Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie

Nazila Kahina Hannachi Hannachi-Belkadi

▶ **To cite this version:**

Nazila Kahina Hannachi Hannachi-Belkadi. Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie. Autre. Université Paris-Est, 2008. Français. NNT : 2008PEST0241 . tel-00468589

HAL Id: tel-00468589

https://theses.hal.science/tel-00468589

Submitted on 31 Mar 2010

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

présentée devant

L'Université Paris Est

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : GENIE CIVIL

Ecole doctorale Ville et Environnement

par

Nazila Kahina HANNACHI-BELKADI

Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie

---

Directeur de thèse : ***François GUENA***

Co-encadreurs : ***Mireille JANDON***
Youssef DIAB

Soutenue le 08/07/2008 devant la Commission d'Examen composée de :

Y.DIAB	***Professeur, Université de Marne La Vallée, France***	***Examinateur***
F.GUENA	***Professeur, Ecole d'Architecture Paris La Villette, France***	***Directeur***
J-M.HAUGLUSTAIN	***Chargé de cours, Université de Liège, Belgique***	***Rapporteur***
G.HEGRON	***Directeur de recherche, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France***	***Rapporteur***
M.JANDON	***Ingénieur, CSTB, France***	***Examinateur***
H.VAEZI NEJAD	***Docteur. Chef de Projet Télégestion, DALKIA, France***	***Examinateur***
A.VERSELE	***Architecte, Master of technology Université de Louvin, Belgique***	***Examinateur***

Centre scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Atelier de Recherche en Informatique et modélisation (ARIAM)

A mes parents

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement les nombreuses personnes qui m'ont soutenue et appuyée lors de l'élaboration de ce travail :

Monsieur Jean-Christophe Visier, directeur du Département Energie Santé Environnement du CSTB pour m'avoir accueillie dans son département et avoir assuré tous les moyens pour la réussite de ce travail.

Monsieur François Guena, mon directeur de thèse et Madame Mireille Jandon co-directrice de thèse pour leur confiance et leur soutien tout au long de ce travail. L'appui scientifique, le soutien moral et leur disponibilité ont été essentiels pour sa réussite. En plus des qualités scientifiques, ce travail m'a permis d'apprécier leurs qualités humaines.

Monsieur Youssef Diab, Professeur à l'université de Marne la Vallée, pour le suivi de mon travail de doctorat et sa qualité humaine et professionnelle.

Monsieur Louis Laret ancien responsable des thèses à la Direction de la Recherche et du Développement et Monsieur Jean-Robert Millet, responsable de la division Énergie pour leur disponibilité et leurs conseils.

Monsieur, Jean-Marie Hauglustain maître assistant à l'université de Liège (Belgique) et Monsieur Gérard Hégron, Professeur à l'école d'Architecture de Nantes (France) pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Monsieur Hossein Vaezi Nejad, Docteur, chef de projet chez DALKIA (France) et Monsieur Alexis Versele, Architecte, enseignant à l'université de Louvin (Belgique) pour leurs intérêts manifestés à l'égard de mon travail et pour avoir assuré la tâche d'examiner ce mémoire.

Monsieur Carol Buscarlet, Madame Hindoucha El Minoucha pour leur aide précieuse et leur soutien.

Monsieur Patrick Corrales pour son soutien en informatique.

Madame Rofaïda Lahrech, Monsieur Ahmad Husaunndee, Mr Patrick Weinberg ainsi que l'ensemble des personnes qui ont participées à mes enquêtes et confrontations pour l'intérêt porté à mon travail et pour leurs encouragements.

Mesdames Chantal Bodeau et Catérina Joury, pour leur gentillesse, leur disponibilité et la mise en forme du manuscrit.

Fadi, Fazia, Hannan, Hicham, Hind, Nassim, Nicolas, Sabrina, Zoulikha et Cristiana, pour avoir répondu à mes questions et créér une ambiance de travail très agréable.

Tous les membres des équipes AGE et PEB pour m'avoir permis de réaliser ce travail de la manière la plus agréable possible.

Et enfin, mes parents pour leurs conseils leurs soutiens et leurs encouragements, je leur serai toujours reconnaissante pour *«tout».* A Souad et aux Khadraoui ma seconde famille. A mes frères et sœurs. A Neyla et ma petite Tasslim pour leur «énergie positive», et à mon très cher mari pour son aide précieuse et sa grande patience ...

RESUME

Les bâtiments à faible consommation d'énergie connaissent, ces dernières années, un grand intérêt étant donné le rôle important qu'ils jouent dans la diminution des émissions de gaz à effet de serre d'une part, et la flambée des prix des combustibles, d'autre part. Néanmoins, dans de nombreux cas la réalisation de ce type de bâtiments n'atteint pas les performances escomptées. Ce problème est dû en grande partie à : 1) la perte d'informations tout au long du cycle de vie du bâtiment, 2) la non évaluation régulière des décisions prises par les acteurs intervenants. Le commissionnement en tant que processus de contrôle qualité joue un rôle important dans le bon déroulement du processus de réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie. Cette recherche vise à développer une méthodologie dont l'objectif est d'assister les personnes responsables de cette mission dans la définition de plans de commissionnement adaptés à leurs projets.

Nous avons réalisé en premier, un état de l'art de la réalisation des bâtiments à faible consommation d'énergie, que nous avons par la suite confronté à la réalité à travers une enquête auprès des acteurs du bâtiment et d'étude de cas réels. Cette étape nous a permis de formuler une hypothèse concernant la nécessité d'un commissionnement «évolutif» -adapté aux particularités de chaque projet - et de décrire une méthodologie globale d'assistance à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, qui intègre une aide à la décision, une gestion de l'information et un commissionnement «évolutif» qui vient vérifier le bon déroulement des deux premiers.

Pour mettre en application cette méthodologie, une boîte à outils a été développée. Elle est constituée de : 1) un outil dit «statique» qui permet de définir un premier plan de commissionnent générique qui répond aux caractéristiques d'un projet, à partir d'une base de données exhaustives de tâches de commissionnement, 2) un outil dit «dynamique» basé sur les probabilités, qui permet de mettre à jour le plan de commissionnement initial (générique), en l'adaptant au projet en cours. Cette mise à jour permet de prendre en compte les particularités et imprévus rencontrés lors de la réalisation d'un projet, rendant ainsi le plan de commissionnement plus précis. Une expérimentation, dans un cas réel, du premier outil et des applications du second ont été faites pour montrer leurs possibilités et leurs limites.

Les résultats font apparaître deux points importants : 1) l'intérêt d'avoir un plan de commissionnement structuré et évolutif pour vérifier la qualité de la réalisation des bâtiments à faible consommation d'énergie et assurer ainsi l'atteinte des performances souhaitées, 2) l'intérêt d'utiliser un outil probabiliste tel que les réseaux Bayésiens pour anticiper les dérives et prendre en charge les imprévus rencontrés lors de ce processus vivant.

Cette méthodologie représente une base pour le développement d'outils d'assistance à la définition de plans de commissionnement «évolutifs» pour le neuf et l'existant, et tous les secteurs du bâtiment.

Mots clef : Bâtiment à faible consommation d'énergie, processus de conception, processus de commissionnement adapté, outils d'assistance, définition du plan de commissionnement évolutif, réseaux Bayésiens.

ABSTRACT

The low energy buildings know, these latest years, a great interest because of the important role that they play in reducing the greenhouse gas emissions on one hand, and the rise of the combustibles prices, on the other hand. Nevertheless, in many cases, low energy consumption buildings do not achieve the expected performances. This problem is largely due to: 1) the loss of information throughout the building life cycle, 2) the non-regular evaluation of the decisions made by the actors intervening in their conception. The commissioning, as a quality control process, plays an important role in the good progress of the realization process of low energy buildings case. This research aims to develop a methodology to assist the persons responsible of the commissioning in the definition of commissioning plans adapted to their projects.

Firstly, we performed a state of art of the low energy consumption buildings realisation that we then confronted, to the reality through an investigation with building actors and a study of real cases. This step allowed us to formulate a hypothesis concerning the necessity of a "progressive" commissioning -adapted to project particularities - and to describe a global methodology of assistance to the low energy consumption buildings realisation that integrates a decision making aid, an information management and a "progressive" commissioning that verify the good realisation of the two first functions.

To put this methodology into application, a toolbox was developed. It comprises: 1) a tool named "static" that allows defining a first generic commission plan that satisfies the project characteristics, based on an exhaustive data of commissioning tasks, 2) a tool named "dynamic" based on the probabilities, that allows updating the initial (generic) commissioning plan. This update manages the unexpected events met during the project realization; witch permits the commissioning plan to be more precise. An experimentation of the first tool was done in a real case and applications of the second were done to show their possibilities and their limits.

The results show two important points: 1) the interest of having a structured and progressive commissioning plan to verify the quality of low energy consumption buildings realisation and guarantee the achievement of the expected performances, 2) the interest of using a probabilistic tool such as the Bayésien networks to anticipate the drifts and to deal with the unexpected events met throughout the building life cycle.

This methodology represents a basis for the development of assistance tools for the definition of commissioning "progressive" plans for the new and the existing, and all the building sectors.

Key words: Low energy buildings, design process, progressive commissioning process, assistant tools, definition of progressive commissioning plan, Bayesian network.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE 1 : CONTEXTE : BÂTIMENT À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE 5

1. BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE 6

1.1 Rappel historique 6
1.2 Caractéristiques des bâtiments environnementaux (Bioclimatique) 7
1.2.1 Vers des bâtiments environnementaux actifs 8
1.3 Principaux labels et réglementations 9
1.3.1 RT 2005 : Réglementation thermique FRANCAISE 9
1.3.2 Les labels Nationaux : HPE : Haute Performance Energétique 10
1.3.2.1 EFFINERGIE 11
1.3.3 Les labels interNationaux 12
1.3.3.1 PassivHaus (Allemagne) 12
1.3.3.2 MINERGIE® (SUISSE) 13
1.3.3.3 ZERO ENERGY BUILDING (USA) 14
1.3.4 Autres programmes internationaux 15
1.4 Réalisation des bâtiments à faible consommation d'énergie 16
1.4.1 Processus de realisation d'un bâtiment selon la loi MOP 16
1.4.2 Difficultés rencontrEEs lors de la réalisation des BATIments performants 19
1.4.2.1 Circulation de l'information et processus de conception 19
1.4.2.2 Difficultés rencontrées lors de la circulation de l'information et leurs causes 21
1.4.2.3 Analyse et solutions possibles aux pertes d'informations 26
1.4.2.4 Impact de la qualité des choix sur la performance Energétique du bâtiment 28

2. LE PROCESSUS DE COMMISSIONNEMENT 31

2.1 L'origine du commissionnement 31
2.2 Définition du processus de commissionnement 32
2.3 Les types de commissionnement 32
2.4 Le mode d'organisation du commissionnement 33
2.5 Les outils de commissionnement 34
2.5.1 Outils de gestion du Plan de commissionnement 34
2.5.1.1 Les listes de vérification «check lists» 35
2.5.1.2 Les modèles standards ou «Standard Models of Commissioning Plans (SMCxP)» 35
2.5.1.3 La matrices de contrôle de qualité ou «Matrix for Quality Control (MQC) » 36
2.5.2 Outils de réalisation des tâches de commissionnement 38
2.6 Le Commissionnement, Certification et Labels 38
2.6.1 Procédure de contrôle pour le label HPE 38
2.6.2 Commissionnement dans la certification HQE® 40
2.6.3 Le commissionnement dans la certification LEED® 41
2.6.4 Le Commissionnement dans la certification BREEAM 41
2.6.5 Le Commissionnement dans le collaboratif international GBC 42

3. CONCLUSION 43

CHAPITRE 2 : REALITÉ DU TERRAIN ET METHODOLOGIE 45

1. ÉTUDE DE LA RÉALITÉ «IN SITU» DES BÂTIMENTS PERFORMANTS 46

1.1 Identification des difficultÉs et des besoins des acteurs 46

1.1.1 Recensement des acteurs concernés 46
1.1.2 Mise en place d'un questionnaire 47
1.1.3 Résultats de l'enquête 47

1.2 Étude de cas réels 49

1.2.1 Cas 1 : Fontenay Sous Bois 50
1.2.2 Cas 2 : Université de La Réunion 51
1.2.3 Analyse et résultats de l'étude de cas 53
1.2.4 Synthèse et conclusions des deux cas d'étude 56

2. UNE METHODOLOGIE GLOBALE D'ASSISTANCE À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE 57

2.1 Travaux intégrant le commissionnement dans le cycle de vie du bâtiment 58
2.2 Mise en place de la méthodologie globale d'assistance à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie 63

3. DESCRIPTION DU CAHIER DES CHARGES DE L'ASSISTANT AU COMMISSIONNEMENT 65

3.1 Assistance à la définition du plan de commissionnement 65

3.1.1 Jeux d'acteurs 66

3.2 Structure et champ d'application de la boîte à outils 67

3.2.1 Structure de la boite à outils 68
3.2.2 Champs d'application de la boite à outils 71

4. CONCLUSION 73

CHAPITRE 3 : IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA DÉFINITION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL 75

1. DESCRIPTION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA DÉFINITION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL (OUTIL STATIQUE) 76

1.1 Description de la structure du plan de commissionnement initial 76

1.1.1 Niveau de performance energétique 76
1.1.2 Niveau de commissionnement 77
1.1.3 Domaines à commissionner 79
1.1.4 Facteurs complémentAIrEs ayant une incidence sur le plan de commissionnement 82
1.1.5 Echelle de commissionnement 84
1.1.6 Indicateurs et aides mémoire 84

1.2 Implémentation de la base de données de tâches de commissionnement 85

2. IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE DE L'OUTIL STATIQUE 87

2.1 Architecture et application du prototype d'outil statique 87
2.2 Utilisation de l'outil statique 91

3. CONFRONTATION DE L'OUTIL STATIQUE AVEC DES EXPERTS 93

4. CONCLUSION 95

CHAPITRE 4 : IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA MISE À JOUR DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL 97

1. CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DYNAMIQUE 98
1.1 Outils de diagnostic des performances énergétiques existants 98
1.1.1 Méthodes et outils de simulation numérique 98
1.1.2 Méthodes et outils de diagnostic simplifiés 99
1.1.3 Méthodes et outils de diagnostic probabiliste 99
1.2 Les Réseaux Bayesiens, environnement de développement de l'outil dynamique 100
1.2.1 Le thèorème de bayes 101
1.2.2 Facilité de mise en œuvre de solutions 101
1.2.3 Construction d'un modèle sous l'environnement Hugin 103
1.2.4 Appréciation qualitative et probabilités 106
1.3 Les applications de l'outil dynamique dans le bâtiment 107
1.4 Description de la méthodologie de développement de l'outil dynamique 108
2. IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL DYNAMIQUE 110
2.1 Version 1 : Un outil d'évaluation «mono-critére» basé sur une expertise 110
2.2 Version 2 : Un outil d'évaluation «mono-critére» avec apprentissage 116
2.3 Implémentation d'un outil d'évaluation multicritéres 121
2.3.1 Définition des critères d'évaluation 122
2.3.2 Version 3 : Un outil de commissionnement multicritéres 122
2.3.3 Processus de modélisation d'un outil multicritéres flexible 125
2.3.4 Un outil de Cx multicritéres «flexible» 127
2.3.4.1 Description de la structure du premier niveau 130
2.3.4.2 Renseignement des tables de probabilités conditionnelles 137
2.4 Implémentation d'un prototype d'interface pour l'outil dynamique 139
3. CONCLUSION 142

CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATION DE LA BOITE À OUTILS 145

1. EXPERIMENTATION DE L'OUTIL STATIQUE 146
1.1 Description du cadre d'application 146
1.2 Description de la procedure d'expérimentation de l'outil statique dans le cadre du projet d'extention du B 18 147
1.3 Synthèse de l'expérimentation 150
2. LES APPLICATIONS DE L'OUTIL DYNAMIQUE 150
2.1 Application de la version 1 : Evaluation des Maisons Individuelles 150
2.1.1 Description des applications possibles de l'outil 151
2.1.2 Comportement de l'outil en phases amonts 154
2.1.3 Synthèse 158
2.2 Applications de la version 2 : Basée sur l'apprentissage 158
2.2.1 Applications sur un bâtiment tertiaire très performant (Beethoven) 159
2.2.2 Synthèse 162
2.3 Applications de la version 3 : Diagnostic Multicritéres 163
2.3.1 Applications sur un de bâtiment résidentiel trés performant (PassivHaus) 165
2.3.2 Synthèse 166
2.4 Application de la version 4 : Diagnostic Multicritéres, Flexible 167
2.4.1 Application de la version 4 en phase de programmation 167
2.4.2 Synthèse 169
2.5 Synthèse et classification des quatre versions de l'outil dynamique 169
3. COMPLÉMENTARITÉ DE L'OUTIL STATIQUE ET DYNAMIQUE 170
3.1 Application de la boite à outils 173
3.2 Les apports de cette boite à outils dans le cas d'une réhabilitation 174
4. CONCLUSION 176

CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....179

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....183

ANNEXES.....191

ANNEXE1 : Le processus de conception d'après la loi MOP.....192

ANNEXE 2 : Enquête.....193

ANNEXE 3 : Plan de commissionnement «ventilation».....207

ANNEXE 4 : Plan de commissionnement par domaine.....208

ANNEXE 5 : Table de probabilités conditionnelles.....209

ANNEXE 6 : Idiomes.....210

ANNEXE 7 : Présentation des classes de la version quatre de l'outil dynamique.....211

Niveau 1, RBN°3 : Classe apports internes.....211

Niveau 1, RBN°6 : Classe productionenergie.....211

Niveau 2, RBN°8 : Classe systèmes.....211

Niveau 2, RBN°9 : Classe enveloppegobale.....211

Niveau 3, RBN°10 : Classe consoglobale (consommation d'énergie).....212

Niveau 3, RBN°11 : Classe surcoûtgobale.....212

Niveau 3, RBN°12 : Classe Confortglobal.....212

Niveau 3, RBN°13 : Classe compromis.....212

ANNEXE 8 : Présentation du réseau bayésien orienté objet de la version 4 sous format Net.....213

INTRODUCTION GENERALE

La diminution de la consommation énergétique des bâtiments constitue un enjeu majeur de ce début de siècle. La réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite le développement d'outils performants d'assistance à leur conception, leur construction et leur maintenance.

Le réchauffement climatique de la terre, engagé depuis quelques années, a occasionné une action à l'échelle mondiale pour en atténuer les conséquences voire inverser la tendance. A cet effet, le réchauffement climatique fait périodiquement l'objet de réunions internationales : Rio de Janeiro (1992), Berlin (1995), Genève (1996), Kyoto (1997), Buenos Aires (1998), La Haye (2000) et Montréal (suivi du protocole de Kyoto 2005). Ces réunions ont pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique [Greenpeace'2006].

L'urbanisation rapide représente un des facteurs aggravants de ce dérèglement climatique. Jusqu'à 80 % de l'énergie mondiale est consommée dans les villes et a pour conséquence des quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre. L'industrie du bâtiment représente 50% de la consommation totale d'énergie, que ce soit lors de la construction, de la maintenance ou de l'exploitation des bâtiments (chauffage, rafraîchissement, éclairage etc.). La production de dioxyde de carbone (CO_2) due à l'utilisation des carburants fossiles pour cet effet est maintenant reconnue comme cause majeure au réchauffement de l'atmosphère. De ce fait, le recours à des solutions limitant la consommation énergétique du bâtiment, aux énergies renouvelables et à une meilleure utilisation des combustibles fossiles devient impératif.

Le CSTB a mis en place une équipe de recherche qui étudie différentes possibilités pour réduire les consommations d'énergie des bâtiments et limiter leurs émissions de CO2. Un des axes développé vise à définir des procédures d'évaluation rigoureuses pour assurer la performance énergétique d'un bâtiment : le commissionnement. Cette procédure permet de vérifier tout au long du cycle de vie d'un bâtiment et de ses composants (enveloppe, systèmes, etc.) qu'ils sont conçus, réalisés, exploités et maintenus dans des conditions optimales. Le commissionnement commence dès la phase de programmation et continue au cours des phases de conception, de réalisation, de réception, de formation et d'exploitation.

Les travaux de l'Annexe 47 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) se consacrent au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie et au développement d'outils d'évaluation appropriés à ce type de bâtiments. La recherche présentée dans cette thèse s'inscrit dans ces travaux. Elle soulève les problèmes rencontrés au cours du processus de conception qui empêchent un bâtiment d'atteindre les performances établies par le maître d'ouvrage dans le programme. Deux principaux facteurs sont à l'origine de ces problèmes : la non évaluation des choix réalisés au fur et à mesure de l'avancement du projet et la perte d'information liée en grande partie au jeu des acteurs.

Plusieurs travaux ont été réalisés, d'une part pour développer des méthodologies d'aide à la décision qui gèrent les aspects multi acteurs et multicritères rencontrés lors du processus de conception de bâtiments performants énergétiquement et d'autre part pour évaluer la qualité de leur réalisation.

Néanmoins, ces recherches s'appliquent généralement soit à une étape de la réalisation du bâtiment soit à un des systèmes qui composent le bâtiment. Or nous pensons qu'une approche holistique est plus adaptée. Il est plus pertinent de considérer le bâtiment dans sa globalité et tout au long de son cycle de vie car les composants du bâtiment et les différentes étapes de sa réalisation interagissent.

Cette recherche consiste à développer une méthodologie et des outils qui visent à améliorer la qualité du processus de conception en s'appuyant sur les travaux du CSTB sur le commissionnement. Ce processus qualité doit permettre d'évaluer régulièrement les différents choix réalisés par les différents acteurs en considérant le bâtiment comme un système complexe composé de sous-systèmes (enveloppe, chauffage, ventilation, etc.), de gérer les imprévus, de minimiser les pertes d'information et de rappeler les objectifs tout au long du cycle de vie du bâtiment.

L'étude bibliographique du chapitre 1 présente les particularités des bâtiments à faible consommation d'énergie et définit une première hypothèse de travail quant à l'introduction du commissionnement tout au long du processus de conception.

Le deuxième chapitre valide cette première hypothèse à travers :

1. une enquête auprès des différents intervenants du bâtiment. Cette enquête vise à identifier les difficultés qu'ils rencontrent et leurs besoins et attentes en matière d'outils de commissionnement intégrés au processus de conception ;
2. une étude de deux cas réels de projets de bâtiments à faible consommation d'énergie en phase de conception ou de réalisation.

Il présente également une méthodologie de conception des bâtiments à faible consommation d'énergie -proposée par cette recherche- qui intègre le commissionnement, l'aide à la décision et la gestion de l'information ainsi que le cahier des charges des outils qui permettent son application.

Le troisième chapitre se focalise sur la description du premier outil «statique». Cet outil a pour objectif de définir les plans de commissionnement initial à partir d'une base de données structurée. Il a été confronté à différents experts qui ont évalué ses avantages et ses limites, et permis de le faire évoluer.

Le chapitre quatre décrit l'outil «dynamique», développé afin d'adapter le plan de commissionnement initial aux particularités du projet. Il présente l'environnement dans lequel il a été implémenté, les quatre versions par lesquels il se décline, leur structure et leurs champs d'applications.

