	Autorisé	Autorisée	Écartée
Non	80%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_3 : Taux d'ouverture des façades (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
> 40%	30%	Autorisé	Autorisée	Écartée
≤ 40%	70%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_4 : Travaux en site occupé (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Tolérables	50%	Autorisé	Autorisée	Autorisée
non souhaités	50%	Autorisé	Écartée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_2 : isolation des planchers bas		
CT_5 : Type d'infrastructure (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	non isolée	sous-face	sous chappe flottante
Terre-plein	33%	Autorisé	Écarté	Autorisée
Vide sanitaire	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée
Garage, Sous-sol, Cave	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

⁸⁶ Notions définies en page 115.

Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_2 : isolation des planchers bas		
CT_4 : Travaux en site occupé (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	non isolée	sous-face	sous chappe flottante
Tolérables	50%	Autorisé	Autorisée	Autorisée
non souhaités	50%	Autorisé	Autorisée	Écarté

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_3 : isolation toiture				
CT_6 : Type de toiture (typologie) (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	non isolée	Support de couverture	Sous rampants	Sur combles perdus	Sur toiture-terrasse
Combles perdus	55%	Autorisé	Autorisée	Écarté	Autorisée	Écarté
Combles aménagés	40%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté	Écarté
Toiture-terrasse	5%	Autorisé	Écarté	Écarté	Écarté	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_3 : isolation toiture				
CT_4 : Travaux en site occupé (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	non isolée	Support de couverture	Sous rampants	Sur combles perdus	Sur toiture-terrasse
Tolérables	50%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée
non souhaités	50%	Autorisé	Autorisée	Écarté	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_4 : Étanchéité à l'air de l'enveloppe			
AF_8 : Ventilation (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États / Familles de procédés		TPM	Non traitée	Traitée	
Ventilation par pièce		25%	Autorisé	Autorisée	
Générale naturelle		25%	Autorisé	Autorisée	
VMC SF		25%	Autorisé	Autorisée	
VMC DF		25%	Écartée	Autorisée	

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_8 : Ventilation			
CT_7 : Présence de conduits de ventilation (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Ventilation par pièce	Générale naturelle	VMC SF	VMC DF
Oui	5%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté
Non	95%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_9 : Chauffage				
CT_8 : Possibilité de mettre en œuvre des capteurs solaires en toiture (PV ou Thermique) ? (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	Chaudières (fioul-gaz-élec)	Chaudières (bois)	Pompes à Chaleur	Solaire (SSC)	Décentralisé
Oui	80%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Non	20%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_9 : Chauffage				
CT_9 : État du raccordement au gaz de ville / possibilité d'accueillir une citerne gaz (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	Chaudières (fioul-gaz-élec)	Chaudières (bois)	Pompes à Chaleur	Solaire (SSC)	Décentralisé
Raccordement au gaz de ville	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Citerne de gaz installable	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Impossible	33%	Écarté	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_9 : Chauffage				
CT_10 : Présence d'un local technique possible pour chaudière ? (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	Chaudières (fioul-gaz-élec)	Chaudières (bois)	Pompes à Chaleur	Solaire (SSC)	Décentralisé
Oui	80%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Non	20%	Autorisé	Écarté	Autorisée	Écarté	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_11 : Panneaux Photovoltaïques	
CT_8 : Possibilité de mettre en œuvre des capteurs solaires en toiture (PV ou Thermique) ? (↓)		États / Familles de procédés (↓)	
États possibles	TPM	Avec	Sans
Oui	5%	Autorisé	Autorisée
Non	95%	Écartée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_10 : Eau Chaude sanitaire (E.C.S.)			
CT_9 : État du raccordement au gaz de ville / possibilité d'accueillir une citerne gaz (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Chauffe-eau électrique	Chaudières (gaz, fioul)	Chauffe-Eau Thermodynamique	Solaire (CESI, SSC)
Raccordement au gaz de ville	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Citerne de gaz installable	33%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Impossible	33%	Autorisé	Écarté	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_10 : Eau Chaude sanitaire (E.C.S.)			
CT_10 : Présence d'un local technique possible pour chaudière ? (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Chauffe-eau électrique	Chaudières (gaz, fioul)	Chauffe-Eau Thermodynamique	Solaire (CESI, SSC)
Oui	80%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Non	20%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_10 : Eau Chaude sanitaire (E.C.S.)			
CT_8 : Possibilité de mettre en œuvre des capteurs solaires en toiture (PV ou Thermique) ? (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Chauffe-eau électrique	Chaudières (gaz, fioul)	Chauffe-Eau Thermodynamique	Solaire (CESI, SSC)
Oui	80%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée
Non	20%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté

b. Contraintes Réglementaires et urbanistiques

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_11 : Proximité d'une zone « Patrimoine classé » (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	5%	Autorisé	Autorisée	Écartée
Non	95%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_3 : isolation toiture				
CT_11 : Proximité d'une zone « Patrimoine classé » (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	non isolée	Support de couverture	Sous rampants	Sur combles perdus	Sur toiture-terrasse
Oui	5%	Autorisé	Écarté	Autorisée	Autorisée	Écartée
Non	95%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_4 : Étanchéité à l'air de l'enveloppe	
CT_12 : Présence de gaz radon (↓)		États / Familles de procédés (↓)	
États possibles	TPM	Non traitée	Traitée
Oui	5%	Écartée	Autorisée
Non	95%	Autorisé	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_8 : Ventilation			
CT_12 : Présence de gaz radon (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Ventilation par pièce	Générale naturelle	VMC SF	VMC DF
Oui	5%	Écartée	Écartée	Autorisée	Autorisée
Non	95%	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_9 : Chauffage				
CT_11 : Proximité d'une zone « Patrimoine classé » (↓)		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	Chaudières (fioul-gaz-élec)	Chaudières (bois)	Pompes à Chaleur	Solaire (SSC)	Décentralisé
Oui	5%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écarté	Autorisée
Non	95%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_10 : Eau Chaude sanitaire (E.C.S.)			
CT_11 : Proximité d'une zone « Patrimoine classé » (↓)		États / Familles de procédés (↓)			
États possibles	TPM	Chauffe-eau électrique	Chaudières (gaz, fioul)	Chauffe-Eau Thermodynamique	Solaire (CESI, SSC)
Oui	5%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Écartée
Non	95%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_11 : Panneaux Photovoltaïques	
CT_11 : Proximité d'une zone « Patrimoine classé » (↓)		États / Familles de procédés (↓)	
États possibles	TPM	Avec	Sans
Oui	5%	Écartée	Autorisée
Non	95%	Autorisé	Autorisée

c. Opportunités de couplage avec des actions de maintenance programmées

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_13 : Ravalement de façade programmé (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	30%	Autorisé	Autorisée	Préconisée
Non	70%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_1 : isolation parois opaques verticales		
CT_14 : Réfection du réseau électrique intérieur programmée (↓)		États / Familles de procédés (↓)		
États possibles	TPM	Paroi non isolée	ITI	ITE
Oui	15%	Autorisé	Préconisée	Autorisée
Non	85%	Autorisé	Autorisée	Autorisée

Approche Fonctionnelle impactée (→)		AF_3 : isolation toiture				
CT_15 : Réfection de la toiture-terrasse programmée		États / Familles de procédés (↓)				
États possibles	TPM	non isolée	Support de couverture	Sous rampants	Sur combles perdus	Sur toiture-terrasse
Oui	10%	Autorisé	Préconisée	Autorisée	Autorisée	Préconisée
Non	90%	Autorisé	Autorisée	Autorisée	Autorisée	Autorisée

H. Mode « Personnalisation des scénarios de rénovation »

La méthodologie développée permet également aux utilisateurs de modéliser et de tester leurs propres scénarios de rénovation. Pour chaque opération traitée, une fois la phase opérationnelle de « diagnostic étendu » réalisée, le professionnel en charge de la rénovation peut modéliser, à l'aide du catalogue de familles de procédés codifié dans le réseau bayésien, ses propres bouquets de solutions.

a. Mode opératoire

L'utilisateur de la méthodologie sélectionne, via une interface similaire à celle proposée dans la Figure 85, les familles de procédés qu'il souhaite tester afin d'élaborer un assemblage de familles de procédés correspondant à son bouquet personnalisé de solutions de rénovation.

Les familles de procédés non sélectionnables (i.e. grisées dans le formulaire) correspondent à celles non compatibles avec le bâti existant. Leur élimination fait suite au déclenchement de certaines règles expertes de type « contraintes techniques » ou « contraintes réglementaire ou urbanistiques » via la sélection de certaines caractéristiques techniques discriminantes pendant la phase de « diagnostic étendu » de la méthodologie. Les familles de procédés encadrées de rouge () correspondent à celles renseignées pour décrire l'existant durant cette même phase.