Le dernier chapitre présente l'expérimentation et l'application de cette boite à outils. Une première partie est consacrée à l'expérimentation de l'outil statique dans un cas réel de bâtiment qui a connu des changements importants au cours de sa conception. Une deuxième partie expose les applications possibles des différentes versions de l'outil dynamique, ainsi que les avantages et limites de chacun. La dernière partie met en évidence la complémentarité de ces deux outils ainsi que leurs apports dans un cas réel.

Enfin, une conclusion synthétise les résultats de cette recherche et esquisse les perspectives possibles pour la poursuite de ce travail.

CHAPITRE 1

CONTEXTE : BÂTIMENT À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

La conception des bâtiments à faible consommation d'énergie est un processus complexe qui nécessite une approche particulière. En effet, les choix techniques et architecturaux retenus pour ce genre de conception influent de manière très importante sur le comportement énergétique du bâtiment. Ainsi, la forme du bâtiment, sa compacité, son orientation, ont des conséquences significatives sur sa performance énergétique. Il en va de même pour le choix des systèmes de chauffage, de ventilation, etc. De mauvais choix peuvent entraîner des défaillances difficilement prévisibles dont l'impact sur la consommation énergétique du bâtiment n'est souvent découvert que lors de son exploitation.

La première partie de ce chapitre présente un état de l'art de la réalisation des bâtiments à haute performance énergétique, ainsi que l'ensemble des problèmes rencontrés lors de leur conception. Elle énumère les labels nationaux et internationaux les plus connus. Ces labels sont utilisés dans le cadre de ce travail comme cibles pour définir des indicateurs de performances à atteindre. La deuxième partie de ce chapitre décrit le processus de commissionnement dont l'objectif est de vérifier, en cours de conception de réalisation et d'exploitation, que le bâtiment disposera des performances énergétiques souhaitées.

1. BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Cette section rappelle tout d'abord l'origine des bâtiments à faible consommation d'énergie, leurs caractéristiques et les principaux labels nationaux et internationaux. Elle présente ensuite, le processus de conception des bâtiments et les difficultés liées à ce type en particulier.

1.1 RAPPEL HISTORIQUE

Ces dernières décennies, à la suite du choc pétrolier des années 70, l'économie d'énergie est devenue une préoccupation majeure. Cet enjeu s'intègre tout d'abord dans une dimension économique puis environnementale planétaire visant à :

- Economiser les ressources énergétiques épuisables.
- Réduire les gaz à effet de serre.

Cette prise de conscience s'est tout d'abord traduite par une approche énergétique solaire en architecture. Elle visait une indépendance totale du bâtiment par rapport aux ressources traditionnelles d'énergie. Cette approche s'est développée jusqu'à devenir une approche bioclimatique, c'est-à-dire impliquant directement la conception architecturale, avec des objectifs de contrôle climatique visant le confort des occupants et les économies d'énergie. L'ensemble du volume de la construction est alors utilisé comme capteur pour optimiser les apports solaires et ne se limite pas à l'ajout de capteurs solaires à une construction «conventionnelle» [AA'192] [AA'209].

Plus récemment, les graves problèmes environnementaux liés au réchauffement climatique, à la pollution de l'air et à la détérioration de la couche d'ozone, ont donné une nouvelle orientation à cette approche. Désormais, on parle d'architecture environnementale pour un développement durable. L'approche environnementale met en avant l'impact que peut avoir un bâtiment sur son environnement et tend à donner des orientations conceptuelles afin d'en limiter les effets néfastes.

Figure 1.1 : Architecture environnementale basée sur l'intégration, Maison herbe-tourbe en Island.http://www.lamaisonpassive.fr/files/le_cours/Passivhaus28.pdf

Figure 1.2 : Architecture environnementale intégrant les nouvelles technologies. Allemagne : Freiburg [Passiv'2006]

Cette architecture environnementale a également connu une évolution au fur et à mesure que les nouvelles technologies liées à la production, à la transformation et à la distribution des énergies se sont développées. Elle est passée d'une architecture qui se base essentiellement sur l'intégration du bâtiment à son environnement pour réduire ses consommations (Cf. Figure 1.1), à une architecture qui intègre fortement les nouvelles technologies et les systèmes performants et innovants issus de l'industrie (Cf. Figure 1.2).

1.2 CARACTÉRISTIQUES DES BÂTIMENTS ENVIRONNEMENTAUX (BIOCLIMATIQUE)

Le bâtiment bioclimatique se base essentiellement sur une démarche qui vise à composer avec le climat. L'enveloppe bâtie dans ce cas ne se limite pas à définir une frontière entre l'intérieur et l'extérieur, mais joue un rôle plus significatif. Elle vise en outre, à [Sidler'2000] [IEA'1989] [Gartia'2002] [Wright'1979] [Liérbard'2005] :

- réduire les besoins énergétiques,
- offrir un confort thermique satisfaisant en toutes saisons, c'est-à-dire :
    - un niveau de température interne acceptable,
    - un contrôle de la surchauffe (faible variation quotidienne de température),
    - une bonne distribution de la chaleur dans les pièces,
    - un contrôle de la condensation (bonne conception des parois en fonction de la sollicitation du climat extérieur).

Pour y parvenir, il est nécessaire de composer avec différents paramètres parmi lesquels

- l'implantation du bâtiment,
- la volumétrie,
- la distribution intérieure,
- le choix des matériaux,
- le choix des couleurs etc.

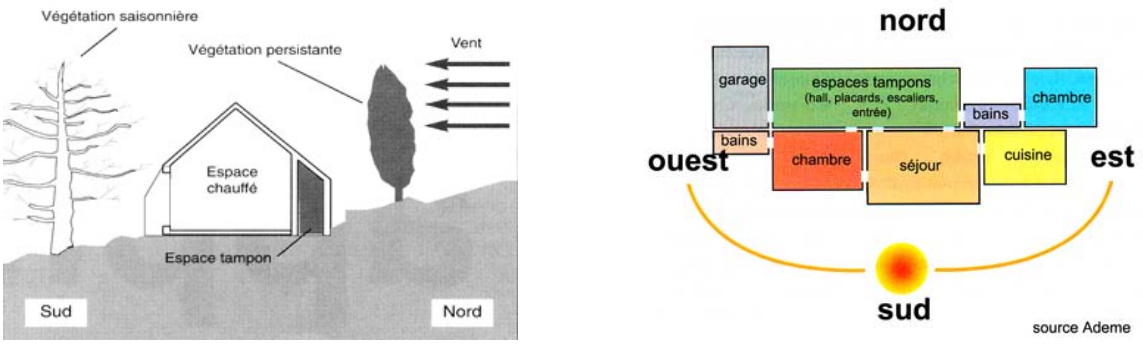


Figure 1.3 : Illustration de quelques principes d'architecture bioclimatique (implantation et organisation spatial) http://www.hespul.org/L-architecture-bioclimatique.html

En effet, par sa conception, le bâtiment doit être capable de satisfaire quatre fonctions principales :

1. capter le rayonnement solaire, *(confort thermique d'hiver)*
2. stocker l'énergie captée,
3. distribuer la chaleur,
4. réguler la chaleur.

De nouvelles solutions techniques sont apparues et ont permis d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment tout en intégrant fortement les principes bioclimatiques cités plus haut. L'intérêt croissant pour cette question a vu apparaître un ensemble de programmes régionaux, nationaux et internationaux donnant lieu à des réalisations de bâtiments performants dits environnementaux actifs.

1.2.1 VERS DES BÂTIMENTS ENVIRONNEMENTAUX ACTIFS

Pour minimiser les effets du réchauffement climatique résultant des consommations non maîtrisées de l'énergie, un ensemble d'exigences sur les performances énergétiques des bâtiments a été mis en place dans le cadre du protocole de Kyoto. La France s'est fixée comme objectif de diviser par 4 les consommations à l'horizon 2050 (bâtiments facteur 4). Cet objectif s'est inscrit [ADEME' 2007b] en Juin 2003 dans la Stratégie nationale de développement durable, en juillet 2004 dans le Plan climat[1] [PlanClimat'2004] [PlanClimat'2004-2], en 2005 dans la Loi de programme du 13 juillet qui a décrit les orientations de la politique énergétique (la directive européenne dont les exigences sont répertoriées dans la référence [EPBD' 2002]) et en octobre 2007 dans le Grenelle de l'environnement [Grenelle'2007].

Suite à ces exigences, la France a affiché une volonté d'atteindre des bâtiments dits à «Energie Positive» c'est-à-dire qui produisent plus d'énergie qu'ils ne consomment.

La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30 % au cours des 30 dernières années [ADEME'2007b]. Un bâtiment français consomme aujourd'hui environ 200 kWh/m².an (ce qui équivaut à environ 20 litres de fioul) seulement pour le chauffage [Chlela'2006]. Un ensemble de solutions est proposé en France ainsi que dans d'autres pays tels que l'Allemagne, la Suisse et les USA, pour réduire de manière significative ces consommations, voire les diviser par dix. Ces solutions se basent essentiellement sur trois points :

- la conception d'une enveloppe très performante (avec une isolation thermique très performante, une très faible perméabilité à l'air, une compacité de la forme, par exemple),
- le choix de systèmes efficaces (par l'installation de systèmes HVAC[2] performants),

[1] Plan d'actions de lutte contre le réchauffement de la planète

[2] Heating, Ventilation and Air Conditionning: Chauffage, ventilation et climatisation.

- Le choix d'une énergie renouvelable moins polluante (telle que l'énergie solaire, la transformation d'énergie avec possibilité de récupération de l'énergie par ventilation double flux ou puits canadien).

1.3 PRINCIPAUX LABELS ET RÉGLEMENTATIONS

Les labels nationaux et internationaux présentés dans cette section sont utilisés comme cible pour définir les indicateurs de performances énergétiques visées dans le cadre de cette recherche. Avant d'aborder ces labels, il est important de décrire la Réglementation Thermique française actuelle (RT2005 entrée en vigueur en février 2005), seuil minimum en terme de performance énergétique.

1.3.1 RT 2005 : RÉGLEMENTATION THERMIQUE FRANCAISE

En tant que réglementation, la RT 2005 a pour objectif d'inciter les maîtres d'œuvre et d'ouvrage à améliorer les performances énergétiques de leurs bâtiments dans le cadre technique précisé par les textes. Le Plan climat 2004 [PlanClimat'2004] [PlanClimat'2004-2] a fixé les objectifs de la RT2005 qui visent une amélioration des performances des bâtiments neufs d'au moins 15%, avec une volonté de progrès tous les cinq ans pour atteindre moins 40% en 2020.

La RT2005 s'inscrit dans la continuité de la RT 2000 dont elle reprend la structure réglementaire et décrit l'ensemble des principes qui permettent aux acteurs de la construction de choisir les solutions les plus économiques pour atteindre la performance exigée [RT'2005].

La RT2005 favorise la valorisation de la construction bioclimatique comme moyen pour réduire considérablement les besoins en chauffage et pour améliorer le confort d'été. Elle exige une amélioration de l'isolation thermique d'au moins 10% sur les déperditions par les parois et 20% par les ponts thermiques. Parmi ses recommandations : la consommation énergétique primaire pour les besoins de chauffage, rafraîchissement, ventilation, éclairage et production d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un bâtiment doit être au maximum de 130 kWh/m².an contre 250 kWh/m².an en cas de chauffage électrique, tandis que le parc existant se situe à 400 kWh/m².an en moyenne (Cf. Figure 1.4). Cette nouvelle réglementation préconise par exemple le remplacement des chaudières à combustibles fossiles par des chaudières basse consommation et les chauffages électriques par des panneaux rayonnants, qui permettent de réduire les consommations actuelles.

Plusieurs labels nationaux destinés aux bâtiments dont la consommation est inférieure la RT 2005 ont été mis en place.

1.3.2 LES LABELS NATIONAUX : HPE : Haute Performance Energétique

Le label Haute Performance énergétique **HPE** *«atteste la conformité des bâtiments nouveaux à un référentiel qui intègre les exigences de la réglementation thermique, le respect d'un niveau de performance énergétique globale de ce bâtiment supérieur à l'exigence réglementaire et les modalités minimales de contrôle définies en annexe 1 de cet arrêté»* [Arrêté'2007]. Ce label vise les bâtiments neufs dont la performance énergétique est supérieure à la RT2005. Ce label comporte cinq niveaux de performance [Arrêté'2007] [ADEME'2007b] :

- Le label «haute performance énergétique, HPE 2005» dont la consommation à atteindre est de 10% inférieure à la consommation de référence dans la RT 2005.
- Le label «très haute performance énergétique, THPE 2005» dont la consommation à atteindre est de 20% inférieure à la consommation de référence dans la RT 2005.

Ces certifications seront prochainement complétées par [Arrêté'2007] [Cegibât'2007].

- Le label «haute performance énergétique énergies renouvelables, HPE EnR 2005» qui correspond aux spécifications de la HPE, exige un recours aux énergies renouvelables (le système de chauffage doit être alimenté à plus de 60% par des énergies renouvelables, dont la part de la consommation de chauffage à atteindre par un générateur utilisant la biomasse doit être supérieur à 50%.).
- Le label «très haute performance énergétique énergies renouvelables et pompe à chaleur THPE EnR 2005», qui renforce les exigences du label HPE EnR, correspond à une consommation d'énergie inférieure au moins de 30% à la consommation de référence dans la RT 2005. En plus de la satisfaction de l'une des six conditions décrites dans l'arrêté 2007 (dont : 1) le bâtiment doit être équipé de panneaux solaires assurant au moins 50% de l'ensemble des consommations d'ECS et de chauffage ; 2) le bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur dont les caractéristiques minimales sont données en annexe 4 de l'arrêté ; etc.)
- Le label «Bâtiment Basse Consommation, BBC 2005» ou EFFINERGIE (Cf. § 1-1.3.2.1) exige une consommation inférieure à environ 50 kWh/m².an en résidentiel ou 50% au dessous de la référence réglementaire pour les bâtiments non résidentiels.

1.3.2.1 EFFINERGIE

Le label français Effinergie [Siret'2007] [Effinergie'2007] a été lancé par l'association Effinergie[3] pour promouvoir la construction et la réhabilitation à basse consommation d'énergie. Ce label correspond au label «Bâtiment Basse Consommation, BBC 2005» [Arrêté'2007]. Il vise à reprendre les principes du label suisse MINERGIE® (Cf. § 1-3.3), en l'adaptant au contexte français (Réglementaire, normatif, constructif et climatique). Pour encourager les maîtres d'ouvrage à l'adopter, l'état prévoit quelques mesures incitatives, dont : la réduction des taxes foncières, et l'extension du coefficient d'occupation du sol.

Afin d'obtenir ce label, la consommation d'énergie dans le cas de logements neufs, ne doit pas dépasser les 50 kWh/m².an (à moduler selon les zones climatiques d'un facteur de 0.9 à 1.3) ; dans le cas de tertiaire neuf, elle doit être inférieure à 50% de la consommation RT2005 ; quant aux cas de bâtiments résidentiels existants, le label prévoit 80 kWh/m².an modulables selon les régions. Aucune valeur n'est encore fixée pour la réhabilitation des bâtiments tertiaires (Cf. Figure 1.4).

L'association Effinergie a pour objectif de démontrer qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à des équipements exceptionnels et coûteux pour réaliser un bâtiment «basse consommation». Il est possible d'atteindre les performances par «l'addition harmonieuse et intelligente d'une bonne conception et d'équipements largement diffusés sur le marché».

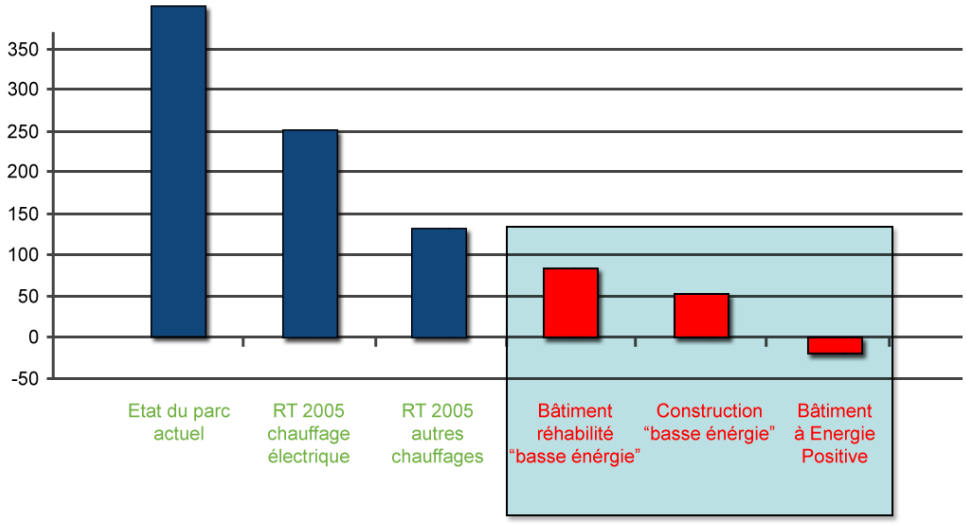


Figure 1.4 : Consommation (kWh/m².an – énergie primaire) pour les besoins de chauffage, climatisation, ventilation et production d'eau chaude sanitaire en France

[3]Les fondateurs d'Effinergie sont : région Languedoc Roussillon, CEFIIM, région Franche-Comté, Ajena, région Alsace, Rhônalpenergie-Environnement, Collectif isolons la terre contre le CO2, groupe Banque Populaire, CDC et CSTB.

1.3.3 LES LABELS INTERNATIONAUX

L'état de l'art réalisé au CSTB dans le cadre du projet BEPOS (Bâtiment à Energie POSitive) [Chlela'2006] a permis de définir cinq niveaux de labels suivant leurs exigences en termes de consommation d'énergie et de type d'opération (construction neuve ou réhabilitation) (Cf. Tableau 1). Cette section présente les labels étrangers les plus connus.

	Neuf			**Réhabilitation**	
	Performant	**Très performant**	**Zéro énergie et énergie positive**	**Performante**	**Très performante**
Résidentiel Individuel et collectif	MINERGIE® Alyos Energie+	MINERGIE®-P PASSIVHAUS®	Maison Fellbach Plusenergiehaus de Freiburg	Maison 3L BASF MINERGIE®	Maison 1L BASF
Tertiaire	Luwoge 5L SD Worx Kortrijk	ChristophorusHaus Turnhalle Kurpfalzschule	Maison à énergie positive de Fellbach	Haus 37 Vauban	

Tableau 1 : Famille des bâtiments à faible consommation d'énergie

1.3.3.1 PassivHaus (Allemagne)

PassivHaus [Duffaure'2007] [Passiv'2006] [Chlela'2006] est un Label développé par l'institut de recherche allemand Passivhaus, créé par le Dr. Wolfgang Feist en 1996. Ce label s'applique aux bâtiments résidentiels et tertiaires tant en réhabilitation qu'en construction neuve. Le concept de Passivhaus désigne des bâtiments dont les besoins énergétiques pour le chauffage sont inférieurs à 15 kWh/m².an et une consommation en énergie primaire inférieure à 120 kWh/m².an pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité (en plus des usages domestiques).

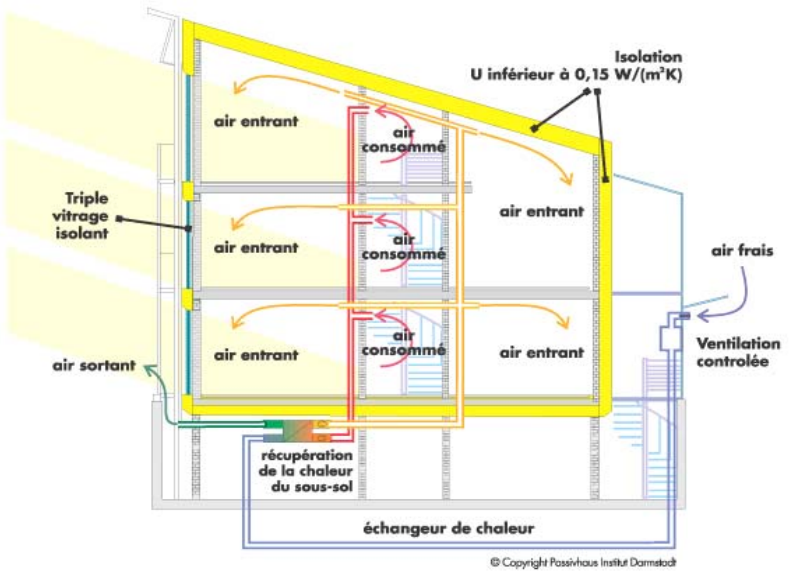


Figure 1.5 : Schématisation des principes de la conception d'une maison passive [Passivhaus'2007]

Ces bâtiments se veulent confortables tant en hiver qu'en été sans avoir à faire appel à un système conventionnel actif de chauffage ou de climatisation. Un bâtiment Passivhaus est composé d'une enveloppe avec une isolation thermique très performante et intégrant un triple vitrage isolant, d'une très faible perméabilité à l'air, d'une récupération d'énergie sur la ventilation et par préchauffage d'air neuf (double flux avec récupération, puits climatique) et de sources d'énergies renouvelables. (Cf. Figure 1.5).

Ce programme se décline en Klimahaus en Autriche, CasaClima en Italie et Passiefhuis en Belgique [CSTB'2006].

1.3.3.2 MINERGIE® (SUISSE)

MINERGIE® [Chlela'2006] [Minergie®'2007] est un label de qualité énergétique et de confort des bâtiments d'origine suisse. Ce label est destiné aux bâtiments neufs et rénovés. Il favorise une utilisation rationnelle des ressources énergétiques et l'adoption des énergies renouvelables pour assurer le confort de ses occupants. L'une des conditions d'obtention de ce label, outre une consommation de chauffage, ECS, ventilation, rafraîchissement, inférieure à un seuil de référence en énergie primaire est de limiter le surcoût de construction par rapport à un bâtiment standard [Siret'2007].

Trois sous labels ont été créés pour les bâtiments à basse et à très basse énergie :

- MINERGIE® vise le résidentiel individuel et collectif et le tertiaire, en neuf et en rénovation. Cinq exigences suivant la catégorie de bâtiment ont été mises en œuvre pour atteindre ce label [Minergie®'2007]. Ces exigences agissent sur : l'enveloppe, les systèmes de ventilation (mécanique obligatoire), les consommations annuelles d'énergie, et le surcoût inférieur ou égale à 10% par rapport à un bâtiment standard [Chlela'2006].

- MINERGIE®-P est destiné aux bâtiments à usage résidentiel (collectif et individuel) et administratif. Il correspond au standard ''PassivHaus'' dont les consommations d'énergies sont inférieures au standard MINERGIE®. Un surcoût égal au maximum à 15% d'une construction comparable est toléré dans le cadre de ce label.

- MINERGIE®-ECO représente un complément du standard MINERGIE®. Alors que les caractéristiques liées à l'économie d'énergie et au confort sont identiques à MINERGIE® ou MINERGIE®-P, cette nouvelle certification intègre des exigences supplémentaires en matière de construction saine (lumière, bruit et air intérieur) et écologiques (matière première, fabrication et déconstruction).

Le standard MINERGIE® se base sur une enveloppe très isolée intégrant un double ou triple vitrage, une très bonne étanchéité à l'air, une récupération d'énergie sur la ventilation, un électroménager performant et l'intégration des énergies renouvelables. La Figure 1.6 présente une comparaison des exigences des deux standards MINERGIE® et MINERGIE®-P, pour lesquels la consommation d'énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS) et la consommation électrique (ventilation et climatisation) varie de 42kWh/m²/a à 30kWh/m²/a.

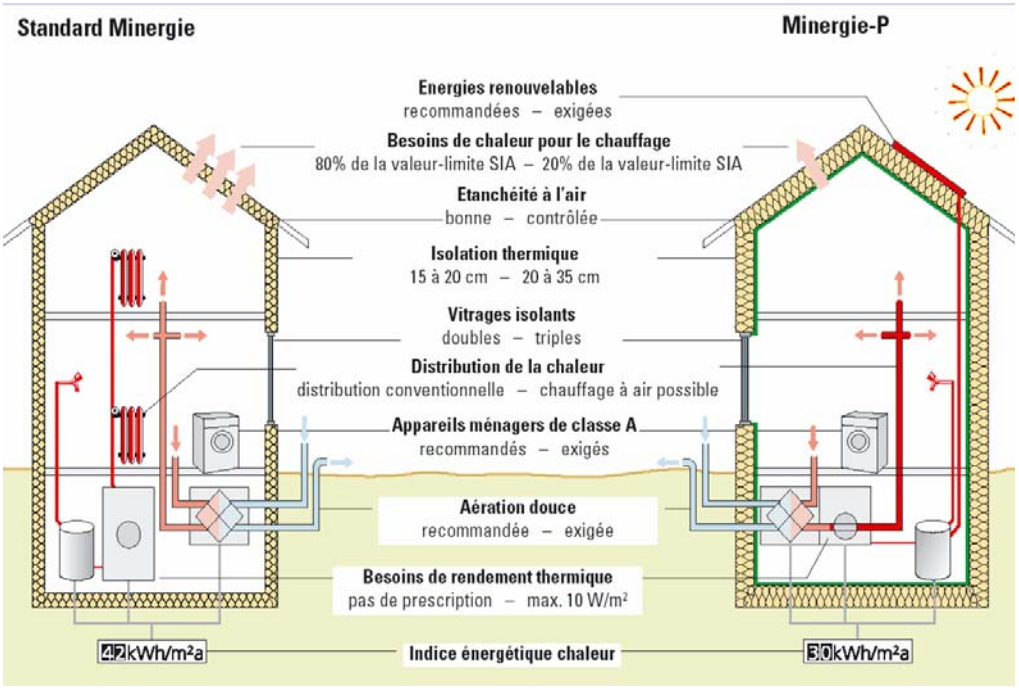


Figure 1.6 : Exigence des standards Minergie® et Minergie®-P [Minergie'2007]

1.3.3.3 ZERO ENERGY BUILDING (USA)

Zero Energy Building est un concept qui est apparu suite à la construction d'une maison sans consommation de chauffage, dans la Task 13 «Solar low energy house» de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) sous la direction scientifique du Fraunhofer Institut [Chlela'2006] [Thomsen'2004]. Grâce à des simulations, il a été démontré que les besoins de chauffage peuvent être assurés par l'installation solaire, ce qui ramène sa consommation à zéro.

Parmi les principaux objectifs de ce label [Husaunndee'2006] :

- La réalisation de bâtiments consommant 30 à 90% d'énergie en moins pour le neuf et 20 à 30% de moins pour l'existant.
- L'intégration de systèmes de production décentralisée afin d'arriver en 2020 à des bâtiments zéro énergie.
- Le développement des technologies qui réduisent les consommations d'énergie et de matière.

Bien que le programme soit ouvert aux bâtiments neufs et à la rénovation, environ 95% du budget est employé pour des projets portant sur le neuf. Des solutions existent pour la rénovation mais, n'ont toujours pas été diffusées [Husaunndee'2006].

Le programme "Zero Energy Home" est aussi déployé au Canada, au Japon, en Allemagne, en Nouvelle-Zélande [CSTB'2006]. Ces programmes sont basés sur un même principe à savoir réduire au maximum les besoins en chauffage, de refroidissement et d'électricité, grâce à une enveloppe et des équipements performants et économes dont les besoins en énergie sont satisfaits par du solaire photovoltaïque et thermique. Pour rendre possible la réalisation de ce type de solution en France de grands efforts en terme de coût des systèmes photovoltaïques devront être réalisés.

1.3.4 AUTRES PROGRAMMES INTERNATIONAUX

D'autres programmes visant la réalisation de bâtiments à faible, voire à très faible consommation d'énergie sont également en cours [Husaunndee'2006]. Un programme national allemand entièrement consacré à la rénovation a été lancé par le ministère des affaires économiques allemand depuis 1998. Il s'agit du programme EnSan "*ENERGETISCHE SANIERUNG DER BAUSUBSTANZ*" ou "Réhabilitation énergétique de la construction". Ce projet a été mis en place suite au constat fait que plus de 90% de la consommation énergétique pour le chauffage concerne les bâtiments construits avant 1983. Les bâtiments réhabilités par ce programme ont vu leur consommation de chauffage et d'électricité baisser de 50% [EnSan'2007] [Husaunndee'2006].

Le programme de réhabilitation de BASF [BASF'2006] a mis au point un concept «les maisons 3L[4] voire 1L». Ce concept a été introduit lors de la réhabilitation d'un immeuble de logements sociaux de Fontenay-sous-Bois (Val de Marne) en France (Cf. § 2-1.2.1).

Une autre approche plus singulière est apparue au Japon sous l'appellation : «*NEW ENERGY TECHNOLOGY (PV) DEVELOPMENT PROGRAMME*». Ce label vise la conception et la production d'habitations construites industriellement et innovatrices souvent dotées de systèmes photovoltaïques [Husaunndee'2006].

[4] En règle générale, l'hypothèse suivante est assumée :1L de fioul = 10 kWh

Des systèmes d'évaluation de l'efficacité environnementale du bâtiment, équivalent à la démarche HQE®[5] [HQE'2007] en France, tels que LEED®[6] (USA) [LEED'2007], CASBEE[7] (Japon) [CASBEE'2007] et BREEAM[8] (Grande Bretagne) [BREEAM'2007] intègrent eux aussi la dimension de performance énergétique comme exigence environnementale à satisfaire pour accéder à ces labels.

L'intérêt porté par la maîtrise d'ouvrage à ces labels représente un levier très important pour le développement de technologies innovantes. Néanmoins, ce nouvel intérêt ne facilite pas la mission de la maîtrise d'œuvre qui se voit incomber de nouvelles tâches et des compétences qu'elle ne maîtrise pas toujours. Chaque cas de construction, suivant le niveau de performance énergétique souhaité et les moyens mis en œuvre, pose des problèmes qui lui sont spécifiques, et qui nécessitent à chaque fois de trouver un compromis satisfaisant. La section suivante présente les particularités de la réalisation de ce type de bâtiments.

1.4 RÉALISATION DES BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Cette partie décrit en premier lieu le processus de réalisation des bâtiments à faible consommation d'énergie et les particularités qui y sont liées. Elle met en évidence la complexité de leur conception, en partie due aux informations volumineuses et complexes qui circulent tout au long de ce processus et au manque de vérifications permettant de valider les choix faits par les différents partis intervenant dans un projet. Cette partie renvoie vers la problématique à laquelle doit répondre ce travail de recherche.

1.4.1 PROCESSUS DE REALISATION D'UN BÂTIMENT SELON LA LOI MOP

Le processus de réalisation d'un bâtiment englobe un ensemble d'activités et de métiers qui se consacrent à sa mise en œuvre. Il nécessite dès la phase décisionnelle, pendant les études et jusqu'à l'exploitation du projet, l'accomplissement de nombreuses tâches à caractère technique, administratif et financier [Armand'2000].

Ces tâches s'organisent, de manière générale, suivant quatre phases dont la chronologie se doit d'être rigoureuse (suivant le secteur public/privé considéré) :

1. La phase programmation : cette phase englobe la définition des enjeux de l'opération, ses objectifs ainsi que les performances souhaitées par le maître d'ouvrage, et éventuellement, l'étude de faisabilité du projet.

[5] HQE® : "Haute Qualité Environnementale"
[6] LEED® : "Leadership in Energy and Environmental Design"
[7] CASBEE : "Comprehensive Assesment System for Building Environmental Efficiency"
[8] BREEAM : "BRE Environmental Assesment Method"

2. La phase conception et ingénierie : c'est la phase des études où sont élaborés tous les documents graphiques et techniques, ainsi que la passation des marchés.
3. La phase construction de l'ouvrage.
4. La phase exploitation et maintenance : cette dernière phase englobe l'utilisation, la gestion (courante et exceptionnelle) et l'amélioration d'un bâtiment. L'exploitation prend en compte les éventuels changements de propriétaires, jusqu'à la démolition de l'ouvrage.

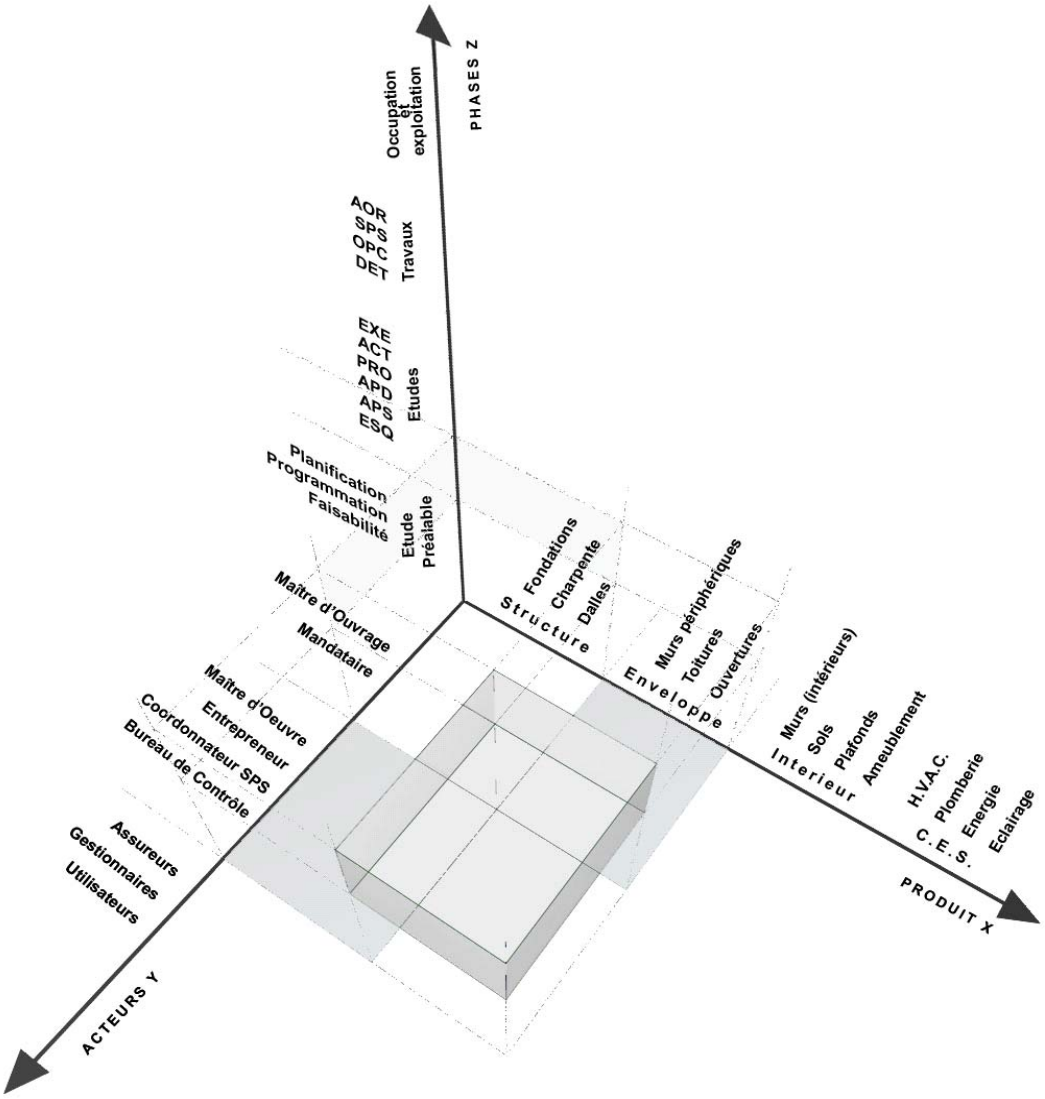


Figure 1.7 : Représentation des trois aspects de la conception architecturale : les phases, les acteurs qui y interviennent et ce qu'ils produisent à chaque phase [Rivard'1995]

La Figure 1.7, inspirée des travaux réalisés par Rivard [Rivard'95] et [MOP'2000], illustre les phases de ce processus, les acteurs ainsi que les éléments produits à la suite des différentes phases et par les différents acteurs du bâtiment.

Pour revenir à la loi 85-705 du 12 juillet 1985 (en vigueur en France), relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée [MOP'2000], ces quatre grandes phases y sont décrites comme suit :

1. L'étude préalable comprend la définition d'un besoin de réaliser un projet architectural, l'étude de faisabilité technico-économique, la réalisation d'un programme exhaustif décrivant les besoins ainsi que les performances attendues par le maître d'ouvrage, le planning général du projet qui définit les dates du déroulement des différentes tâches, et la constitution d'une équipe de maîtrise d'oeuvre, par le biais d'un concours, obligatoire quand le coût du marché est supérieur à 90 000€ HT [MarchésPub'2006].
2. L'étude consiste en la mise en place de concepts architecturaux ainsi que leur formalisation et leur étude technique. Chacune de ces phases aboutit à un ensemble de documents graphiques et administratifs. La dernière phase de cette étape se finalise par un dossier d'exécution complet et détaillé nécessaire à la réalisation du projet. D'après la loi MOP [MOP'2000] la mission de base de la phase étude comporte les étapes suivantes :
   - **ESQuisse / DIAG**nostic,
   - **A**vant **P**rojet (AP),
     - **A**vant **P**rojet **S**ommaire (APS),
     - **A**vant **P**rojet **D**étaillé (APD),
   - **PRO**jet (PRO),
   - **A**ssistance pour la passation des **C**ontrats de **T**ravaux (ACT),
   - Projet d'**EXE**cution (EXE) (*mission complémentaire à la mission de base*).
3. La réalisation des travaux consiste en la réalisation de ce qui est représenté dans les documents résultant de la phase étude (dossier d'exécution). Cette phase est décomposée dans la mission de base [MOP'2000] en deux étapes :
   - **D**irection de l'**E**xécution des contrats de **T**ravaux (DET),
   - **A**ssistance aux **O**pérations de **R**éception (AOR)**.**

   Ainsi que de deux missions complémentaires qui sont :
   - **O**rdonnancement **P**ilotage **C**oordination (OPC),
   - Coordination pour l'hygiène et la sécurité du chantier (SPS).

   Cette phase se finalise par la réception des travaux et la remise d'un dossier DOE Dossier des Ouvrages Exécutés. Elle représente le point de départ de trois types de garanties : la garantie de parfait achèvement, la garantie biennale et la garantie décennale.
4. La phase d'occupation quant à elle, consiste en l'exploitation ainsi que la gestion et la maintenance des bâtiments.

Le travail réalisé dans cette thèse se limite à la phase conception. Malgré une mission structurée et précise, les différents acteurs du bâtiment arrivent difficilement, à atteindre les performances définies par le maître d'ouvrage, constat encore plus frappant dès qu'il s'agit de bâtiments performants et énergétiquement innovants.

1.4.2 DIFFICULTÉS RENCONTREES LORS DE LA RÉALISATION DES BATIMENTS PERFORMANTS

Obtenir un système cohérent sur l'ensemble des facteurs d'une conception : urbanisme, architecture, technique, fonctionnalités, confort, maintenance, durabilité et coût, représente l'aboutissement d'un projet architectural [Moro'2000]. Les caractères «multicritères» et «multi-acteurs» de la conception rendent l'atteinte des objectifs émis par le maître d'ouvrage difficile. Ajouter à cela une volonté d'augmenter les performances énergétiques du bâtiment, voire le diviser par 4 ou le rendre à énergie positive, ne fait qu'accroître cette difficulté.

La conception de bâtiments à faible consommation d'énergie nécessite une attention particulière dans le choix : 1) de la forme, 2) de l'enveloppe, 3) des systèmes, 4) de la gestion et la production de l'énergie utilisée ainsi que 5) la prise en charge des apports internes [Gartia'2002]. L'importance et la variété des informations à maîtriser, les multiples interactions entre les acteurs et la cohérence des choix qu'ils réalisent sont dures à atteindre [Hauglustaine2001-a]. Cet état de fait est dû à plusieurs problèmes qui jalonnent le processus. Parmi ces difficultés, celles traitées dans cette recherche sont : 1) les pertes rencontrées lors de la circulation du flux d'information entre les différents acteurs durant le processus de conception, 2) les dérives entraînées par les choix réalisés par les différents intervenants.

1.4.2.1 Circulation de l'information et processus de conception

Il est important de décrire les mécanismes par lesquels l'information circule et s'accumule tout au long du processus de conception architecturale ainsi que les difficultés qui s'y rapportent.

Lebahar [Lebahar'1986] définit la conception architecturale comme un acte complexe qui exige *«la transformation d'un **corps initial d'informations** insuffisant en un **corps final** qui permettra de communiquer formes et dimensions de l'édifice, à un chantier».* Le corps initial représente tout ce qui concerne les exigences d'un programme, d'un site, des réglementations et des normes à respecter, mais aussi des critères propres à chaque intervenant, qui sont ses connaissances et son expérience personnelle.

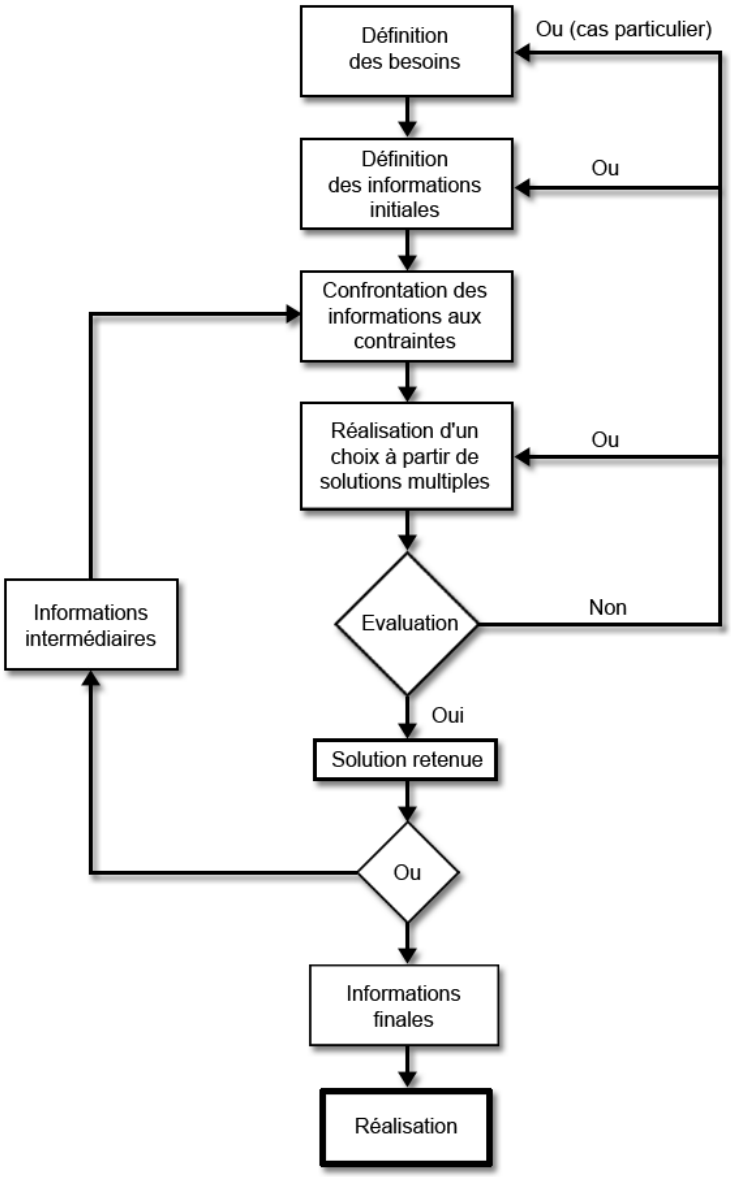


Figure 1.8 : Représentation d'un scénario des actions réalisées dans le cadre d'un processus de conception

L'information initiale peut être divisée en deux parties : 1) les informations sur lesquelles il est possible d'agir, 2) les contraintes. Luc Adolphe [Adolphe'1991] divise, dans sa thèse, ces contraintes en deux types :

1) des contraintes explicites telles que : les contraintes du programme (culturelles, économiques et temporelles), les contraintes du site (site, climat, pratiques locales) et les contraintes normatives (urbanisme et servitudes de sol, salubrité, protection incendie, isolation phonique, stabilité de l'ouvrage, performances énergétiques, aération logement) ;

2) des contraintes implicites qui sont : sensibilité et pratiques propres aux concepteurs.

L'information initiale est partielle et insuffisante. Elle ne permet pas de lancer une suite prédéfinie d'opérations de réalisation d'un projet. C'est au travers d'étapes successives d'élaboration d'un projet, contraintes par des exigences, que la spécification progressive des objets du bâtiment va faire apparaître de nouvelles informations et de nouvelles contraintes[9] [Adolphe'1991]. La prise en compte des premières et le respect des secondes va permettre d'arriver à ce corps d'informations finales qui permet de réaliser le projet.

Ces nouvelles contraintes et informations peuvent, cependant, engendrer la remise en cause des choix faits lors des étapes précédentes (Cf. Figure 1.8), car les solutions proposées sur la base d'informations partielles ne peuvent être catégoriques et définitives. C'est pour cela qu'il est nécessaire de procéder à des évaluations continues de toutes les solutions proposées tout au long de la conception, ce qui n'est pas toujours respecté.

La section suivante présente les difficultés observées lors de la circulation de l'information, et qui perturbent le processus, ainsi que leurs causes.

1.4.2.2 Difficultés rencontrées lors de la circulation de l'information et leurs causes

L'un des problèmes majeurs rencontré lors de la conception d'un bâtiment est la perte ou le manque d'informations. La Figure 1.9 présente une schématisation de la concaténation des informations qui circulent tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. Celle-ci est représentée par une courbe «rouge», exponentielle durant les phases étude et construction, reflétant une agrégation rapide et importante des informations et qui s'adoucit lors de la phase exploitation. Or, dans la réalité la courbe ressemblerait plus à la courbe bleue, sur laquelle apparaît une perte importante de l'information tout au long du cycle de vie du bâtiment.

L'information perdue peut être de différentes natures, tels que : les objectifs à atteindre, les recommandations de la maîtrise d'ouvrage par rapport aux particularités d'un projet, l'information liée à l'état d'avancement d'un projet tels que les plans de détails ou des décisions omises et qui impliquent des changements, les causes qui ont poussé les différents acteurs à faire certains choix. Toutes ces informations qui constituent l'espace de conception et qui doivent être impérativement conservées ne le sont pas toujours.

[9] Par contraintes nous englobons, dans le cadre de cette recherche, à la fois les contraintes fixes auxquelles il n'est pas possible d'y déroger (les contraintes réglementaire par exemple), et les limites induites par certains choix, qui réduisent le champ d'intervention de la maîtrise d'œuvre.