Légende des cases à cocher

- Famille de procédés sélectionnée
- Famille de procédés sélectionnable
- Famille de procédés non sélectionnable
- Famille de procédés caractérisant la situation avant rénovation

Au fur et à mesure que l'utilisateur sélectionne des familles de procédés pour constituer son bouquet de solutions, l'interface du prototype informatisé de la méthodologie se met à jour et affiche, en temps réel, les performances multicritères de l'assemblage de familles de procédés sélectionnés (c'est-à-dire les résultats d'inférence dans le réseau bayésien, au niveau des nœuds représentant les indicateurs de performance). Arrivé à ce stade, deux cas de figures sont possibles.

1. *La composition de familles de procédés testée n'est pas compatible.* Dans ce cas précis, l'interface renvoie à l'utilisateur un message d'explication sur la nature de l'incompatibilité.
2. *La composition de famille de procédés testée est compatible.* Dans ce second cas, un tableau de comparaisons des performances « avant / après » rénovation est affiché (identique à celui présenté dans le Tableau 54). Sur ce même tableau et pour chaque indicateur, la colonne la plus à droite affiche une série de symboles (↑, → ou ↓) correspondant au sens et à l'intensité de l'évolution de la performance entre la situation initiale et l'assemblage de familles de procédés de rénovation testé.

Légende des symboles d'évolution des performances

- ↑↑↑ Amélioration de la performance de 3 niveaux
- ↑↑ Amélioration de la performance de 2 niveaux
- ↑ Amélioration de la performance d'un niveau
- Performance équivalente
- ↓ Diminution de la performance d'un niveau
- ↓↓ Diminution de la performance de 2 niveaux
- ↓↓↓ Diminution de la performance de 3 niveaux

b. Captures d'écran pour un bouquet personnalisé testé

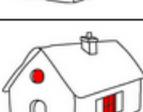
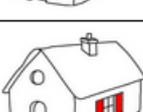
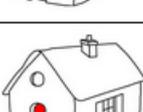
Dans la capture d'écran présentée ci-après dans la Figure 85 et dans le Tableau 54 sont présentés respectivement les interfaces de saisie et de restitution des résultats de la fonctionnalité « Personnalisation des scénarios de rénovation ». L'opération de rénovation prise pour illustrer le contenu de ces interfaces correspond à l'étude de cas développée dans la quatrième partie de ce mémoire.

Les performances du scénario testé dans le Tableau 54, correspondent à la mise en œuvre de 2 solutions de rénovation :

- une isolation thermique par l'intérieur (ITI) des parois opaques verticales ;
- un remplacement des baies vitrées simple vitrage d'origine par des baies double vitrage.

Sélection des actions d'améliorations

- sont surlignées en rouge, les Familles de Procédés décrivant l'existant
- sont grisées, les Familles de Procédés ne pouvant pas être sélectionnées au regards des valeurs prises par les CT et ST à l'issue de la phase "Diagnostic"

Isolation paroi opaque verticale		<input checked="" type="radio"/> 1. Mur non isolé <input type="radio"/> 2. ITI <input type="radio"/> 3. ITE
Isolation plancher bas		<input checked="" type="radio"/> 1. Non isolé <input type="radio"/> 2. Sous-face <input type="radio"/> 3. Sous chape flottante
Isolation toiture		<input type="radio"/> 1. Non isolée <input type="radio"/> 2. Support de couverture <input type="radio"/> 3. Sous rampants <input checked="" type="radio"/> 4. Sur combles perdus <input type="radio"/> 5. Sur toiture-terrasse
Etanchéité à l'air de l'enveloppe		<input checked="" type="radio"/> 1. Non traitée <input type="radio"/> 2. Traitée
Baies Vitrées		<input checked="" type="radio"/> 1. Simple vitrage <input type="radio"/> 2. Survitrage intérieur <input type="radio"/> 3. Double fenêtre intérieure <input checked="" type="radio"/> 4. Double ou triple vitrage
Protections Solaires		<input type="radio"/> 1. Absentes (ou cassées) <input type="radio"/> 2. Intérieures <input checked="" type="radio"/> 3. Extérieures
Portes		<input checked="" type="radio"/> 1. Non isolante <input type="radio"/> 2. Isolante
Ventilation		<input type="radio"/> 1. Par pièce <input checked="" type="radio"/> 2. Générale naturelle ou Hybride <input type="radio"/> 3. VMC SF <input type="radio"/> 4. VMC DF
Chauffage		<input type="radio"/> 1. Chaudières (fioul-gaz-élec) <input type="radio"/> 2. Chaudières (bois) <input type="radio"/> 3. Pompes à Chaleur <input type="radio"/> 4. Solaire (SSC) <input checked="" type="radio"/> 5. Décentralisé
Eau Chaude Sanitaire (E.C.S.)		<input checked="" type="radio"/> 1. Chauffe-eau électrique <input type="radio"/> 2. Chaudières (gaz, fioul) <input type="radio"/> 3. Chauffes-Eau Thermodynamique <input type="radio"/> 4. Solaire (CESI, SSC)
Panneaux Photovoltaïques		<input type="radio"/> 1. Avec <input checked="" type="radio"/> 2. Sans