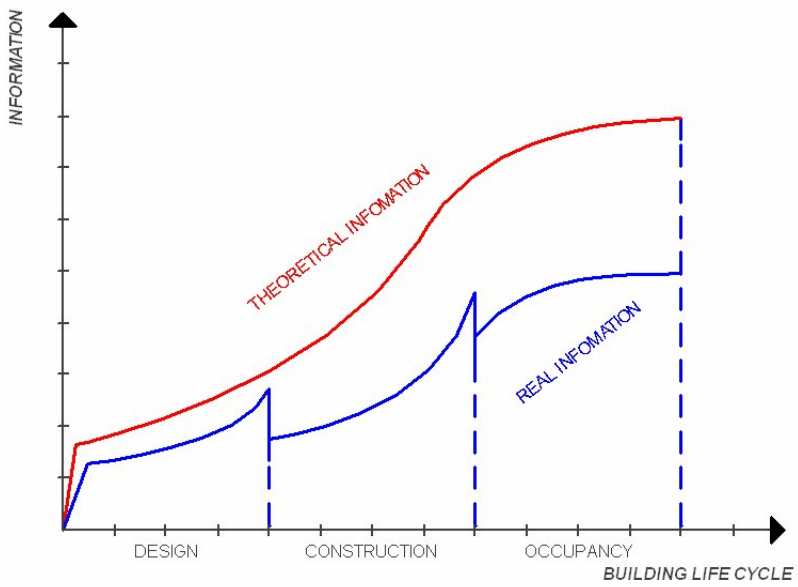


Figure 1.9 : Représentation des informations théorique et réelle cumulées tout au long du cycle de vie d'un bâtiment [Baummann'2005]

Des points de rupture sont représentés dans la Figure 1.9. Ces points de rupture coïncident avec le passage entre les grandes étapes du cycle de vie du bâtiment, à savoir : 1) de l'étude à la réalisation, 2) de la réalisation à l'exportation, et éventuellement 3) en cas de changement d'exploitant. Ils correspondent à la clôture de ces grandes phases, qui s'accompagne de la remise des dossiers, tels que le DCE en fin de phase d'étude et le DOE à la réception (Cf. Figure 1.10).

Les Figure 1.10 et Figure 1.17 illustrent la circulation du flux d'informations durant le processus de conception (en ce basant sur la loi MOP), modélisée grâce à un diagramme IDEF0 [IDEF'2005]. Ce type de diagramme permet : 1) de décrire les différentes étapes d'un processus (à différentes échelles), 2) de représenter les données nécessaires à chaque entrée d'une étape ainsi que celles produites en sortie, 3) de mettre en évidence les retours d'information (retour d'expérience) d'une étape à l'autre, 4) de représenter les mécanismes (outils, acteurs, autres) qui interviennent dans le processus, 5) de montrer les contraintes nécessaires au déclenchement de chaque étape ou qui influent sur son déroulement. Ce mode de représentation a permis de visualiser et comprendre le déroulement du processus de conception à différentes échelles et de représenter les pertes ainsi que les mécanismes et les contraintes qui peuvent en être la cause. Il est ainsi possible de représenter la phase conception (design), ou construction ou exploitation, de la même manière (Cf. Figure 1.17).

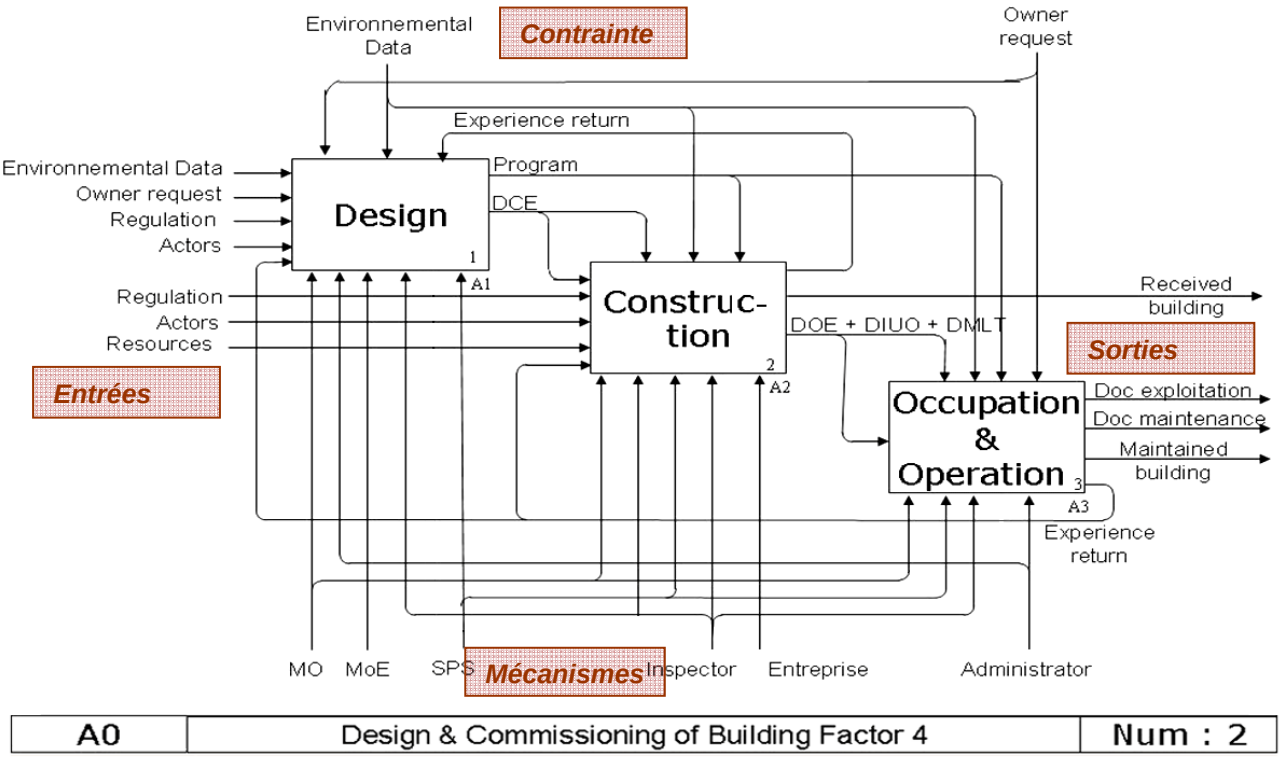


Figure 1.10 : Représentation de la circulation de l'information à travers les grandes étapes du cycle de vie du bâtiment

Les pertes d'information sont dues à plusieurs causes, parmi lesquelles :

A. La variété et complexité de l'information

La conception d'un bâtiment à faible consommation d'énergie met en œuvre un grand nombre d'informations liées :

- aux choix de **l'enveloppe du bâtiment** : son orientation, sa compacité formelle, son pourcentage d'ouvertures extérieures, son isolation etc. [Gartia'2002] ;
- aux choix de **l'énergie** : multi énergie, énergie renouvelable ou autre ;
- aux choix des **systèmes** : chaudières, pompes à chaleur, puits canadiens, capteurs solaires et photovoltaïques et autres technologies éprouvées ou expérimentales [Chlela'2006] [Minergie'2006] [Passiv'2006];
- aux **apports internes** liés aux usagers, aux équipements et à l'éclairage [Gartia'2002].

Pour atteindre les performances exigées par la maîtrise d'ouvrage, toutes ces parties doivent fonctionner comme un système unique et cohérent.

B. Le manque de hiérarchisation de l'information

L'une des causes majeures de la perte d'information est liée à un manque de hiérarchisation de l'information, qui implique le plus souvent : 1) la perte d'informations importantes, telles que des recommandations liées à la particularité d'un projet, 2) la prise en compte d'informations «parasites» dont l'intérêt est faible et peuvent détourner l'attention des concepteurs de ce qui est essentiel.

C. La Complexité liée aux multiples référentiels

Le processus de conception d'un bâtiment met en œuvre trois référentiels (Cf. Figure 1.11) :

1. un référentiel du projet décrivant par exemple sa géométrie et son fonctionnement,
2. un référentiel propre à chaque acteur mettant en œuvre ses connaissances,
3. un référentiel technique dont la complexité s'accroît proportionnellement aux exigences de performances énergétique émises par le maître d'ouvrage et au parti pris par la maîtrise d'œuvre (tel que architecture bioclimatique, intégration de technologies nouvelles ou pas).

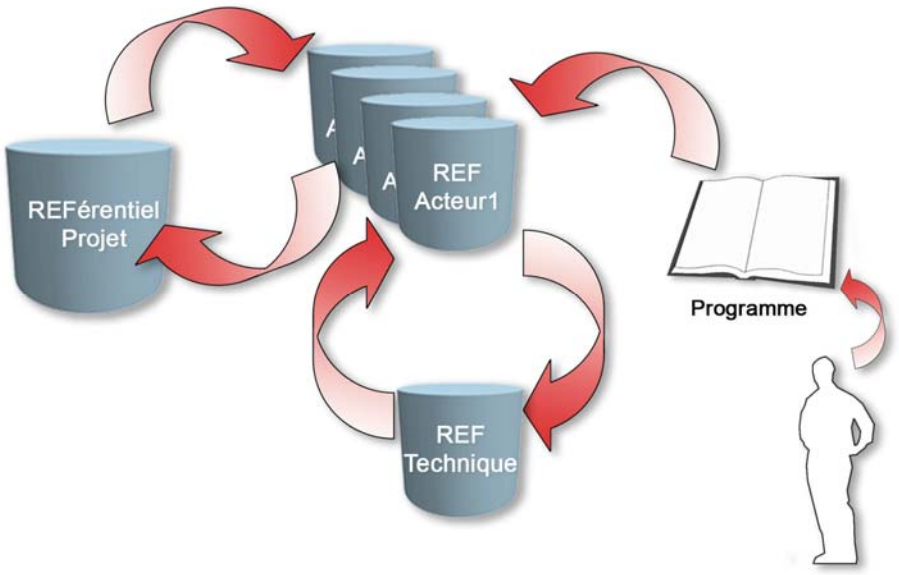


Figure 1.11 : Représentation des différents référentiels intervenant dans le cadre de la conception d'un bâtiment à faible consommation d'énergie

La difficultés réside ici dans la cohabitation de tous ces référentiels tout au long du cycle de vie du bâtiment et d'arriver à composer un tout cohérent malgré cette complexité.

D. L'inefficacité du partage de l'information

Il est souvent question d'ingénierie concourante, dans le domaine du bâtiment comme solution aux divergences existantes entre les différents corps de métier [Moro'2000]. Ces divergences sont rencontrées dans le cas où plusieurs acteurs qui ne pratiquent pas le même langage se partagent la même information que ce soit en conception, construction, ou gestion de patrimoine [Sauce'2003]. Le problème que rencontre ce type de domaines est lié à la communication, le partage et l'échange de l'information par différents métiers.

E. Les causes liées aux contraintes implicites

L'information liée à un projet est appréhendée, interprétée et exploitée différemment selon le domaine de chaque acteur. Les seuls points communs entre ces différents intervenants sont le programme ou les performances à atteindre, les délais et le budget émis par le maître d'ouvrage. Bien qu'ils visent tous à répondre au mieux à ces mêmes objectifs, chaque intervenant va naturellement privilégier et exploiter son propre référentiel, ses connaissances, ses expériences, son propre jugement, sa sensibilité personnelle et la puissance de sa perception et de son interprétation [Adolphe'1991], pour y répondre.

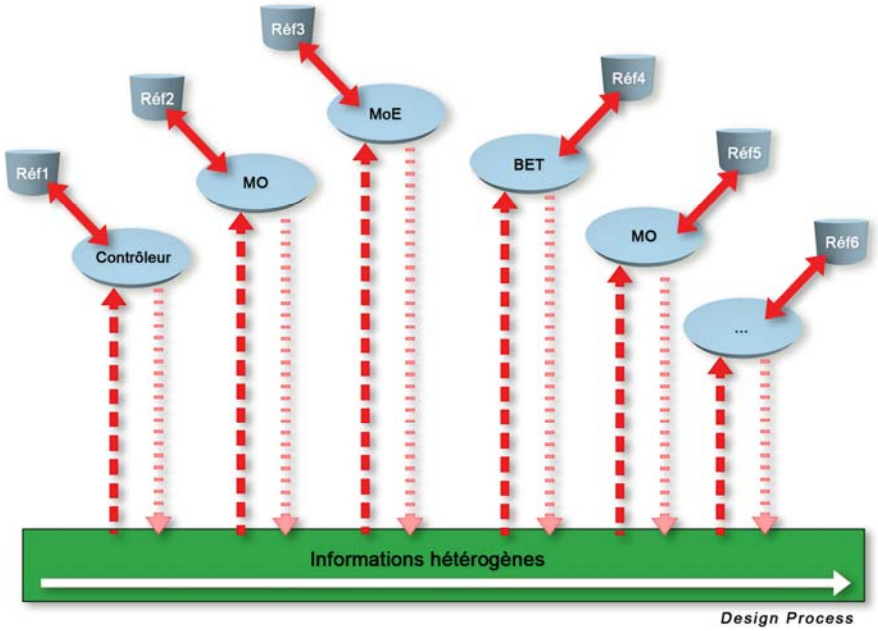


Figure 1.12 : Représentation de l'appropriation de l'information par les acteurs

En effet, un grand nombre d'informations hétérogènes s'accumulent au fur et à mesure de l'avancement du projet. Ces informations sont utilisées et alimentées par les différents corps de métier.

L'architecte, l'ingénieur ou le thermicien n'ont pas besoin de la même information pour progresser dans leurs tâches respectives. Chacun alliant sa propre connaissance et sa propre mission, va utiliser l'information qui correspond à son propre référentiel. Faute d'une connaissance globale du projet (qui devrait comporter l'état d'un projet suite aux interventions des acteurs ainsi que les raisons qui les ont poussés à faire certains choix ou changements), il arrive que certains acteurs ne prennent pas en compte toutes les informations qui sont nécessaires à leur intervention. Avec une information partielle, ces acteurs ne peuvent produire qu'une réponse partielle qui ne peut donc pas satisfaire toutes les exigences du programme (Cf. Figure 1.12).

Après avoir décrit les difficultés majeures rencontrées lors de la circulation de l'information et identifier leurs principales causes, une proposition de solutions possibles est présentée dans la section suivante.

1.4.2.3 Analyse et solutions possibles aux pertes d'informations

Il va sans dire que l'information utile et nécessaire au bon déroulement d'un projet doit être disponible à chaque étape du processus et pour chacun de ses intervenants. Fournir trop ou peu d'informations altérerait fortement la conception. En effet, le concepteur risquerait de se perdre à vouloir prendre en compte une quantité importante d'informations non hiérarchisées, ou alors n'aurait pas les données suffisantes pour mener à bien son travail. Il est donc utile et même nécessaire que chaque acteur hiérarchise l'information de manière à ce que les futurs acteurs puissent l'exploiter efficacement.

En ce qui concerne la capitalisation de l'information (dans le cas d'une ingénierie concourante), que ce soit dans le cas de la réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie ou dans celui de la gestion de patrimoine [sauce'2003] [Hendrickx'2003], de nombreux travaux visant à capitaliser et à standardiser l'information sont actuellement en cours. Ces travaux visent à trouver une solution à l'échange et le partage des données et des résultats pour tous les acteurs d'une ingénierie concourante.

Les BIM «Building Information Model» sont une de ces solutions [Eastman'1999], ils représentent un modèle d'information produit et maintenu tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. Il permet au travers d'un processus de génération et de gestion d'un modèle d'information du bâtiment de couvrir les trois aspects suivants :

- l'aspect graphique (tels que la géométrie 2D/3D, les relations entre espaces, déplacement en temps réel),
- l'aspect quantitatif (telle que la quantité de matériaux),
- l'aspect qualitatif (telles que les informations géographiques ou les propriétés des composants d'un bâtiment).

Les IFC [10], sont un standard d'échange dans le domaine du bâtiment de plus en plus adopté dans ce cas de figure. Il permet de représenter le modèle du bâtiment qui se veut exploitable par les principaux outils utilisés dans la conception ou la gestion de patrimoine [IFC'2005]. Néanmoins, ce modèle qui décrit le résultat d'une conception, ne permet pas de connaître les raisons qui ont poussé les concepteurs à faire certains choix. Cette limite facilite les dérives dues aux changements réalisés par les autres acteurs.

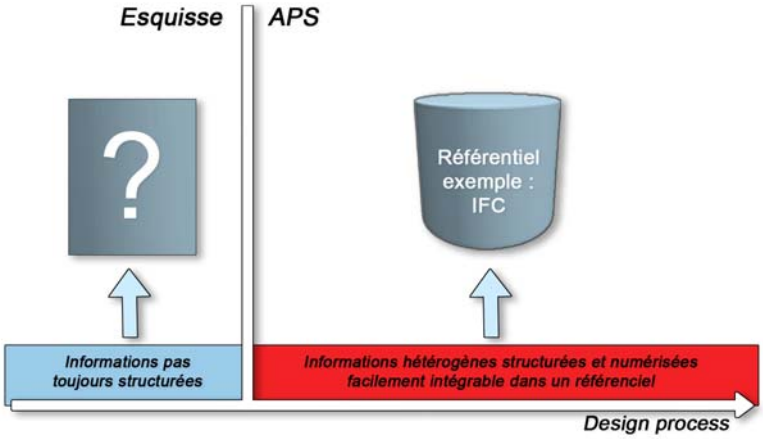


Figure 1.13 : Capitalisation de l'information

Cette solution est intéressante quand il s'agit de données structurées et numérisées (Cf. Figure 1.13), mais ne prend pas en charge aujourd'hui les données non numérisées telles que les esquisses à main levée.

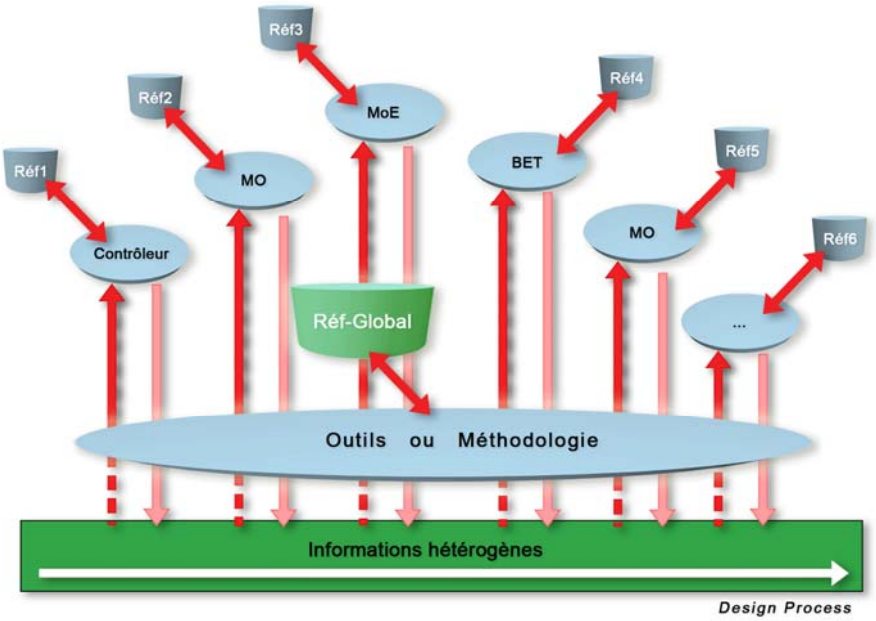


Figure 1.14: Une méthodologie d'évaluation appuyée par une connaissance globale du projet, solution possible à la perte d'informations

[10] IFC : Industry Foundation Classes

Afin de fournir à tous les acteurs une vision globale et compréhensible d'un projet, il est possible d'imaginer un outil ou une méthodologie qui munie d'une connaissance globale du projet (sa géométrie, ses données qualitatives et quantitatives et un historique des actions réalisées) et des exigences auxquelles il doit répondre, permet aux différents acteurs de compléter les informations utiles à une étape donnée, si cela est nécessaire (Cf. Figure 1.14) et d'évaluer leurs réponses par rapport aux objectifs définis.

En plus des difficultés retrouvées dans le flux d'informations, les dérives dues aux décisions, inappropriées, prisent lors de la réalisation d'un bâtiment à faible consommation d'énergie peuvent être plus importantes que dans le cas d'un bâtiment courant. La section suivante présente plus en détail cet aspect.

1.4.2.4 Impact de la qualité des choix sur la performance Energétique du bâtiment

La qualité et la pertinence des choix réalisés tout au long du processus de conception ont un impact certain sur la qualité d'un bâtiment ainsi que sur sa performance finale. Plus grandes sont les exigences du projet, plus cet impact augmente.

Telle que l'illustre la Figure 1.15, la possibilité de modification (dans le cas d'un mauvais choix) dans un projet en conception diminue au fur et à mesure qu'il avance dans le temps [Midler'1996] [Diab'2000], alors que la densité d'informations disponibles augmente. En début du processus, le concepteur va manquer d'informations pour traiter un problème ou apporter une modification effective et définitive. Plus le projet avance, plus l'information est disponible, par contre celui-ci va manquer de liberté d'action, et le traitement des problèmes en sera plus coûteux.

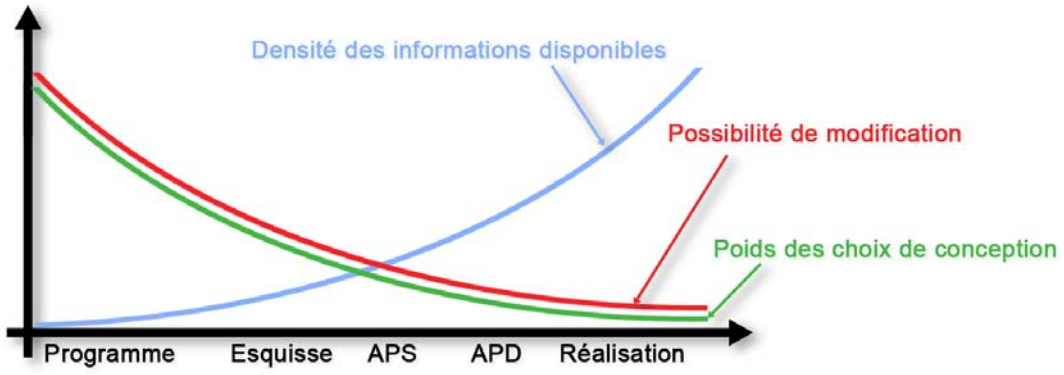


Figure 1.15 : Possibilités de modifications d'un projet dans le temps [DIAB'2000]

D'un autre coté, ce graphe montre que le poids des choix réalisés décroît au fur et à mesure que le projet avance. Cela reste vrai dans le cas d'une vision globale du projet (Plan masse, orientation, volumétrie générale, choix de l'énergie etc.), car plus le projet avance plus les actions se limitent à affiner les choix majeurs réalisés en début de conception (choix de l'enveloppe par exemple). Néanmoins, l'importance de l'impact de cet «affinage» reste grande des qu'il s'agit de systèmes «plus sensibles aux changements» telles que des décisions prises sur la puissance de systèmes HVAC, ou épaisseurs et type de l'isolation par exemple. C'est pourquoi, il semble plus adéquat dans le cas où le bâtiment est considéré comme un système incluant des sous-systèmes techniques (système de production, de diffusion de chaleur par exemple) de représenter cette courbe comme sur la Figure 1.16.

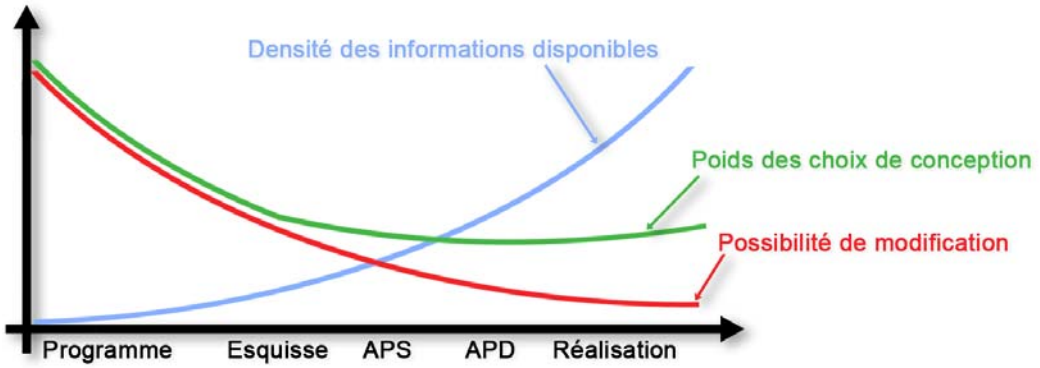


Figure 1.16 : Possibilités de modifications d'un projet et de ces systèmes dans le temps

Le manque de liberté des phases avales du processus de conception, l'importance des dérives dues aux mauvais choix réalisés, et le prix élevé en temps de réalisation et en argent de la correction de ces dérives montrent clairement la vigilance qu'il faut avoir dès les phases amont de la conception d'un projet.

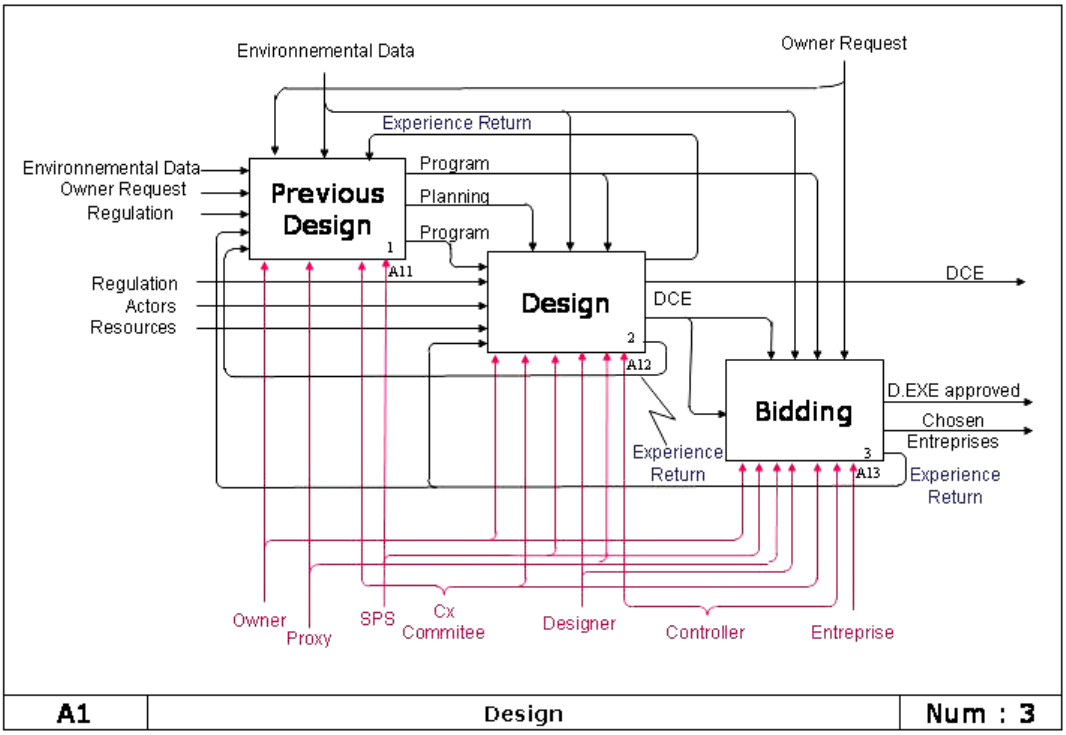


Figure 1.17: Intégration du commissionnement dans le processus de conception

Pour remédier aux problèmes identifiés, il faudrait intégrer une procédure d'assurance qualité qui permet d'évaluer, dès les premières phases du processus de réalisation des bâtiments à faible consommation d'énergie, de manière structurée, organisée et non intuitive en comparant, les résultats obtenus (ou susceptibles de l'être) avec ceux souhaités (Cf. Figure 1.17). Cette procédure doit permettre d'assurer *«que l'on fait bien ce que l'on a prévu»* en garantissant la bonne circulation de l'information tout au long du cycle de vie du bâtiment, ainsi qu'en vérifiant la pertinence des choix réalisés en vue d'atteindre les performances souhaitées. Le commissionnement est un processus en développement (Annexe 40 et 47) qui vise à assurer ce type de tâche.

La section suivante présente un état de l'art sur le commissionnement : une définition, son utilisation, les outils existants dédiés au commissionnement ainsi que sa présence dans certaines certifications et labels nationaux et internationaux.

2. LE PROCESSUS DE COMMISSIONNEMENT

2.1 L'ORIGINE DU COMMISSIONNEMENT

Le mot commissionnement vient de l'anglais «*commissioning*». Il désigne l'acte de commissionner, qui veut dire déléguer le pouvoir ou charger quelqu'un d'agir au nom de celui qui le délègue.

Le commissionnement trouve son origine dans la conception navale. Il représente dans ce domaine les opérations qui permettent d'assurer le niveau de qualité satisfaisant d'un navire au cours de sa construction [Reilly'1975]. Il a connu ces 30 dernières années une recrudescence dans le domaine du bâtiment, dans lequel il représente un élément central de la réception [Turkaslan'2006].

Le commissionnement représentait dans les années 60 et 70 une phase naturelle, de mise au point, dans le processus de conception. Il venait valider la réalisation des travaux avant leur réception [COSTIC'2002]. Celui-ci a émergé suite à la crise énergétique des années 70 avec l'introduction de nouvelles technologies dans le bâtiment [Akin'2003] [Turkaslan'2006]. Néanmoins, la crise de marché des années 80 a engendré une restriction dans cette mise au point de sorte que toute évaluation qui n'était pas considérée comme strictement nécessaire était éliminée, ce qui a provoqué l'apparition de défaillances dans certaines installations [COSTIC'2002]. Bien que la mise au point reste dans ces années-là une action naturelle, elle perd de plus en plus sa place, suite aux constats de défaillance des installations et l'insatisfaction que les équipements ont provoqué.

Des actions souvent différentes d'un pays à l'autre, désigné comme «*commissioning*», sont apparues durant ces années aux USA, en Grande Bretagne ainsi que dans certains pays d'Europe, à la suite desquelles un certain nombre de normes européennes ont traité du sujet. C'est principalement dans les années 90 que le commissionnement s'impose en Grande Bretagne, qui intègre notamment la mise au point, la mise en main «*hand over*» et la documentation [COSTIC'2002].

Contrairement à la démarche anglaise où le commissionnement est associé à la phase réception du bâtiment [Jandon'2005], l'approche de l'AIE [Annexe 40'2004] [Visier'2005] le considère non pas comme une action ponctuelle mais comme un processus qui s'étend tout au long du cycle de vie du bâtiment.

2.2 DÉFINITION DU PROCESSUS DE COMMISSIONNEMENT

Il est communément admis que le commissionnement représente une méthode qui réduit considérablement les risques de dérives pour de nouveaux projets de construction [Cx'1999].

Le travail sur le commissionnement en tant que processus appliqué au cycle de vie des bâtiments a débuté aux Etats Unies d'Amérique en 1984 quand la Société «*American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*» (ASHRAE) a mis en place son comité pour «guider au commissionnement». Ce comité avait comme mission de définir un processus qui garantit que le bâtiment à la réception répond bien aux exigences du maître d'ouvrage. Ce comité a donc publié deux guides, le premier en 1986 et le second en 1996 [ASHRAE'1996].

La définition retenue par l'Annexe 40 de l'AIE représente une synthèse de celles suggérées par les associations américaines et japonaises d'ingénierie en génie climatique. Elle se présente comme suit *«le commissionnement est un processus visant à s'assurer que les systèmes sont conçus, installés, testés fonctionnellement et peuvent être exploités et maintenus dans des conditions optimales. Le commissionnement commence avec le programme et se continue au cours des phases de conception, de construction, de réception, de formation et d'exploitation. Le commissionnement peut être appliqué tout au long de la vie du bâtiment»* [ASHRAE'1996] [Visier'2004].

Commissionner c'est donc proposer une procédure ou une démarche de vérification et de validation pour assurer la qualité fonctionnelle (technique et sociale), environnementale (réduction des dépenses énergétiques en contribuant ainsi à la lutte contre les émissions des gaz à effet de serre), économique et de confort d'un système (installation ou bâtiment) au cours de toutes les phases de sa réalisation et pendant son exploitation.

2.3 LES TYPES DE COMMISSIONNEMENT

Il existe 4 types de commissionnement qui varient suivant leur phase d'intervention dans un projet [Annexe40'2004] [Annexe40'2007] :

- *Le commissionnement «initial» :* se fait dans le cas d'un bâtiment neuf. Il débute lors de la conception jusqu'à la réception.
- *Le «rétro commissionnement» :* le «premier commissionnement» se fait sur la réhabilitation d'une construction existante pour laquelle le commissionnement n'a pas été réalisé.
- *Le «re-commissionnement» :* se fait sur un bâtiment qui a déjà fait l'objet d'un commissionnement initial ou d'un rétro commissionnement et sur lequel le propriétaire envisage de vérifier, d'améliorer et de documenter les performances énergétiques.

- *Le commissionnement «continu» :* se fait de manière constante sur un bâtiment qui a déjà fait l'objet d'un commissionnement initial ou et un rétro commissionnement et sur lequel on envisage d'améliorer, d'optimiser et de maintenir les performances avant une progression grave des dégradations.

Il peut néanmoins être étendu sur ces quatre types de commissionnement. Ce travail traite plus particulièrement la phase conception du processus de réalisation d'un bâtiment (commissionnement «initial»).

2.4 LE MODE D'ORGANISATION DU COMMISSIONNEMENT

Il existe trois modes d'organisations possibles pour le commissionnement. Le choix d'un de ces modes vari suivant le contexte local dans lequel il sera réalisé, de l'expérience du terrain, de la taille du projet et des souhaits du client [Visier'2004] [Annexe40'2004]. Ces approches sont présentées dans le tableau 2.

Approches de commissionnement	Avantages	Inconvénients et difficultés
1ére approche : Réaliser le Cx par une seule personne qui dépend du maître d'ouvrage. (répandue aux USA)	- Garantir qu'un œil neuf vérifie tout ce qui peut avoir un impact sur l'exploitation et la maintenance ultérieure d'un bâtiment.	- Coûts supplémentaires liés à la rémunération du nouvel acteur. - Risques de désinvestissement des autres acteurs.
2ème approche : Réaliser le Cx par les acteurs habituels du bâtiment (une approche plus européenne)	- Commissionnement plus intégré dans la pratique quotidienne des acteurs du bâtiment.	- Risque d'amalgame entre les tâches de commissionnement et les tâches habituelles de conception, et de réalisation et de gestion. - Convaincre de l'importance de la réalisation de toutes les tâches de commissionnement.
3ème approche : (mixte des deux premières) Faire intervenir un commissionnaire uniquement pour vérifier l'exécution des tâches de commissionnement réalisées par les acteurs habituels.		- Contrôler le contrôleur…

Tableau 2 : Synthèse des approches possible en commissionnement (Cx) [Annexe40'2004] [Annexe40'2007]

La première approche vise à faire du commissionnement une tâche spécifique qui nécessite l'intervention de spécialistes. La deuxième vise à en faire un moyen d'améliorer la qualité de la réalisation d'un bâtiment en l'intégrant dans la tâche de chacun des acteurs concernés. Le défi, dans ce cas, est de différencier le commissionnement des tâches habituelles qui risque à terme de disparaître dans les procédures de qualité de chaque intervenant, en l'intégrant.

Etant donné la configuration actuelle du secteur du bâtiment, la mission de commissionnement n'existant pas encore en France, les acteurs susceptibles d'intervenir comme commissionnaires sont l'assistant à maîtrise d'ouvrage, le contrôleur technique, et éventuellement le maître d'ouvrage s'il est du domaine. En effet, la mission des deux premiers se rapproche du commissionnement étant donné qu'ils viennent vérifier que la conception correspond bien aux souhaits du maître d'ouvrage pour le premier et si elle est réalisée dans les règles de l'art pour le second. Cependant, elle ne couvre pas tous les aspects du bâtiment. Des missions complémentaires pourront donc y être intégrées, ce qui est le cas des contrôleurs techniques, par exemple, qui intègrent aujourd'hui des missions complémentaires telles que la sécurité et la vérification des consommations énergétiques par rapport à la RT2005 etc.

2.5 LES OUTILS DE COMMISSIONNEMENT

Il existe deux types d'outils, des outils de gestion du processus de commissionnement et des outils d'évaluation de la performance énergétique [Visier'2004] [Annexe40'2004] [Annexe40'2007] [Adam'2005].

2.5.1 OUTILS DE GESTION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT

Le plan de commissionnement décrit l'ensemble des tâches à réaliser tout au long du processus de conception. Il est défini au début du projet et doit être continuellement mis à jour. Sa précision varie suivant le type de bâtiment à commissionner et son niveau de risque (Cf. [Annexe40'2007]).

Afin de structurer et d'appliquer un plan de Commissionnement, trois outils (axés vers les installations HVAC) ont été développés au cours de l'Annexe 40 de l'AIE :

- les listes de vérification,
- les modèles standards,
- les matrices de contrôles qualité.

2.5.1.1 Les listes de vérification «check lists»

La «check lists» (liste de tâches) représente la version minimale d'un plan de commissionnement qui dépend du type de système à évaluer. Elle comprend toutes les vérifications nécessaires pour s'assurer que toutes les actions critiques ont bien été réalisées. Dans les projets simples, où un commissionnaire n'est pas prévu, le gestionnaire de projet est capable grâce à ce genre d'outils d'appliquer un minimum de contrôle de qualité. L'une de leurs caractéristiques principales est qu'elles doivent pouvoir être utilisées par toutes les parties concernées.

2.5.1.2 Les modèles standards ou «Standard Models of Commissioning Plans (SMCxP)»

Les modèles standard représentent des listes de tâches détaillées, qui constituent une base de référence pour l'établissement de plans de commissionnement adaptés à des projets spécifiques (Cf. *http://www.commissioning-hvac.org/Tool1.asp*).

Il existe 5 modèles standards, dont le choix dépend des paramètres suivants (Cf. Figure 1.18) :

- la stratégie du maître d'ouvrage et de l'exploitant,
- la criticité du bon fonctionnement du bâtiment,
- la complexité du bâtiment et de ses installations.

Cinq typologies de bâtiments ont été proposées dans l'annexe 40 [Annexe40'2004] [Annexe40'2007]. Elles sont classés par ordre de niveau de risque :

- Type 1 : les petits bâtiments, avec systèmes simples de chauffage et de ventilation ;
- Type 2 : les bâtiments de taille moyenne, avec unités de climatisation autonomes ;
- Type 3 : les bâtiments de tailles moyennes, avec systèmes de chauffage et de ventilation centralisée ;
- Type 4 : les grands bâtiments du secteur tertiaire, avec systèmes de climatisation centralisés ;
- Type 5 : les bâtiments dits "complexes" (hôpitaux, bâtiments industriels spéciaux, laboratoires, etc.)

Chacun de ces types possède un modèle standard qui lui correspond et dans lequel sont présentées les différentes tâches de commissionnement à réaliser à chaque phase du projet.

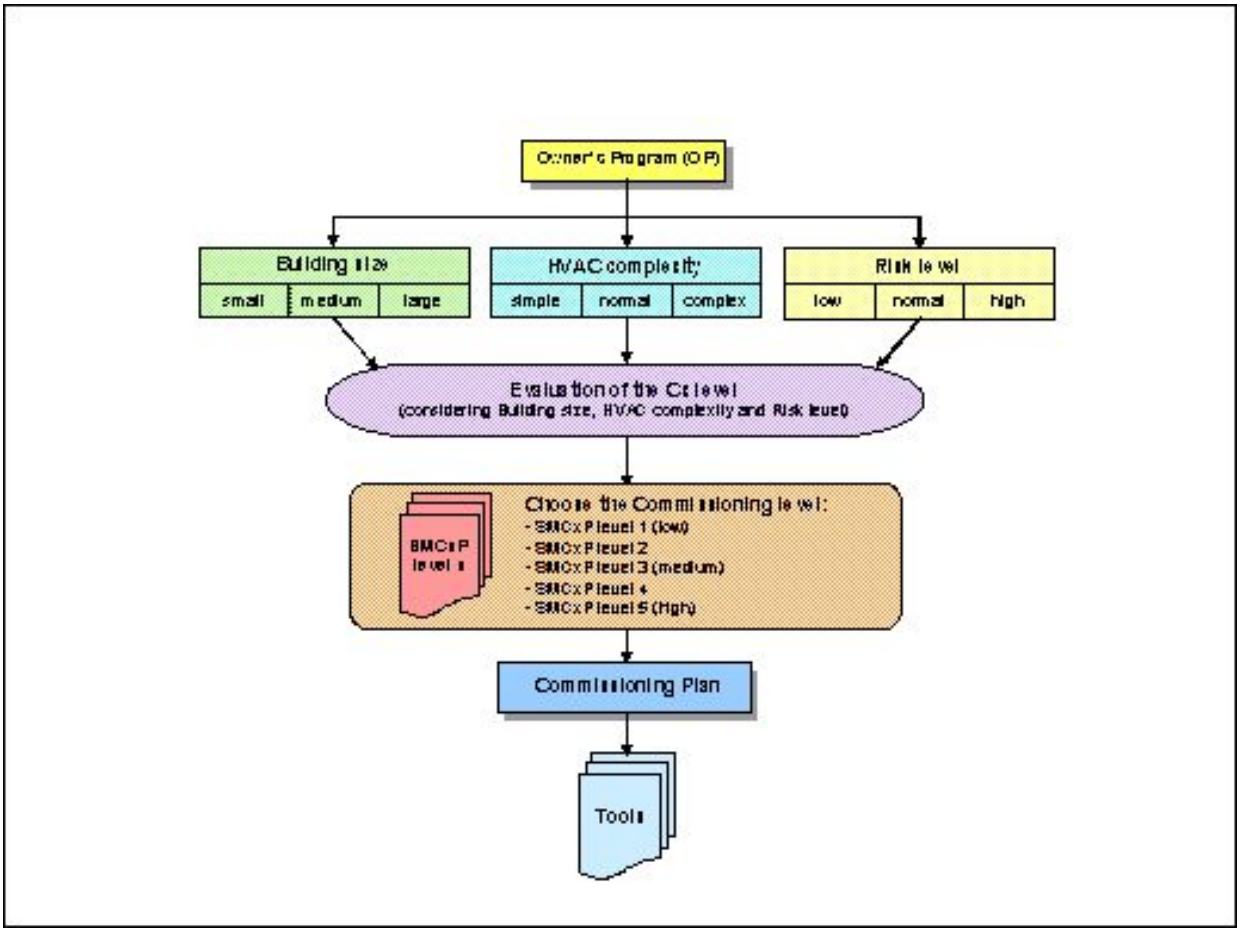


Figure 1.18 : Structure d'un modèle standard [Annexe40'2007]

2.5.1.3 La matrices de contrôle de qualité ou «Matrix for Quality Control (MQC) »

Les matrices de contrôle de qualité[11] sont développées comme des outils de vérification globale de la qualité des installations (de climatisation par exemple *[Nakahara'2004])*. Elles visent à contrôler l'ensemble du processus en prenant en considération les spécifications initiales d'une installation [Annexe40'2004] [Annexe40'2007].

[11] La qualité correspondant à l'adéquation entre les exigences initialement formulées, les performances fournies, le calendrier d'exécution, les budgets ainsi que l'ensemble des aspects techniques.

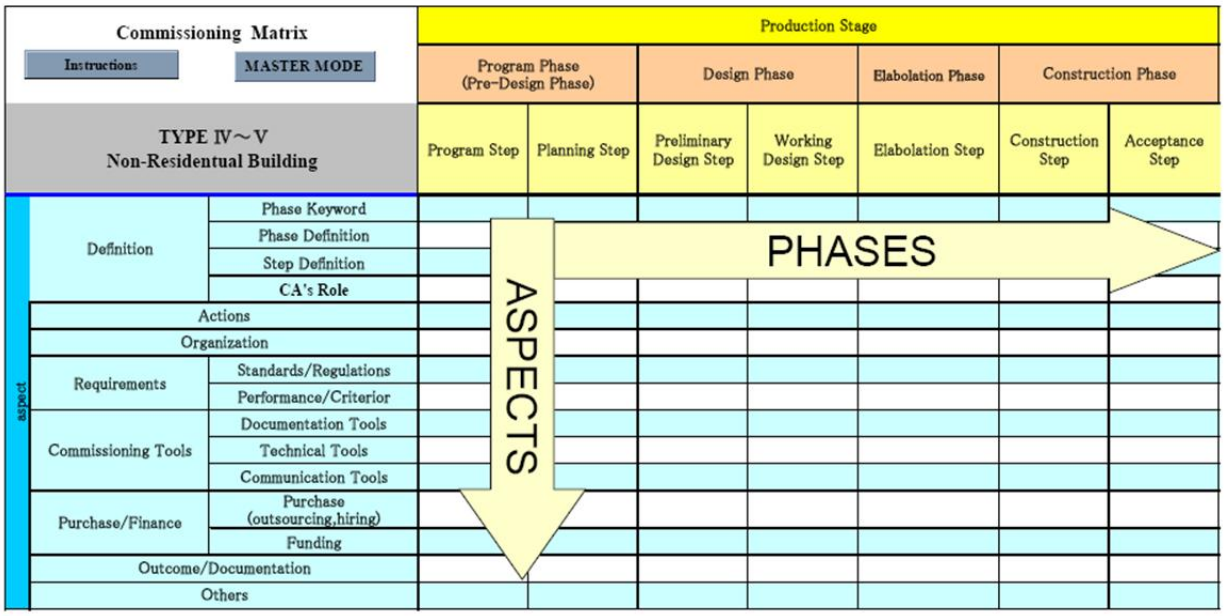


Figure 1.19: Exemple d'un outil MQC [Nakahara'2004]

La structure d'une MQC épouse toutes les phases du projet (Cf. Figure 1.19). Elle permet aux organisateurs d'une part de prendre toutes les décisions stratégiques en temps utile, et d'autre part de vérifier si le projet répond aux objectifs et si les bonnes décisions sont prises au bon moment.

Type d'outils	Avantages	Inconvénients et difficultés	Niveau de détail
Check lists	- Simple. - Ne requiert pas une formation particulière. - Indique tout ce qu'il faut faire.	- N'indique pas comment le faire. - N'inclut pas la documentation sur les résultats obtenus.	Bas
SMCxP	- Présente une liste de tâches détaillées en liaison avec chaque étape du projet.		Moyen
MQC	- Permet d'éviter les erreurs dans tous les aspects stratégiques et dans toutes les phases du projet.		Important

Tableau 3 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de chaque outil

2.5.2 OUTILS DE RÉALISATION DES TÂCHES DE COMMISSIONNEMENT

Il existe différents outils qui permettent d'évaluer les performances énergétiques d'un bâtiment avant, pendant et après sa réalisation. Ces outils sont classés en trois familles [Annexe40'2004] [Annexe40'2007] :

- les outils manuels (vérification sur chantier),
- les outils automatiques (intégrés dans la Gestion Technique du Bâtiment GTB) en phase de réalisation,
- les méthodes en phase de conception (Modèles de simulation).