Réinitialiser

Figure 85 – Interface de saisie des Familles de procédés

Tableau 54 – Partie du Tableau de bord restituant écart de performances entre les situations avant et après rénovation pour le scénario testé

[ID] Indicateurs	Niveaux de performance les plus probables pour chaque indicateur inféré pour ...		Δ Après-Avant
	... la situation avant rénovation	... le scénario testé	
[1] Performance énergétique	Faible	Moyenne	↑
[2] Projet utilisant des énergies renouvelables?	Non	Non	→
[3] Coût initial	Très économique	économique	↓
[4] Coût de fonctionnement	Onéreux	économique	↑ ↑
[5] Énergie grise	Faible	Moyenne	↑
[6] Consommation d'eau (non liée à l'usage)	Indicateurs non évalués par le prototype		
[7] Déchets totaux			
[8] Changement Climatique			
[9] Épuisement des ressources non énergétiques			
[10] Confort Thermique (hiver)	Faible	Moyen	↑
[11] Confort Thermique (estival)	Moyen	Bon	↑
[12] Confort Acoustique (bruits aériens extérieurs)	Très faible	Moyen	↑ ↑
[13] Confort Acoustique (bruits intérieurs)	Excellent	Excellent	→
[14] Confort Olfactif	Moyen	Moyen	→
[15] Modification de l'accès à la lumière naturelle	Non modifiée	Diminué	↓
[16] Temps de mise en œuvre	Très rapide	Rapide	↓
[17] Intensité des travaux en site occupé	Très faible	Faible	↓
[18] Modification de l'aspect visuel extérieur	Aucune	Très légère	↑
[19] Modification de la surface habitable	Non modifiée	Réduite	↓
[20] Taux de renouvellement d'air	Moyen	Moyen	→
[21] QAI (Particules, COx, NOx, COV)	Moyenne	Moyenne	→
[22] Sécurité Incendie	Indicateur non évalué par le prototype		
[23] Accessibilité	Non modifiée	Réduite	↓
[24] Protection contre l'intrusion	Améliorée	Améliorée	→
[25] Facilité d'utilisation (et d'entretien)	Excellente	Excellente	→
[26] Perte du potentiel d'amélioration énergétique	Faible	Faible	→
[27] Risque d'apparition de pathologies liées à l'humidité et aux transferts d'eau liquide	Faible	Moyenne	↓
[28] Risques sanitaires liés à la génération de chaleur par combustion	Faible	Faible	→
[29] Risques d'inconforts acoustiques potentiellement important	Aucun	Aucun	→