Etant donné que la description d'un outil d'évaluation n'est pas l'objet de cette étude, cette section ne sera pas développée.

Le commissionnement est intégré de manière explicite ou implicite dans de nombreux labels et certifications à l'échelle nationale et internationale. La section suivante en présente quelques exemples.

2.6 LE COMMISSIONNEMENT, CERTIFICATION ET LABELS

De nombreuses procédures de vérifications existent en France et dans le monde, certaines sous le nom de commissionnement, d'autres sous le nom de contrôle et de vérification. Parmi ces procédures, les plus proches de la présente recherche sont exposées dans cette section. A l'échelle nationale, des procédures de vérification sont faites afin d'attribuer le label HPE ou la certification HQE®.

2.6.1 PROCÉDURE DE CONTRÔLE POUR LE LABEL HPE

La procédure de vérification réalisée par l'organisme délivrant le label HPE ou «Haute performance énergétique» est très proche du commissionnement. En effet, cet organisme procède à minima aux contrôles décrits dans l'annexe 1 de l'arrêté du 15 Mai 2007 [Arrêté'2007]. Ce contrôle, qui peut être assimilé à du commissionnement, se fait en deux phases : en phase étude et en phase réalisation. Cette procédure permet de vérifier le contenu du dossier de demande du label, décrit dans l'annexe 2 du même arrêté [Arrêté'2007]. Ce dossier doit contenir notamment des documents graphiques (plans, métrés, etc.), des hypothèses et des résultats de calculs (consommations conventionnelle et de référence, températures conventionnelles et de référence, etc.), des informations précises sur la version du logiciel de calcul utilisée etc…; mais aussi des informations relatives à la performance qui doit correspondre au label recherché.

En phase d'études, cette procédure de contrôle vise :

- la vérification de la recevabilité du dossier en comparant les options arrêtées dans le projet avec les critères d'attribution du label (performance thermique, matériaux, produits, ouvrages et équipements),
- la vérification par sondage, que les hypothèses et données de calcul des performances thermiques correspondent aux données du projet (performances de produits, matériaux, équipement concourant à l'isolation thermique, apport de chaleur, confort d'été, perméabilité, ventilation, chauffage, ECS, etc.),
- la vérification des incohérences en matière de confort, de durabilité et d'entretien,
- la vérification des modalités de calcul des performances thermiques (justesse des résultats présentés), avec la possibilité de demander des calculs complémentaires.

En phase de chantier, cette procédure vise :

- la vérification (par calcul) de toutes les incidences sur les performances thermiques, des modifications apportées au projet initial par l'organisme de contrôle,
- la vérification que les performances du bâtiment, des matériaux, des produits, ouvrages et équipements satisfont les critères d'attribution du label,
- la vérification in situ de l'exposition du bâtiment et les conditions d'environnement prises en compte dans les calculs,
- la vérification par sondage, de la conformité de la mise en œuvre de tout composant influant sur la performance énergétique et signalement des éléments qui présentent des caractéristiques inappropriées,
- la vérification du fonctionnement des installations HVAC (en particulier à la mise en service des installations),
- la vérifications que des corrections ont été apportées aux observations formulées lors des deux phases.

Ces procédures restent génériques et ne traitent pas les particularités d'un projet.

2.6.2 COMMISSIONNEMENT DANS LA CERTIFICATION HQE®

La certification HQE® ne comporte pas de missions de commissionnement proprement dites. Néanmoins, pour chaque cible, des tableaux d'évaluations sont décrits. Ces tableaux permettent aux autorités responsables de la remise de la certification de vérifier que les demandeurs répondent bien aux performances exigées. Deux tableaux sont décrits dans le référentiel technique de certification HQE® [Certivéa'2006] pour chacune des sous cibles de la cible gestion d'énergie par exemple :

- un tableau permettant d'évaluer la réduction de la demande énergétique par la conception architecturale (Cf. Tableau 4),
- un tableau permettant d'évaluer la réduction de la consommation d'énergie primaire et des pollutions associées.

Tableau d'évaluation

Préoccupation	Caractéristique	Critère	
		Intitulé	Niveau
4.1.1. Améliorer l'aptitude de l'enveloppe à limiter les déperditions	Coefficient Ubat calculé selon la Règlementation Thermique en vigueur ($W/m^2.K$)	Expression de la valeur absolue du coefficient Ubat $U_{bât} < U_{bât\text{-}base}$ (1)	P
4.1.2. Améliorer l'aptitude du bâtiment à réduire ses besoins énergétiques, en été comme en hiver	Besoins énergétiques du bâtiment Parti architectural (emplacement, taille, orientation et aspect général du bâtiment)	Expression de la valeur absolue des besoins énergétiques totaux, et des besoins par poste ($B_{chauffage}$, B_{froid}, $B_{éclairage}$) Justification de l'optimisation du parti architectural en fonction du contexte et des objectifs environnementaux du maître d'ouvrage (2) (3)	P

Tableau 4 : [Certivéa'2006]

Ces tableaux définissent les préoccupations et exigences de la cible à évaluer, les paramètres ou critères qui la caractérisent, ainsi que les résultats qui doivent êtres obtenus. Ces évaluations restent néanmoins, très générales et n'ont pas pour objectif d'assurer un suivi rigoureux en vue de la garantie de la performance.

Toutefois, dans le cadre de la cible 7 de la certification HQE®, la Maintenance (Pérennité des performances environnementales), un suivi et contrôle des performances pendant l'exploitation de l'ouvrage est exigé. Une méthode de suivi (qui peut être assimilée à du commissionnement) doit être présentée par le demandeur et validée par les autorités responsables dans le cas où elle comporte des dispositions dites «satisfaisantes et justifiées» [Certivéa'2006].

De nombreux labels internationaux qui visent le respect de l'environnement telles que les certifications américaine LEED® [LEED'2007] et anglaise BREEM [BREEAM'2007] et collaboratif international GBC[12] [GBC'2007] intègrent des sections dédiées au commissionnement.

2.6.3 LE COMMISSIONNEMENT DANS LA CERTIFICATION LEED®

Toujours pour revenir au domaine traité dans cette étude, dans le cadre de la version 2.2 du guide LEED® pour les constructions neuves [LEED-NC'2005], et plus particulièrement dans la section Energie et Atmosphère, une mission nommée «Commissionnement fondamental des systèmes énergétiques d'un bâtiment» est préconisée. Cette mission vise à vérifier que les systèmes énergétiques d'un bâtiment sont installés, calibrés et fonctionnent conformément aux exigences du maître d'ouvrage, cela en se basant sur les documents de la phase conception et construction. Cette section décrit les bénéfices apportés par une telle procédure en termes d'économie d'énergie ainsi que de la manière dont elle doit être réalisée. Elle définit la mission des autorités de commissionnement, les systèmes à commissionner, l'importance du choix du commissionnaire (en termes de qualification en systèmes, en planification du processus de commissionnement et de gestion de projets etc.), et les documents à fournir. Il encourage également la maîtrise d'ouvrage à introduire l'enveloppe, la gestion des eaux et autres systèmes dans ce processus. Néanmoins cela reste très générique.

2.6.4 LE COMMISSIONNEMENT DANS LA CERTIFICATION BREEAM

Le commissionnement est traité dans la certification «BREEAM Schools 2006» dans la section Management [BREEAM'2006]. Son objectif est d'assurer une performance optimale dans des conditions d'occupation (en phase d'exploitation). Deux crédits sont accordés pour cette section :

1. Le premier est accordé pour le choix approprié des membres de l'équipe désignée pour commissionner le bâtiment. Celle-ci doit avoir les compétences nécessaires au bon déroulement du commissionnement d'un projet et doit s'engager à respecter la réglementation en cours.

2. Le second est accordé dans le cas où le commissionnement saisonnier durant la première année d'occupation a été effectué (responsabilité du commissionnaire durant les 12 premiers mois d'occupation). Pour démontrer cette conformité, un ensemble d'informations est exigé. Ces informations sont référencées dans un rapport dit «d'assesseur», où sont décrites brièvement toutes les informations relatives aux deux crédits.

[12] GBC : «Green Building Challenge»

Il est à noter que le commissionnement est décrit en deux phases : une première pendant la phase conception où seulement le premier crédit relatif au choix de l'équipe de commissionnement est effectué. La seconde, en phase post-construction (réception) où l'évaluation des performances est traitée.

2.6.5 LE COMMISSIONNEMENT DANS LE COLLABORATIF INTERNATIONAL GBC

Contrairement aux labels cités précédemment, le GBC n'a pas vocation à certifier, mais vise à produire un outil d'évaluation de la performance environnementale. Le *GBTool* développé dans le cadre de ce collaboratif, est un outil qui fournit une structure d'évaluation approximative d'un large éventail de paramètres qui influeraient potentiellement sur la performance environnementale. Ces paramètres sont relatifs à une région et au mode d'occupation d'un bâtiment. Cet outil est destiné à être utilisé par différents pays du collaboratif pour créer leur propre certification [Raymond'2002]. Les sept paramètres d'évaluation définis dans la méthodologie du *GBTool* sont :

1. sélection du site, planning du projet et développement,
2. consommation des ressources énergétiques,
3. mise en place environnementale,
4. qualité environnementale intérieure,
5. fonctionnalité,
6. performance à long terme,
7. aspects sociaux et économiques).

L'évaluation se fait par phase du processus de conception [GBC'2005]. Le paramètre consommation des ressources énergétiques comporte cinq domaines d'évaluation :

1. les énergies non renouvelables,
2. l'énergie renouvelable,
3. les matériaux,
4. les pics de consommation d'électricité,
5. l'eau potable et le commissionnement des systèmes limité dans ce cas à la phase conception.

Il est à noter que dans l'ensemble des références présenté dans cette section, le commissionnement se limite aux systèmes HVAC et que les procédures ne sont pas trop développées, ce qui montre que le commissionnement, bien qu'intégré ne connaît pas au travers de ces labels l'importance qu'il mériterait.

3. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le contexte dans lequel s'inscrit ce travail, à savoir la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie. Un bref rappel de l'évolution des bâtiments environnementaux, ainsi que des principaux labels nationaux et internationaux existant aujourd'hui a été fait.

La conception de ce type de bâtiments est confrontée à des problèmes qui rendent l'atteinte des performances énergétiques exigées par la maîtrise d'ouvrage difficile. Ces problèmes sont dus à plusieurs paramètres dont la perte d'information tout au long du cycle de vie du bâtiment, et la non évaluation régulière des choix réalisés.

Il a été établi dans ce chapitre qu'un processus qualité tel que le commissionnement doit être intégré très tôt dans la conception et jusqu'à la fin de vie d'un bâtiment pour vérifier si «tout se passe bien !». Il devra permettre, d'une part, de vérifier la pertinence des choix réalisés par rapport aux objectifs à atteindre et d'autre part, la bonne circulation des informations importantes dont la perte pourrait engendrer des dérives, et empêcher d'atteindre les performances.

De nombreux travaux ont été réalisés pour développer des plans de commissionnements (appelés dans certains cas procédures d'évaluation), seulement ces travaux restent très génériques et axés sur des systèmes ou ouvrages particuliers.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse vise à assister les personnes responsables du commissionnement dans la mise en place de ce processus, de manière à ce qu'il prenne en charge le bâtiment dans sa globalité, qu'il s'étende sur l'ensemble du processus de réalisation et des secteurs du bâtiment, et qu'il gère les bâtiments neufs comme existants. Cette recherche n'intervient pas sur les aspects techniques des bâtiments performants, mais sur son processus de réalisation.

Le chapitre suivant a pour objectif de valider l'hypothèse posée au travers d'une enquête et dans le cadre de cas réels de bâtiments à faible consommation d'énergie que nous avons observés et analysés.

CHAPITRE 2

REALITÉ DU TERRAIN ET METHODOLOGIE

Ce chapitre a pour objet de vérifier sur le terrain l'intérêt de l'intégration du commissionnement dans la genèse d'un projet de conception de bâtiments à faible consommation d'énergie et de donner à ce travail de recherche un caractère plus pratique.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la validation des conclusions faites dans le premier chapitre. Elle présente d'une part, le questionnaire élaboré pour la réalisation d'une enquête auprès des principaux acteurs du secteur du bâtiment afin de recenser et d'analyser leurs besoins, les difficultés qu'ils rencontrent et les outils et les méthodes qu'ils utilisent pour réaliser leurs tâches. Elle décrit d'autre part, deux cas réels de conception et de réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie.

La deuxième partie, présente tout d'abord la méthodologie globale proposée pour répondre aux difficultés et aux besoins recensés au cours de cette confrontation avec la réalité du terrain. Puis, un cahier des charges qui décrit la boite à outils mettant en application cette méthodologie globale est exposé.

1. ÉTUDE DE LA RÉALITÉ «IN SITU» DES BÂTIMENTS PERFORMANTS

1.1 IDENTIFICATION DES DIFFICULTÉS ET DES BESOINS DES ACTEURS

Deux enquêtes ont été réalisées sur le sujet du commissionnement par le CSTB auprès des différents acteurs du bâtiment. Une première enquête faite par Vaezi Nejad et Jandon [Vaezi'2002] est axée sur l'identification des difficultés et besoins dans le domaine du commissionnement des systèmes de Gestion Technique du Bâtiment (GTB). La seconde réalisée dans le cadre de cette thèse, est axée sur l'impact du commissionnement sur la qualité de ces bâtiments à faible consommation d'énergie tout au long du processus de réalisation.

L'enquête réalisée dans le cadre de ce travail a concerné un échantillon englobant un grand nombre d'acteurs participant à un projet de bâtiment courant voire performant énergétiquement. Elle a permis d'une part, d'identifier les problèmes que rencontrent les différents acteurs du bâtiment en France et leurs attentes en termes d'outils et de procédures ; d'autre part, d'évaluer leur connaissance du commissionnement ainsi que leur avis sur son intégration, tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Cette étude a concerné le secteur tertiaire à la fois pour les constructions neuves et existantes. Elle a abordé les bâtiments courants puis basse consommation d'énergie tout au long de leur cycle de vie.

1.1.1 RECENSEMENT DES ACTEURS CONCERNÉS

Un échantillon d'une douzaine d'intervenants dans le domaine du bâtiment, depuis le maître d'ouvrage jusqu'à l'exploitant, a été sélectionné pour prendre connaissance de leurs points de vue, suivant leurs missions dans la réalisation et le commissionnement des bâtiments. Cet échantillon a été sélectionné essentiellement parmi les intervenants du groupe Reflet français participant aux réunions de concertation de l'Annexe 40 et 47 de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) [GroupeReflet'2006] [Annexe40'2007] [Annexe47'2007], ainsi que parmi des participants à des projets innovants tel que le projet «Génération E» (Cf. § 2-1.2.1). Parmi ces intervenants :

- Maîtrise d'ouvrage (MO) : Logirep, EDF, CSTB, ACCOR
- Assistance à Maîtrise d'ouvrage (MAO) : L'UCCANSS
- Maîtrise d'œuvre (MoE) : Albin Puig
- Bureaux d'étude (BE) : AB Consultant, Pouget, SETEC Bâtiment
- Exploitant : ACCOR
- Contrôleur technique : APAVE
- Constructeur de bâtiment : GBR construction

1.1.2 MISE EN PLACE D'UN QUESTIONNAIRE

Un guide d'entretien qui a pris la forme d'un questionnaire a servi de fil directeur aux interviews réalisées avec les acteurs retenus. Il a également été utilisé comme support pour préparer la synthèse de cette enquête. La structure retenue pour le questionnaire est la suivante :

- identité de l'acteur,
- recensement du point de vue général des acteurs (sur le commissionnement, le processus de conception des bâtiments à faible consommation d'énergie etc.),
- recensement des informations liées au projet et ses consommations d'énergie (prise en charge, solutions préconisées erreurs etc.),
- recensement des attentes et des besoins en méthodes et outils de Commissionnement,
- difficultés rencontrées lors des procédures d'évaluations,
- contraintes (réglementaires, techniques, organisationnelles, etc.),
- suggestions.

La trame de ce guide d'entretien est présentée dans l'Annexe 2.

1.1.3 RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE

L'analyse et la synthèse des résultats de cette enquête se sont faites en quatre étapes. La première étape a servi à identifier les différentes phases et domaines dans lesquels les différents acteurs interviennent (Cf. Figure 2. 1).

La seconde étape a permis de recenser les différentes manières d'aborder la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie par les acteurs suivant leur corps de métier. Cette étape met en évidence les difficultés rencontrées, ainsi que leurs causes et éventuellement les solutions préconisées.

La troisième étape synthétise les aspects qui motivent les acteurs quant à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, et leurs attentes en terme d'outils et de méthodes de commissionnement pour pallier les difficultés qu'ils rencontrent, et atteindre les performances souhaitées.

Enfin, une dernière étape a été d'évaluer la connaissance qu'ont les différents acteurs du commissionnement, ainsi que l'intérêt qu'ils lui portent et la manière dont ils imaginent son intégration tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Les difficultés et besoins ont été répartis en 6 groupes :

- Techniques
- Organisationnelles
- Réglementaires
- Économiques
- Sociales
- Juridiques

Phase du projet		Mo		AMO	BE			MoE	
		EDF	Accor	Uccanss	SETEC Bt	SOLENE	Pouget	CSTB (GP)	Logirep
planning/programmation	Conception	X	X						X
	Cx	X	X	X					X
Esquisse / AP / Pro	Conception		X		X	X	X	X	X
	Cx	X	X	X	X	X	X		
ACT	Conception		X		X	X	X		X
	Cx	X	X	X	X	X	X		
EXE	Conception		X		X	X	X	X	X
	Cx	X	X	X	X	X	X		
Réalisation	Conception		X		X	X	X		X
	Cx	X	X		X	X	X		
Exploitation	Conception		rénovation						
	Cx	X	X						

Figure 2. 1 : Identification des phases d'intervention des différents acteurs

Cette enquête a permis de conforter les conclusions faites dans l'état de l'art avec la réalité du terrain. Les difficultés récurrentes énumérées par les différents acteurs suite aux entretiens sont dues à la mauvaise circulation de l'information des échanges entre les différents corps d'état lors de la remise de dossiers de clôture des étapes le plus souvent, incomplets ; ou dues à des programmes incomplets, qui ne décrivent pas dans le détail la volonté du maître d'ouvrage ou qui sont modifiés au cours de la phase de conception.

D'autres difficultés souvent citées sont liées à la mauvaise gestion des imprévus ; la non évaluation systématique des compromis faits dans le cas de changements improvisés ; le décalage existant entre les utilisateurs, les gestionnaires et les maîtres d'ouvrage et aux problèmes liés au dépassement de budget, de délais etc.

S'ajoute à cela une contrainte supplémentaire liée aux exigences de plus en plus croissantes des maîtres d'ouvrage et la complexité inhérente aux bâtiments innovants. Toutes ces difficultés rendent l'atteinte de performances prévues très difficile voire souvent impossible.

En ce qui concerne le commissionnement, suivant leurs objectifs, les acteurs ont réagi différemment. Les maîtres d'ouvrage par exemple ont mis l'accent sur le surcoût important qu'il engendre, les maîtres d'œuvre ont été sceptiques quant à l'intégration de contrôles supplémentaires jugés excessifs, et les contrôleurs techniques et les assistants à maîtrise d'ouvrage étaient favorables, voire intéressés par son intégration dans leur mission.

Cette recherche se concentre sur la perte d'informations, la gestion des imprévus et l'évaluation des choix réalisés tout au long du processus de conception. Pour conforter ces constats une étude de cas réels a été faite.

1.2 ÉTUDE DE CAS RÉELS

Deux cas de bâtiments à faible consommation d'énergie ont été étudiés dans le cadre de cette thèse. Le premier est un cas de réhabilitation d'une ancienne maison à Fontenay Sous Bois, en région parisienne, en logements sociaux et le deuxième est un bâtiment neuf de l'université de la Réunion (Ile de La Réunion) en phase de conception.

L'objectif de ces études est double : 1) Valider l'hypothèse de la nécessité d'intégrer le commissionnement tout au long du cycle de vie du bâtiment ; et 2) Capitaliser ces deux expériences en étudiant les difficultés rencontrées dans ces projets et en recensant l'ensemble des points importants qui nécessitent une attention particulière. Pour ce faire, des réunions et enquêtes avec et auprès des acteurs ont été organisées dans le cadre de chaque projet.

Le choix de ces cas d'expérimentation répond à différents critères :

1) ils proposent des solutions différentes pour atteindre une haute performance énergétique (une enveloppe super isolée pour le premier cas et une solution bioclimatique plus simple pour le second). Les solutions choisies dépendent des possibilités et contraintes de chaque projet, de leur environnement et du cadre réglementaire dans lequel ils s'inscrivent,

2) ils sont observés dans deux phases différentes du processus de réalisation : un cas en phase d'étude et un second en phase de construction. Cela permet de constater les problèmes inhérent à chaque phase et de retrouver la relation et l'influence que ces phases peuvent avoir les unes sur les autres, telles que l'influence de la qualité de la conception sur la réalisation ou les contraintes de réalisation sur la phase de conception.

3) la différence de l'approche par laquelle ont été abordés les deux projets, une approche structurée et contrôlée suivant une note de cadrage sur les bâtiments à faible consommation d'énergie, et une seconde moins bien maîtrisée.

1.2.1 CAS 1 : FONTENAY SOUS BOIS

Le projet de Fontenay Sous Bois est un projet de rénovation et de modernisation d'une ancienne demeure en logement sociaux. Ce projet est classé parmi les bâtiments basse consommation d'énergie. Les partenaires associés à ce projet sont des pionniers dans la rénovation de logements sociaux : Logirep, BASF et le CSTB.

Figure 2. 2 : Fontenay sous bois - État existant

Figure 2. 3 : Fontenay sous bois - État projeté

L'objectif du projet est d'utiliser des solutions innovantes pour réduire la consommation énergétique du bâtiment et son émission de gaz à effet de serre. L'aspect architectural du bâtiment et les caractéristiques économiques et sociologiques des logements proposés devaient être respectés.

Les trois partenaires du projet ont mis en œuvre le concept de bâtiment «Génération E», E comme : Environnement, Énergie, Économie et Équilibre. Ce bâtiment se voulait «facteur 8», c'est-à-dire que ces consommations d'énergie (chauffage et ventilation) devaient être divisées par 8 et passer de 400 kWh/m².an à 50 kWh/m².an. Le projet est soumis notamment à quatre contraintes :

- un haut niveau de performance,
- une complexité technologique importante,
- une contrainte liée au fait que le bâtiment soit classé, donc soumis à l'approbation de l'architecte des «Bâtiments de France»,
- un bâtiment pilote (1ere expérimentation du genre en France).

Les solutions techniques choisies pour réaliser ce projet sont : une enveloppe performante comprenant une isolation par l'extérieur et intégrant des matériaux à changement de phase, une chaudière à condensation, un plancher chauffant basse température, une ventilation double flux [Jandon'2006] (Cf. Figure 2. 2 et Figure 2. 3).