Table des Tableaux

Tableau 1 – Principales orientations des objectifs de réhabilitation en milieu résidentiel	18
Tableau 2 – Principales étapes chronologiques d'un projet de construction	21
Tableau 3 – Frise chronologique des typologies de bâtiment d'habitation français	27
Tableau 4 – Données typologiques du parc résidentiel de 1945-1974 de l'outil TABULA	29
Tableau 5 – Données typologiques du parc résidentiel de 1915-1974 de l'étude RAGE.....	30
Tableau 6 – Données typologiques du parc résidentiel de 1915-1974 du programme MDE .	30
Tableau 7 – Bases de données de coûts (limitées à un usage en France métropolitaine)	36
Tableau 8 – Équivalence linguistique des échelles de probabilités de réalisation d'un évènement, tableau repris de [95]	64
Tableau 9 – Synthèse des propriétés des différentes technologies de modélisation de la connaissance à des fins d'aide à la décision	79
Tableau 10 – Différentes problématiques décisionnelles selon Roy	85
Tableau 11 – exemples de paramètres intra et inter-critère sur trois critères	86
Tableau 12 – Tableau des performances (exemple générique).....	88
Tableau 13 – Présentation synthétique des avantages et faiblesses des trois familles de méthodes d'aide à la décision multicritère	90
Tableau 14 – Entrées / Sorties des 4 phases opérationnelles de la méthodologie.....	101
Tableau 15 – Familles de procédés génériques	109
Tableau 16 – Exemple de modélisation d'une règle de type "Contrainte"	117
Tableau 17 – Exemple de modélisation d'une règle de type "Opportunité"	118
Tableau 18 – Combinaison des deux exemples de règles précédentes s'appliquant aux familles de procédés de l'Approche Fonctionnelle "isolation paroi opaque verticale	118
Tableau 19 – Modélisation des situations impactant les indicateurs de la cible « Risques induits et pathologiques »	119
Tableau 20 – Représentation de l'évaluation de la performance énergétique avec trois types d'indicateurs différents.....	122
Tableau 21 – Poids des facteurs influents de l'indicateur IP-12	141
Tableau 22 – Niveaux de performance de l'indicateur IP-12.....	142
Tableau 23 – Table de correspondance « Scores totaux pondérés → Niveaux de performance » pour l'indicateur « Confort acoustique extérieur »	145
Tableau 24 – Exemple de fonction d'utilité de l'indicateur "Confort Acoustique Extérieur" (480 combinaison de familles de procédés possibles).....	146
Tableau 25 – Objectifs de réhabilitation les plus courants	152
Tableau 26 – Contraintes externes les plus courantes	152
Tableau 27 – Indicateurs de performance et leurs échelles de notation	153
Tableau 28 – Extrait de la matrice d'influence générique.....	155
Tableau 29 – Extrait de la matrice d'influence pondérée (cas d'application).....	157
Tableau 30 – Niveaux minimums de performance exigée sur certains indicateurs	160
Tableau 31 – TPC du nœud « Condition Solaire » de la Figure 42.....	165
Tableau 32 – TPC conditionnant la possibilité de mise en œuvre des Familles de Procédés de l'Approche Fonctionnelle "Isolation toiture"	171
Tableau 33 – Valeurs possibles des 6 indicateurs de performance à évaluer par grilles de notation pour la situation avant rénovation	175
Tableau 34 – Indicateurs dont la valeur est imposée lors de l'évaluation des performances de la situation avant rénovation	175
Tableau 35 – Tableau de performance (ELECTRE TRI).....	186
Tableau 36 – Paramètres intracritère de la méthode ELECTRE TRI	190
Tableau 37 – Paramètres sensibles aux incertitudes de la méthode ELECTRE TRI	192
Tableau 38 – Paramètres sensibles aux incertitudes de la méthode ELECTRE III	194
Tableau 39 – Exemple de traitement des occurrences sur les rangs, pour classer 16 alternatives à partir des fréquences sur les rangs obtenues après 72 tirages	195
Tableau 40 – Matrice de comparaison des familles d'enjeux sélectionnés par paire	201
Tableau 41 – PGP et PPR générés automatiquement pour l'étude de cas	202

Tableau 42 – Notation subjective de 6 indicateurs de pour la situation initiale	204
Tableau 43 – Réponses au formulaire de collecte des Spécificités Techniques connues ...	204
Tableau 44 – Liste des familles de procédés retenues pour caractériser l'existant	205
Tableau 45 – Caractéristiques Techniques (CT) renseignées par le professionnel.....	206
Tableau 46 – Plan des 127 simulations pour l'opération de rénovation de La Rochelle	208
Tableau 47 – Classement final d'ELECTRE III (après analyse de sensibilités).....	211
Tableau 48 – Échelle numérique pour un jugement comparatif de critères	250
Tableau 49 – Matrice de comparaison des critères par paires	251
Tableau 50 – AHP, étape 1	252
Tableau 51 – AHP, étape 2	252
Tableau 52 – AHP, étape 3	253
Tableau 53 – Poids des facteurs influents pour les 25 indicateurs modélisés.....	255
Tableau 54 – Partie du Tableau de bord restituant écart de performances entre les situations avant et après rénovation pour le scénario testé	274