Le CSTB a intégré ce projet dans le cadre du projet de recherche BEPOS [Chlela'2006]. L'intervention du CSTB dans cette opération se décline sous quatre formes :

1. l'amélioration du processus de réalisation, en mettant en place un processus de commissionnement,
2. l'évaluation de matériaux innovants (ex : isolation extérieure),
3. la vérification des performances par la mise en place d'un outil de commissionnement continu intégré à la GTB,
4. le diagnostic sociologique par l'interview de locataires au sujet du confort thermique durant les périodes d'été et d'hiver.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la première tâche. Cette mission vise à observer le déroulement de la phase construction, à recenser les difficultés rencontrées, leurs causes et leur impact éventuel sur la performance énergétique.

1.2.2 CAS 2 : UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

L'université de la Réunion a mis en place depuis ces 5 dernières années une politique de maîtrise de l'énergie (MDE) et de développement des énergies renouvelables. La méthodologie MDE a été utilisée dans le cadre de l'extension de l'université de la Réunion. Cette extension est constituée de quatre petits bâtiments parallèles orientés Nord/Sud (Cf. Figure 2. 4 et Figure 2. 5) [Garde'2006]. Ce projet vise à diviser les consommations d'énergie par 4. Il avait pour objectif d'obtenir un confort visuel et thermique en utilisant des solutions passives et simples. La climatisation ainsi que l'éclairage artificiel doivent êtres très peu utilisés. Quatre critères ont été pris en compte pour atteindre ces objectifs :

- l'environnement immédiat du bâtiment,
- la conception bioclimatique,
- les systèmes et équipements techniques performants,
- le contrôle et la mesure de l'énergie.

Figure 2. 4 : Volumétrie générale du projet de l'extension de l'université de la Réunion

Figure 2. 5 : Vue d'une des façades du projet de l'extension de l'université de la Réunion

Ces critères, spécifiés dans une note MDE, sont intégrés plus en détail dans le programme, ce qui permet à la maîtrise d'ouvrage de définir de manière claire ses exigences par rapport aux principes de contrôle de l'énergie. Cette note qui reprend les principes de base de la conception des bâtiments et des systèmes de production associés, s'appuie sur le guide «climatiser dans les DOM» édité par EDF, sur le document de référence ECODOM [Garde'2005] et sur le document PERENE[13], obligatoire pour la construction des bâtiments universitaires [Garde'2006].

Pour atteindre les performances escomptées ainsi que le confort souhaité, PERENE propose de réduire les besoins en énergie, dans un premier temps, en travaillant sur l'enveloppe et d'utiliser des systèmes efficaces afin de produire et de gérer l'énergie. Ces solutions sont classées dans quatre sections [Garde'2005] :

- la position sur le site (végétations …),
- la conception de l'enveloppe (aspect thermique),
- le traitement d'air,
- la production de l'énergie.

PERENE impose la mise en place de simulations dynamiques des besoins de refroidissement (naturel ou mécanique) à des périodes définies dans la note, afin de s'assurer du bon choix des solutions apportées.

[13] PEREN: PERformance ENErgétique du bâtiment : outil d'aide à la conception mis au point par la DDE Réunion.

1.2.3 ANALYSE ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE CAS

Suite à la participation aux réunions de chantiers pour le cas de Fontenay Sous Bois, et aux entretiens réalisés avec le maître d'œuvre du projet de La Réunion, plusieurs constats ont été faits. Ceux traités dans le cadre de la présente recherche sont liés à la perte fréquente d'informations et au manque de réévaluation de changements imprévus.

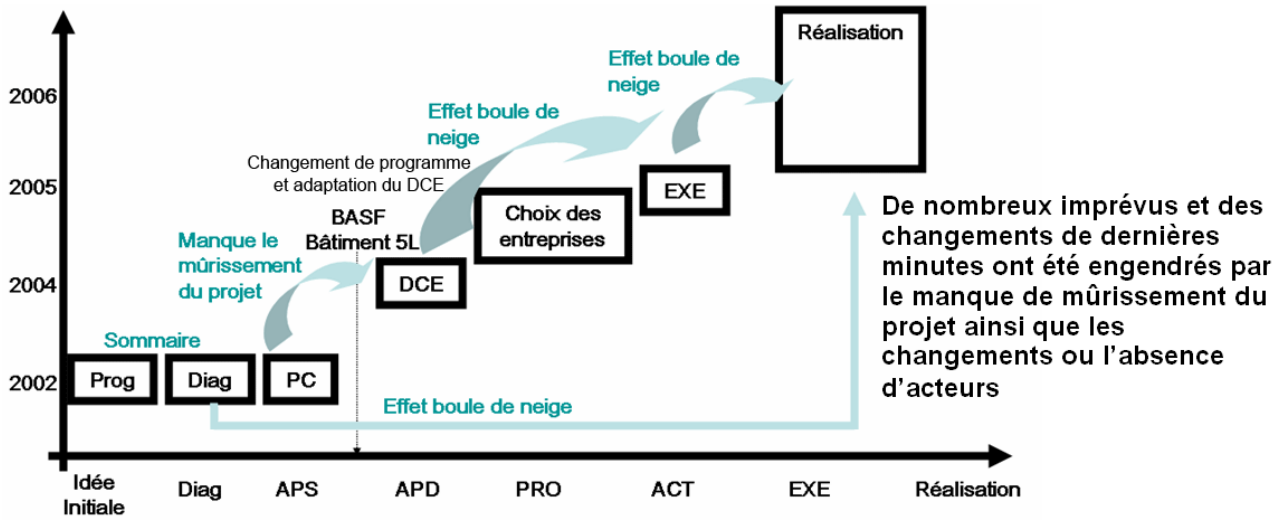


Figure 2.6. Illustration de l'évolution du processus de réalisation du projet Fontenay Sous Bois. Incidence des manquements observés en phase de conception sur la phase de réalisation

Dans le cadre du projet de réhabilitation de Fontenay sous Bois, un manque d'informations (détails significatifs et informations importantes dans le programme [Jandon'2006]) a été constaté lors de la consultation des dossiers du projet (programme, permis de construire, DCE). Ces manques ont eu certaines conséquences sur le déroulement du projet. Parmi ces conséquences, les multiples changements dans le programme et la multiplication des approximations durant toutes les phases de conception (Cf. Figure 2.6). A cela s'ajoutent les changements d'acteurs représentés dans la Figure 2. 7.

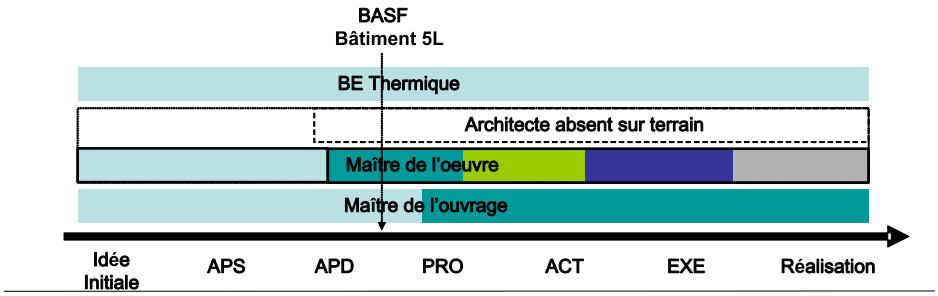


Figure 2. 7. Le jeux d'acteurs durant les phases études et construction

Cet état de fait a engendré des prises de décisions improvisées et des changements sur le chantier dont l'impact sur la performance, sur les délais et le budget n'a pas toujours été évalué. Ces changement ont plusieurs causes : 1) un audit et un diagnostique incomplet qui ont fait apparaître en phase construction la mauvaise qualité du bâtiment, qui s'est traduite par un planchers bois qui a du être changé par une dalle en béton dont l'inertie est très différente du premier, le traitement des cloisons intérieures contenant du plomb, le renforcement des murs extérieurs, et le changement de l'escalier. Ces opérations auraient nécessité de vérifier leur influence sur la performance énergétique et le confort d'été et d'hiver, 2) un manque de rigueur qui a engendré le changement des portes après commande, dû à une négligence vis-à-vis de la réglementation en vigueur et à un manque de contrôle, ce qui a eu des répercussions sur la position et la taille des gaines techniques. Ces dernières ont également posé des problèmes lors de la réalisation du projet du fait de l'absence de plans spécifiant l'encombrement des gaines de ventilation qui devaient y passer. D'autres manques ont été constatés, tels que la non prise en compte des ponts thermiques dans l'étude thermique et des problèmes de mise en œuvre [Jandon'2006] (Cf. Figure 2.8 et Figure 2.9) et les changements d'acteurs qui n'ont pas été accompagnés d'une passation de consignes en bonne et due forme, etc.

Figure 2.8 : L'isolant entre les plaques de BA-13 n'a pas été posé correctement (risque de déperditions élevées)

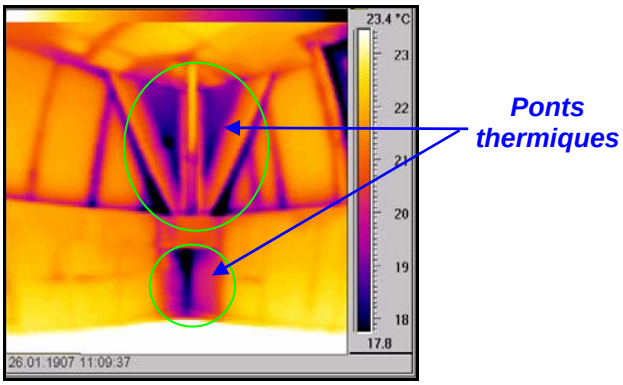


Figure 2.9 : L'image infra rouge illustre les pertes de chaleur au niveau de l'isolant mal placé

Ces problèmes ne sont pas exclusifs à ce projet mais sont présents dans de nombreux cas de réalisations. Néanmoins, il est impossible, sauf en cas de désastre avec la possibilité de faire intervenir les assurances, d'arrêter un chantier en cours de travaux pour résoudre tous les problèmes qu'il rencontre. C'est pour cela qu'il est important d'intégrer des points de rappels très tôt lors de la conception d'un bâtiment pour éviter aux acteurs du bâtiment de se retrouver dans des situations où, en cours de construction par exemple, des solutions d'urgence prises à la hâte prennent le dessus sur une réflexion mûrie.

Ces constats ont appuyé la première hypothèse qui met en avant la nécessité de mettre en place un processus d'assurance qualité tel que le commissionnement, qui viendrait par un contrôle régulier, éviter ce genre de situations et gérer les imprévus et minimiser leurs conséquences sur la performance énergétique. En plus de valider cette hypothèse, ce cas a montré que ce commissionnement ne peut être figé et simplement prédéfini au départ d'un projet mais qu'il doit être évolutif pour pouvoir prendre en charge tous les imprévus rencontrés dans la vie d'un bâtiment.

Cette recherche s'est donc orientée vers l'assistance à la définition d'un plan de commissionnement évolutif qui s'adapte aux changements rencontrés au cours de la réalisation d'un projet. Cette assistance doit permettre de faire évoluer le plan de commissionnement afin de lui permettre de gérer les particularités d'un projet et les imprévus d'un processus vivant.

L'intérêt du deuxième cas (Extension de l'Université de la Réunion) est l'intégration de la note MDE [Garde'2005] dès la phase de programme en vu de structurer et contrôler le processus de conception du bâtiment. Ce rapport qui inclut d'une part toutes les performances et spécifications du projet ainsi que les réglementations, liste d'autre part l'ensemble des documents graphiques et rapports à fournir pour chaque phase (par exemple : les études techniques telles que l'étude thermique, les études financière, etc.). Ce projet n'ayant pas été réalisé, durant le temps imparti à cette thèse, les résultats de sa construction et de son exploitation ne sont pas connus.

Cette approche peut être perçue sous deux angles : le premier est qu'elle rend très claire la mission de la maîtrise d'œuvre et facilite la mission de commissionnement en définissant l'essentiel des spécifications qui sont attendues, et donc les grandes lignes de ce qui doit être vérifié tout au long de la phase conception. Ceci devrait minimiser les improvisations et limiter les dérives lors de la phase de conception. D'un autre coté, la MDE peut être vécu comme une contrainte très importante pour la Maîtrise d'œuvre qui se voit limitée considérablement dans ses choix de conception. Il est donc important de trouver un compromis entre sécurité et obligations ou contraintes. Ceci conforte l'idée de commissionnement évolutif, qui permet de baliser le processus tout en laissant une marge de liberté au maître d'œuvre.

Par ailleurs, l'étude de cas réel a permis d'identifier les points critiques du cycle de vie du bâtiment, de retrouver et de valider les tâches de commissionnement qui doivent y être intégrées, et ainsi par la capitalisation de ces expériences d'aider dans à la définition de l'outil (voir les chapitres suivants).

1.2.4 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DES DEUX CAS D'ÉTUDE

L'étude de ces deux cas a permis la mise en place et la validation d'une hypothèse en vue de l'amélioration du processus de conception. En effet, la participation au projet de réalisation de Fontenay sous Bois a mis en évidence le fait qu'un commissionnement fixé à l'avance ne serait pas suffisant pour prendre en compte l'ensemble des imprévus qu'il est possible de rencontrer dans le cadre du processus de conception. Le projet d'extension de l'Université de la Réunion a également conforté cette vision mais par rapport à un second aspect. Le fait de baliser un chemin par trop de contraintes et de vérifications limite considérablement le champ d'action du concepteur. Un commissionnement évolutif, qui viendrait s'adapter à l'évolution du projet, lui laisserait une marge de liberté «contrôlée».

D'autre part, l'étude de ces cas a permis d'identifier de nombreux points critiques du processus de conception, qui nécessitent une vérification, permettant ainsi de définir les tâches de commissionnement à réaliser à des phases clés du processus de conception. Ce retour d'expérience a facilité l'implémentation de l'outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement, dont fait objet cette recherche. Il a également permis de le valider au fur et à mesure de son élaboration en faisant référence à ce qui a été observé in situ (Cf. Figure 2.10).

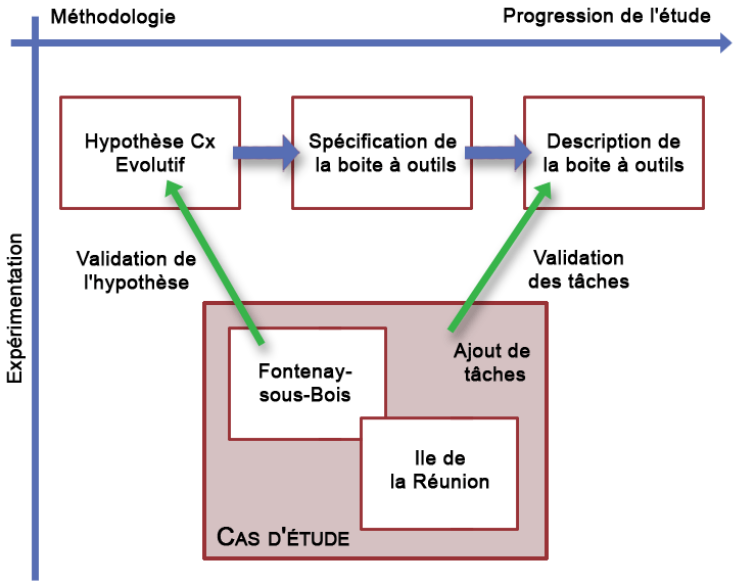


Figure 2.10. Illustration de l'apport des cas d'études dans le cadre de cette recherche

Pour surmonter les difficultés et minimiser les dérives rencontrées lors de la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, il est donc nécessaire d'adopter une approche «globale de conception» qui inclut le commissionnement comme processus «d'assurance de qualité» tout au long du cycle de vie du bâtiment.

2. UNE METHODOLOGIE GLOBALE D'ASSISTANCE À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Un bâtiment à faible consommation d'énergie est traité dans cette étude comme un système composé de sous systèmes (enveloppe, système de rafraîchissement, de chauffage etc.) dont la technicité est de plus en plus avancée. Afin de garantir sa qualité, il est nécessaire d'assurer à la fois un choix de solutions performantes, et une gestion efficace de l'information et cela par un commissionnement performant (Cf. Figure 2. 11).

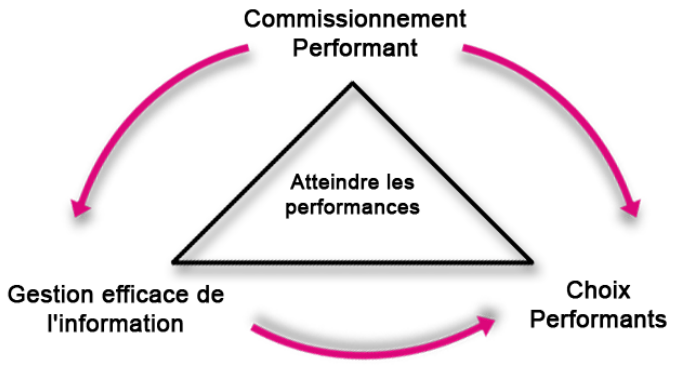


Figure 2. 11 : Trois ingrédients pour un processus de conception performant

La maîtrise d'œuvre manque cruellement d'outils intégrés à son processus de décision qui permettent à la fois :

1. De faire des évaluations régulières du processus de conception, pour s'assurer qu'il respecte les règles de l'art et garantit une gestion efficace de la circulation de l'information.

2. De faire des diagnostics rapides et en temps réel des décisions prises, et de fournir des conseils techniques toujours en temps réel, sur les différentes variantes de conception, afin d'éviter des erreurs souvent difficiles et onéreuses à corriger par la suite.

3. D'optimiser ces variantes, en aidant au choix de solutions «raisonnables» dans un contexte de coût, de confort, et de performance.

Pour répondre à ces besoins deux étapes ont été suivies: 1) une approche globale de conception des bâtiments à faible consommation d'énergie a été développée, 2) une réflexion sur des outils pour mettre en pratique cette approche a été faite. La section suivante présente quelques travaux qui se rapprochent de cette problématique.

2.1 TRAVAUX INTÉGRANT LE COMMISSIONNEMENT DANS LE CYCLE DE VIE DU BÂTIMENT

De nombreux travaux ont été réalisés en vue d'intégrer l'évaluation ou le commissionnement dans le processus de conception des bâtiments et accroître leur performance énergétique [Rossi'2003] [Castro'2003] [Piette'2001] [Hauglustaine2001-a] [Akin'2004] [Turkaslan'2006]. Bien que pertinents, ces travaux connaissent néanmoins des limites souvent induites par leur domaine d'application ou leurs objectifs propres.

Les travaux réalisés par [Rossi'2003] visent à créer des outils de commissionnement pour des équipements spécifiques qui permettent par exemple de mesurer le volume de ventilation. Ces outils ont pour objectif de vérifier les performances d'un équipement par rapport à son propre fonctionnement et ne tiennent pas compte du fonctionnement global du bâtiment. Ces travaux très spécifiques ne sont exploitables qu'en phase de test et au moment de la réception.

D'autres types de recherches telles que celles de [Castro'2003] [Piette'2001] mettent en place des outils de commissionnement qui permettent d'analyser des informations obtenues grâce à des capteurs implantés dans le bâtiment. Les systèmes sont donc évalués lors de leur utilisation en tenant compte de tous les aspects du bâtiment (occupation, caractéristiques physiques du bâtiment, systèmes, etc.). Il est ainsi possible de détecter les dérives telles qu'un dysfonctionnement et un manque de performance. Bien que prenant en compte l'ensemble des sous-systèmes du bâtiment, ces outils ne sont applicables qu'en phase d'exploitation et sont utilisés essentiellement dans le cadre de l'évaluation des systèmes HVAC et difficiles à étendre à l'échelle du bâtiment.

Au sein du laboratoire LEMA de l'université de Liège [Hauglustaine2001-a] [Hauglustaine2001-b] [Hauglustaine2000], un outil d'aide à la conception de l'enveloppe d'un bâtiment destiné à la phase d'esquisse a été développé. Cet outil plus proche de la problématique traitée dans cette thèse permet d'évaluer les performances énergétiques d'un bâtiment au fur et à mesure de son esquisse. Il tient compte des aspects multi-acteurs et multicritères liés au processus de conception. Il prend en compte l'ensemble du bâtiment comme système global. L'intérêt de ce travail est qu'il intègre de manière systématique l'évaluation des choix réalisés, qui peuvent être validés ou pas suivant leur impact sur les performances souhaitées (Cf. Figure 2.12). Bien que n'ayant pas le titre de commissionnement, cette opération peut être considérée comme telle, à la différence que dans ce cas, c'est la même personne qui décide et évalue son choix. Cet outil intervient dans les trois étapes suivantes (Cf. Figure 2.12) :

1. la première étape de définition des contraintes (budget, site, environnement, réglementations, d'énergie, etc.) ainsi que des besoins,

2. la seconde étape d'étude de faisabilité, qui permet de vérifier l'existence d'au moins un scénario faisable et acceptable,
3. la troisième étape d'esquisse proprement dite qui connaît des évaluations et des améliorations régulières afin de répondre au mieux aux aspirations de la maîtrise d'œuvre et d'ouvrage.

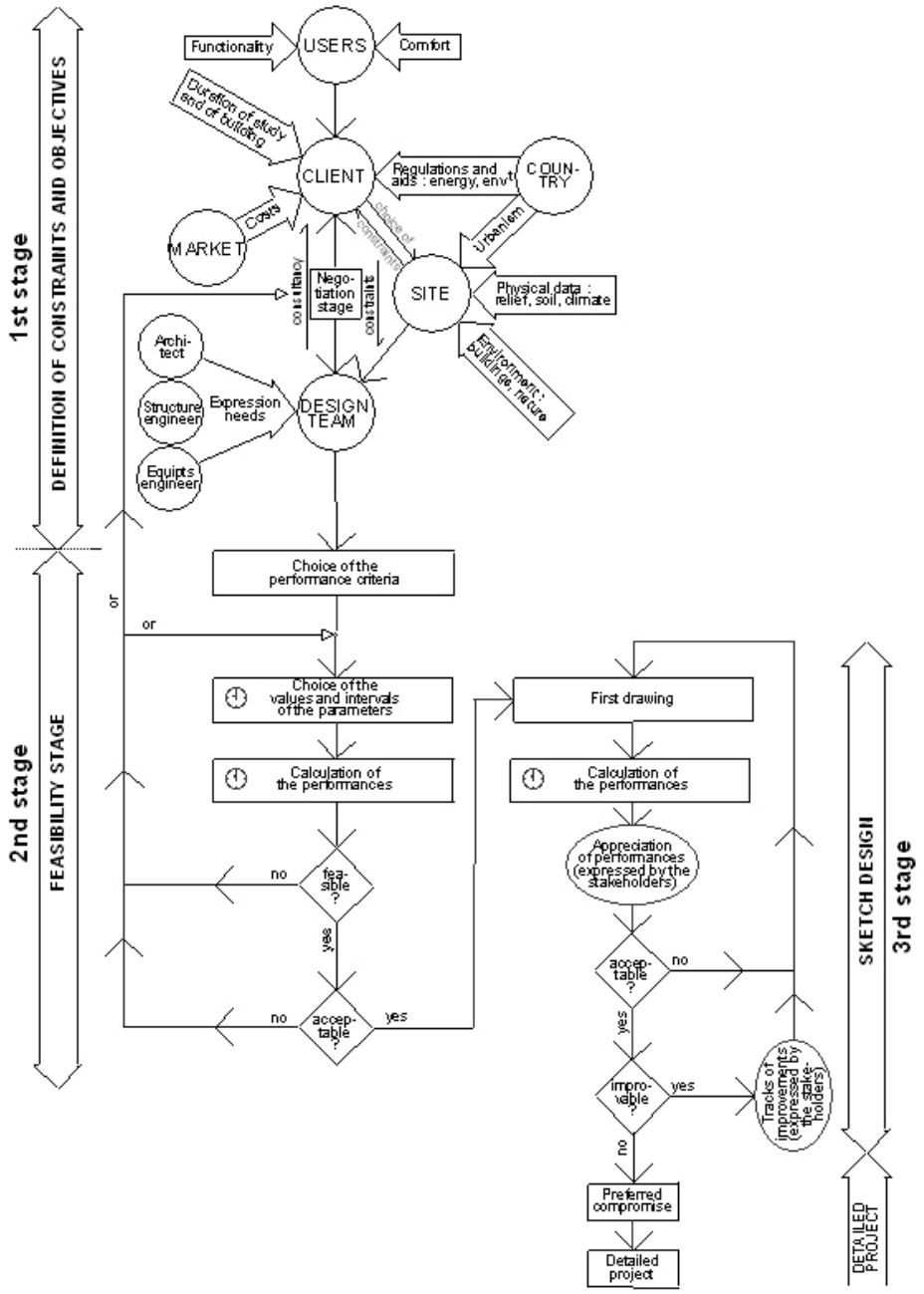


Figure 2.12 : Organisation des premières phases d'un projet d'architecture [Hauglustaine'2001-a]

La représentation de la troisième étape de l'organisation décrite dans la Figure 2.12 avec un diagramme IDEF0[14] [IDEF'2005] permet de mettre en évidence les points clés lors desquels le commissionnaire peut intervenir au cours de la phase esquisse (Cf. Figure 2.13). Un élargissement de cette approche sur l'ensemble du processus de conception du bâtiment serait fort intéressant.