Table des Figures

Figure 1 – Place de la réhabilitation dans le cycle de vie d'un bâtiment.....	12
Figure 2 – Parcours vertueux de la rénovation énergétique d'après Perera [12].....	13
Figure 3 – Organisation des acteurs principaux d'un projet de construction.....	15
Figure 4 – Cadre classique d'une opération de rénovation pour des petits privés.....	16
Figure 5 – Motivations principales déclenchant l'acte de rénovation chez les ménages	17
Figure 6 – Répartition des 32 millions de logements par périodes de construction.....	27
Figure 7 – Exemple de processus d'aide à la conception de stratégies de réhabilitation énergétique de l'outil « BAO promodul » (issu des livrables MDE du CSTB)	40
Figure 8 – Exemple de processus d'aide à la conception de stratégies de réhabilitation énergétique de l'outil « Gaz de France DolceVita » (issu des livrables MDE du CSTB)	40
Figure 9 – Schéma illustrant les principes de modélisation "Top-Down" et "Bottom-Up".....	53
Figure 10 – Taxonomie de l'incertitude	56
Figure 11 – Exemple de plan d'expérience OAT pour l'évaluation de l'influence des entrées(X_i) sur les sorties (Y_i) d'un modèle avec la méthode de Morris	60
Figure 12 – Distributions de probabilité uniforme à gauche (a) et normale à droite (b)	62
Figure 13 – Exemple de distributions de possibilité triangulaires et, normale d'après [90]	63
Figure 14 – Correspondance entre appréciations qualitatives et probabilités	64
Figure 15 – Différentes distributions de possibilités [77]	65
Figure 16 – Modèles logique et graphique pour l'aide à la décision	68
Figure 17 – Exemple d'arbre de décision.....	70
Figure 18 – Modélisation d'un système expert d'après [103]	71
Figure 19 – Exemple simplifié de réseau bayésien utilisé pour détecter un risque de pathologie lors de la conception d'une opération de rénovation d'après [104]	73
Figure 20 – Exemple classique de Diagramme d'Influence.....	74
Figure 21 – Processus de décision markovien	76
Figure 22 – Exemple de réseaux de Pétri avant et après franchissement (droite)	77
Figure 23 – Exemple schématique d'un réseau neuronal. En vert les entrées, en jaune la sortie, en bleue les neurones assurant le transfert entre les deux couleurs précédentes.....	78
Figure 24 – Architecture fonctionnelle des 6 sous-modèles techniques et des entrées/sorties de la méthodologie développée	106
Figure 25 – Décomposition fonctionnelle des procédés de réhabilitation	107
Figure 26 – Approches Fonctionnelles	108
Figure 27 – Définition d'un PT comme une combinaison d'attributs techniques	111
Figure 28 – Nombre de Familles de Procédés par Approches Fonctionnelles	112
Figure 29 – Raccordement des règles expertes avec les caractéristiques et spécificités techniques, les familles de procédés et procédés techniques, les indicateurs de performances et de risques potentiels	115

Figure 30 – Approches fonctionnelles ayant une influence sur l'indicateur IP-12	140
Figure 31 – Familles de procédés pouvant remplir la fonction "AF_5 / Baies vitrées"	141
Figure 32 – Ensemble de familles de procédés conditionnant l'évaluation experte de la performance de l'indicateur IP-12	142
Figure 33 – Performances intrinsèques des FP ayant une influence sur IP-12	144
Figure 34 – Surligné en rouge, un exemple de combinaison de familles de procédés (dotée chacune d'un « score pondéré »)	145
Figure 35 – Schéma de principe du processus d'élaboration du PGP et du PPR	150
Figure 36 – PPR (cas d'application)	157
Figure 37 – PGP normalisé (cas d'application)	158
Figure 38 – Équivalences de notation entre PGP_{normi} et les échelles d'évaluation de chaque indicateur en fonction de leur nombre de niveaux de performance	159
Figure 39 – Conversion d'une valeur $PGP_{norm}(i)$ en niveau-cible $PGP_{initial}(i)$	159
Figure 40 – Niveaux-cibles de performance (en bleu) équivalents aux valeurs du PGP normalisé (cas d'application)	160
Figure 41 – PGP _{corrigé} en bleu (cas d'application)	160
Figure 42 – Système de règles techniques et réglementaires conditionnant la possibilité de mettre en œuvre un Chauffe-Eau Solaire Individuel	164
Figure 43 – Structure de notre modèle de réseaux bayésiens	168
Figure 44 – TPM d'un nœud de type CT proposée par direx d'expertes	169
Figure 45 – TPM d'un nœud de type CT modélisée par une loi uniforme	169
Figure 46 – Réseau bayésien équivalent à l'association des TPM des nœuds parents du nœud « isolation toiture » et de la TPC présentée en Tableau 32 du même nœud	172
Figure 47 – Raisonnement en milieu incertain (on ne sait pas si le bâtiment est un Patrimoine Classé)	173
Figure 48 – Synthèse sur les mécanismes d'évaluation des performances avant rénovation des 29 indicateurs	177
Figure 49 – Algorithme d'optimisation par contraintes successives	181
Figure 50 – Identification des Familles de Procédés ayant la probabilité la plus forte sur chaque nœud "Approche Fonctionnelle" après injection incrémentale du PGP _{corrigé}	182
Figure 51 – Transposition des niveaux de performance des indicateurs sur 50 points	189
Figure 52 – Matrice d'affectation du score final ELECTRE TRI	191
Figure 53 – Vu aérienne et photographie de la maison individuelle servant d'étude de cas	199
Figure 54 – Évaluation multicritère sur 50 points de la situation initiale (avant rénovation)	205
Figure 55 – Résultats de l'inférence probabiliste sur les nœuds de type « Approches fonctionnelles »	207
Figure 56 – Visualisations graphiques des performances des 16 alternatives retenues par ELECTRE TRI (en haut), de la meilleure alternative du classement ELECTRE III (en bas)	212
Figure 57 – Étapes de construction d'un réseau bayésien	238
Figure 58 – Cycle orienté (à gauche), Cycle non orienté (à droite)	239
Figure 59 – Arborescence du seul PT de la FP « mur non isolé »	241
Figure 60 – Arborescence des 12 PT de la FP « ITE »	241
Figure 61 – Arborescence des 11 PT de la FP « ITI »	242
Figure 62 – Arborescence du seul PT de la FP « non isolée »	243
Figure 63 – Arborescence des 4 PT de la FP « support de couverture »	243
Figure 64 – Arborescence des 5 PT de la FP « [isolation] sous rampants »	243
Figure 65 – Arborescence des 5 PT de la FP « [isolation] sur combles perdus »	244
Figure 66 – Arborescence des 4 PT de la FP « [isolation] sur toiture-terrasse »	244
Figure 67 – Arborescence des 3 PT de la FP « [ventilation] par pièce »	244
Figure 68 – Arborescence des 5 PT de la FP « [ventilation] générale naturelle »	244
Figure 69 – Arborescence des 10 PT de la FP « VMC SF »	245
Figure 70 – Arborescence des 2 PT de la FP « VMC DF »	245
Figure 71 – Arborescence des 21 PT de la FP « Chaudières (fioul-gaz-électricité) »	246
Figure 72 – Arborescence des 16 PT de la FP « Chaudières bois »	246
Figure 73 – Arborescence des 12 PT de la FP « PAC »	247

Figure 74 – Arborescence des 6 PT de la FP « SSC »	247
Figure 75 – Arborescence des 3 PT de la FP « Décentralisé»	247
Figure 76 – Arborescence du seul PT de la FP « Chauffe-eau électrique »	248
Figure 77 – Arborescence des 4 PT de la FP « Chauffe-eau thermodynamique »	248
Figure 78 – Arborescence des 4 PT de la FP « Systèmes Solaires (CESI, SSC) »	248
Figure 79 – Arborescence des 22 PT de la FP « Chaudières (Gaz, fioul)»	249
Figure 80 – Matrice d'influence finale (croisant enjeux et indicateurs de performance).....	254
Figure 81 – Réseau bayésien compilé équivalent à la fonction d'impact de IP-11	263
Figure 82 – Évaluation de l'indicateur OP-11 en l'absence d'inconnue	264
Figure 83 – Évaluation de l'indicateur OP-11 en situation d'inconnues partielles	264
Figure 84 – Recherche des assemblages de FP permettant d'atteindre le niveau "Bon"	265
Figure 85 – Interface de saisie des Familles de procédés	273