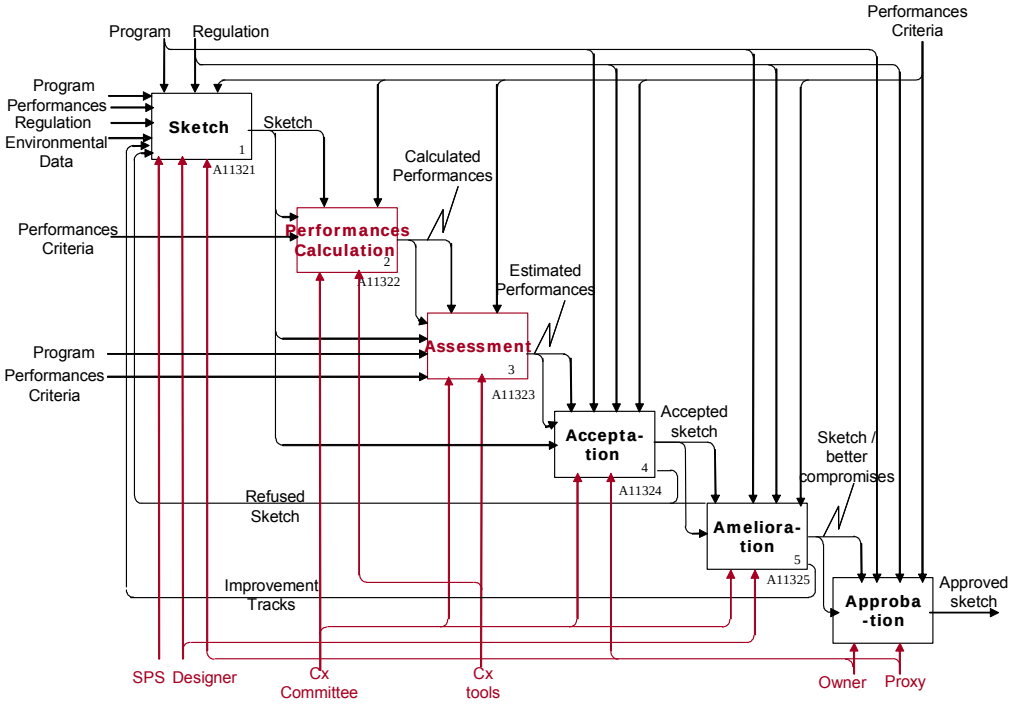


Figure 2.13 : Représentation sous IDEF0 du flux d'information à travers la phase esquisse décrit par Hauglustain

Une quatrième approche développée dans le cadre de travaux de recherche réalisés à l'école d'architecture de l'université Carnegie Mellon à Pittsburgh (USA), vise à intégrer le processus de commissionnement tout au long du cycle de vie du bâtiment [Akin'2003] [Akin'2004] [Turkaslan'2006] (Cf. Figure 2.14). Cette recherche a mis en place un modèle prédéfini représentant un processus de commissionnement intégré au processus de conception des systèmes HVAC qui décrit l'ensemble des tâches de commissionnement à réaliser à chaque moment clé du processus. Toujours dans le cadre de cette étude, un deuxième modèle décrivant l'ensemble des informations (liées au système HVAC) qui circulent à travers le premier modèle du processus de commissionnement intégré (Cf. Figure 2.14) a été développé. Pour standardiser leur modèle, afin de le rendre exploitable par l'ensemble des acteurs du bâtiment, cette équipe a adopté les IFC (*Industry Foundation Classes*) [IFC'2005]. Cette approche répond partiellement à la problématique de cette recherche. Elle se limite cependant, à l'évaluation d'un sous-système (HVAC), et décrit un processus figé (adapté à ce type de systèmes) qui ne tient pas compte des imprévus rencontrés dans le domaine du bâtiment.

[14] IDEF0 est une méthode permettant de modéliser un processus de décisions, d'actions ou autre, ainsi que la circulation d'informations dans un tel processus

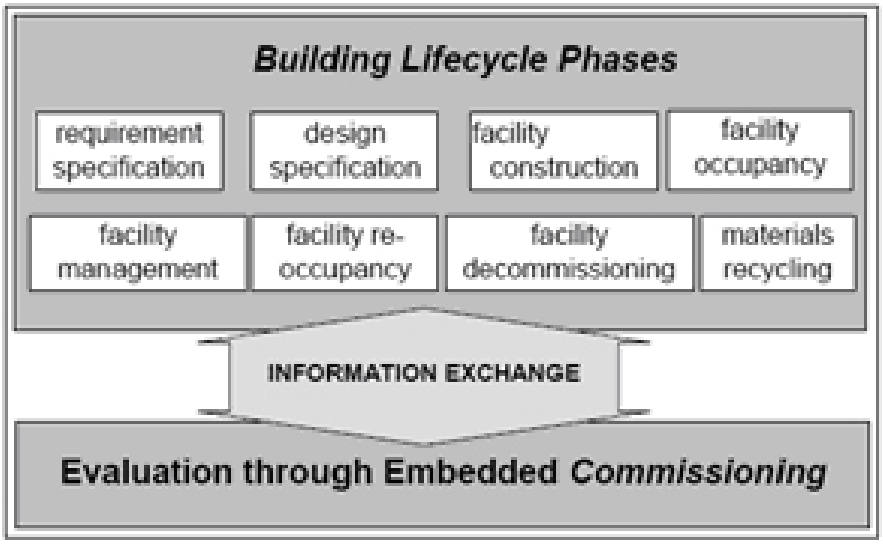


Figure 2.14 : Représentation d'un modèle pour un commissionnement intégré [Akin'2004]

Une méthodologie pour la maîtrise de l'énergie a été développée pour la zone climatique tropicale (l'Ile de la Réunion) [Garde'2006]. Cette méthodologie utilisée dans la conception de l'extension de l'Université de La Réunion (Cf. § 2-1.2.2), vise à atteindre les conditions de confort thermique et visuel par des solutions passives. Pour se faire, un outil d'aide à la décision «PERENE» (PERformance ENErgétique du bâtiment) [Garde'2005] a été développé. Il décrit l'ensemble des critères influx sur la performance énergétique d'un bâtiment (l'environnement autour du bâtiment, la conception thermique et aéraulique, les systèmes et équipements techniques, la maîtrise et le suivi de l'énergie) et qui sont énoncés dans une note MDE [MDE'2005] et intégrés dans le programme de construction du bâtiment. Cette note vise à expliciter les principes majeurs de maîtrise de l'énergie qui doivent être pris en compte par le concepteur pour réaliser des projets de bâtiments dans un climat tropical (conception thermique de l'enveloppe, traitement d'air, production d'énergie, gestion d'énergie et documents à présenter pour chaque phase d'avancement du projet).

L'intérêt de ce type de méthodologies est qu'elles peuvent jouer deux rôles au cours de la conception des bâtiments performants énergétiquement. D'une part, elles orientent les concepteurs vers des solutions appropriées aux climats et aux exigences de la maîtrise d'ouvrage, mais elles fournissent également une structure claire des points importants à vérifier dans le cadre d'un projet particulier, une sorte de plan de commissionnement générique (après travaux Hauglustaine).

Enfin, un outil d'assistance au commissionnement appelé «outil d'assistance à la bonne pratique pour des écoles performantes», accessible sur Internet, a été réalisé dans le cadre d'un projet collaboratif visant à décrire un manuel de bonne pratique qu'intègre le commissionnement tout au long du cycle de vie de projets scolaires. Ce projet a pour objectif de créer une nouvelle génération des écoles à hautes performances énergétique en Californie [CHPS'2006]. Cet outil fournit à son utilisateur des plans de commissionnement de manière interactive adaptés aux spécificités du bâtiment à concevoir. Il permet également :

- d'évaluer le coût probable de commissionnement,
- d'identifier l'étendue appropriée du commissionnement pour chaque projet, et développer un échantillon des documents appropriés,
- de développer un échantillon de documents nécessaires à la conception ainsi que les entrées spécifiques pour chaque projet,
- d'accéder à un échantillon de spécifications du commissionnement relatif aux entrées spécifiques pour chaque projet de construction,
- d'avoir un aperçu sur l'exploitation des systèmes HVAC propre à chaque projet.

Une mis à jour a été réalisée en 2005, lui permettant ainsi de [CHPS'2006] :

- générer des plans de commissionnement,
- générer des plans de formations,
- générer des manuels pour système.

Cet outil disponible sur le site www.energydesignresources.com, permet d'assister le commissionnaire à décrire le plan de commissionnement à partir d'une base de données fixe, très orientée systèmes. Le commissionnaire peut ainsi choisir à partir de l'interface les domaines (aspect conception, technologie et performances énergétiques), la typologie du bâtiment, ou les ressources qu'il souhaite commissionner.

Cet outil comporte néanmoins certaines limites. D'une part, sur le plan de la forme, sa structure complexe le rend difficile à utiliser ; d'autre part, sur le fond, il fournit des listes de commissionnement type et très orientées systèmes et ne permet pas de commissionner les particularités d'une conception architecturale.

Les travaux présentés dans cette section intègrent le commissionnement par rapport à :

1. une phase du processus et un sous-système du bâtiment les particularités et les imprévus du bâtiment (les deux premières),
2. une phase du processus et tout le système du bâtiment, en gérant les particularités et les imprévus du bâtiment (outil développé par J-M.Hauglustaine),

3. toutes les phases mais un sous-système sans gérer les particularités et les imprévus du bâtiment (Modèle développé par O.Akin, l'outil d'assistance à la bonne pratique pour des écoles performantes ainsi que les plans de commissionnement MQC, Modèle standard. (Cf. § I-2.5.1.3)),
4. toutes les phases et tout le système du bâtiment sans gérer les particularités et les imprévus du bâtiment (la méthodologie MDE).

La méthodologie proposée dans notre thèse vise à évaluer les choix réalisés tout au long du cycle de vie du bâtiment en prenant en compte, toutes les informations liées à tous les sous-systèmes du bâtiment, tout en proposant un processus de commissionnement évolutif qui gère les particularités d'un projet, les imprévus et les niveaux de détails de la conception.

2.2 MISE EN PLACE DE LA MÉTHODOLOGIE GLOBALE D'ASSISTANCE À LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS À FAIBLE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

La Figure 2.15 illustre la structure de la méthodologie globale d'assistance à la conception et au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, proposée. Pour être efficace cette approche intègre les différents niveaux suivants :

- Assistance au choix.
    a. Assistance à la définition du plan de commissionnement (choix des tâches de commissionnement à réaliser)
    b. Aide au choix (aide à la décision)
- Assistance à la gestion du flux d'information.

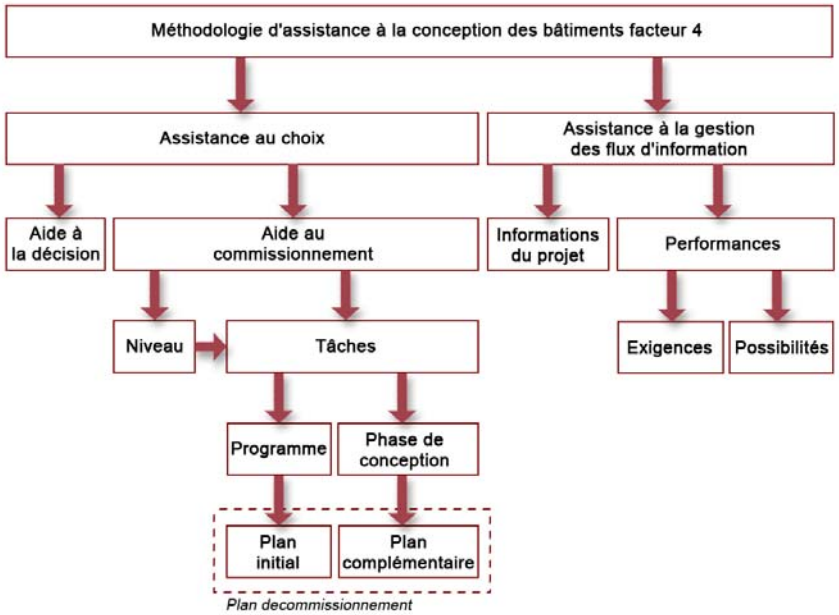


Figure 2.15 : Représentation de la méthodologie globale d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie

Le commissionnement revêt deux fonctions dans cette approche : il permet d'une part, d'évaluer les choix réalisés par les acteurs et leur impact sur les performances, et d'autre part, de contrôler le flux d'information.

L'étape d'assistance au choix vise tout d'abord l'assistance à la définition du plan de commissionnement qui se fait en deux temps. Cette assistance débute par la définition du niveau de commissionnement : bas, moyen, élevé, à appliquer à un projet, sur la base des informations primaires (programme, réglementations, etc.). Une liste préliminaire de tâches de commissionnement est définie en fonction du niveau de commissionnement à réaliser. Cette liste va par la suite évoluer et être mise à jour suivant l'évolution du projet, ses particularités et son niveau de détail (Cf. Figure 2.15).

L'aide à la décision est également intégrée dans cette méthodologie, elle vise une orientation vers des solutions et ne sera traitée que de manière partielle dans cette thèse.

L'étape d'assistance à la gestion des flux d'information vise à assister les différents intervenants dans la gestion de l'information volumineuse et complexe qui circule tout au long du processus de conception en :

- S'assurant que tous les acteurs du bâtiment ont accès à toute l'information nécessaire à une intervention performante (informations sur l'état du projet, les objectifs, les possibilités, les causes de certains choix, etc.).
- Facilitant les échanges entre les différents acteurs.
- Structurant l'information, pour faciliter son exploitation d'une part, dans le cadre de l'assistance à la définition du plan de commissionnement, et de la réalisation des tâches de commissionnement et d'autre part, dans l'aide à la décision (Cf. Figure 2.16).
- Évitant les pertes d'informations.

La Figure 2.16 présente le mode d'application de cette méthodologie dans le cadre de la conception d'un bâtiment à faible consommation d'énergie.

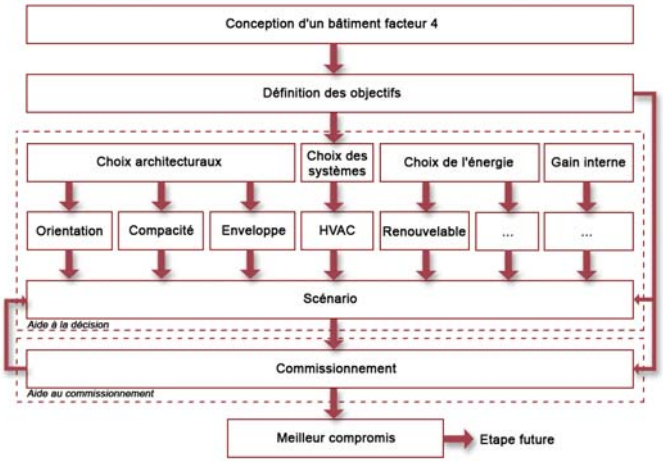


Figure 2.16 : Représentation de l'application de la méthodologie globale d'assistance par étape du processus de conception

La section suivante décrit le cahier des charges élaboré pour l'implémentation de la boite à outils qui met en application cette méthodologie. Cette boite à outils d'assistance se concentre sur l'aspect thermique du bâtiment à faible consommation d'énergie.

3. DESCRIPTION DU CAHIER DES CHARGES DE L'ASSISTANT AU COMMISSIONNEMENT

Seule la partie liée au commissionnement est traité dans cette recherche. Elle vise à développer une boite à outils d'assistance à la définition du plan de commissionnement, destinée aux personnes en charge de cette mission. Cette boîte à outils permet d'agir sur la globalité du cycle de vie du bâtiment.

3.1 ASSISTANCE À LA DÉFINITION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT

Le défi majeur du commissionnement étant de suivre une procédure correctement organisée, l'outil clé est ici le plan de commissionnement qui définit les actions à réaliser. Il permet aux différentes parties concernées de bien comprendre en quoi il consiste, quel effort et quelle dépense il suppose et comment il doit être organisé. Tel qu'il a été décrit dans la section précédente le contenu global du plan de commissionnement doit être défini dès le départ du projet et mis à jour continuellement.

L'assistance à la définition du plan de commissionnement prend en compte : 1) Le jeu des différents acteurs intervenant lors de la conception, de la réhabilitation, la construction ainsi que l'exploitation du bâtiment, 2) L'évaluation des performances du bâtiment (systèmes, sous-systèmes et composants) (Cf. Figure 2.17).

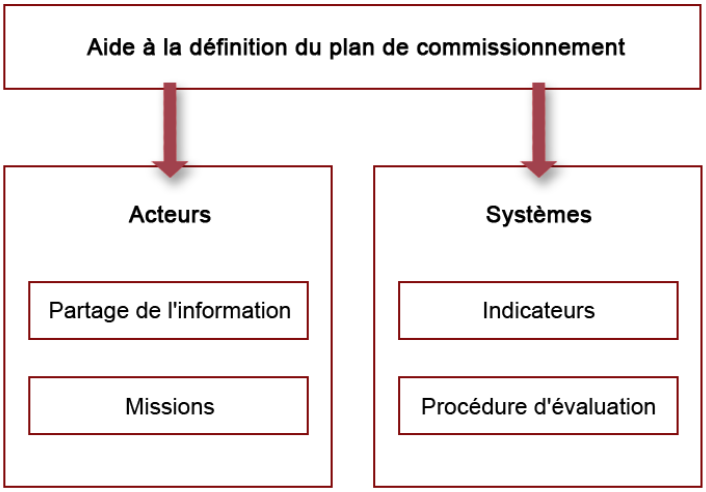


Figure 2.17 : Définition du plan de commissionnement

Pour définir et appliquer un plan de commissionnement, trois types d'outils ont été développés (Cf. § 1-2.5.1) : Les listes de vérification, les modèles «standard», les matrices de «qualité contrôle».

Le premier outil élaboré dans le présent travail se rapproche des matrices qualité. Il comprend l'ensemble des tâches de commissionnement à réaliser tout au long du cycle de vie du bâtiment. Il permet ainsi de décrire la liste de tâches initiale suivant les caractéristiques d'un bâtiment. Cette liste de tâches va servir à vérifier et à montrer que les performances du bâtiment dans sa globalité et du (ou des) système(s) considéré(s) satisfont bien les objectifs et critères initialement fixés.

Un deuxième outil dit dynamique permet d'adapter le plan de commissionnement décrit par la matrice qualité suivant les particularités du projet.

3.1.1 JEUX D'ACTEURS

Pour minimiser les difficultés que rencontrent les acteurs du bâtiment lors de sa conception, sa réalisation et son exploitation et réduire les dérives qu'elles impliquent, des procédures de vérification du bon déroulement des projets sont implémentées. Ces procédures visent à vérifier (Cf. Figure 2.18) :

- D'une part, que la mission de chaque acteur impliqué dans un projet est clairement définie, pour chaque phase d'intervention, et que les méthodes utilisées sont adaptées au projet, etc.

- D'autre part, que la gestion du flux d'information qui circule entre ces acteurs est optimale (partage, disponibilités, mise à jour etc.) pour éviter les pertes, les manques d'information.

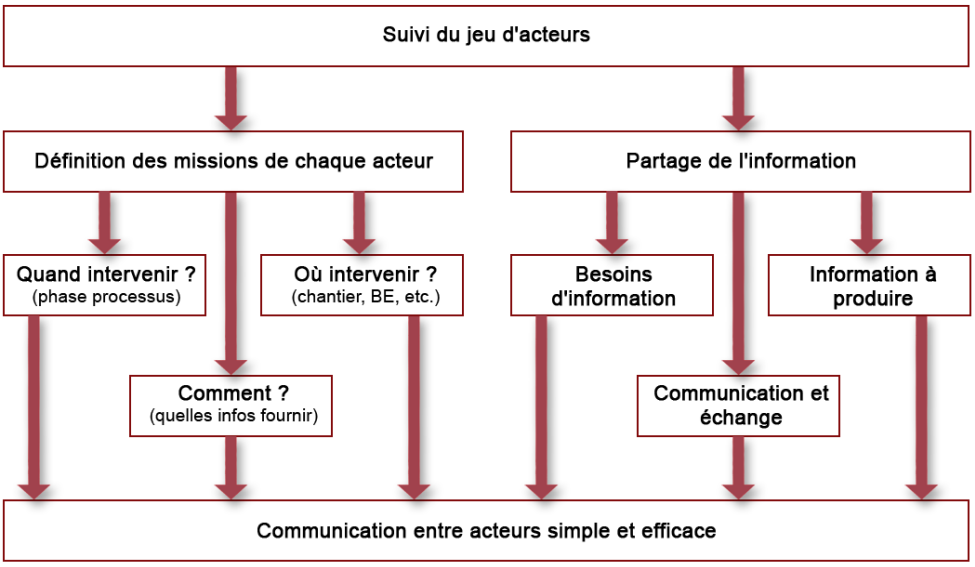


Figure 2.18 : Suivi du jeu d'acteurs

3.2 STRUCTURE ET CHAMP D'APPLICATION DE LA BOÎTE À OUTILS

La boite à outils est développée en deux étapes. Dans un premier temps, une base de données de tâches d'évaluation adaptées au bâtiment à faible consommation d'énergie est réalisée. Pour cela, l'ensemble des systèmes et sous-systèmes qui interviennent dans la performance du bâtiment et qui nécessitent des actions d'évaluation a été listé. Cet outil est dit «statique» car il ne dépend que des constantes du projet (type de projet, réglementation, localisation, etc.).

Cette base de données d'évaluation peut être complétée ou mise à jour grâce à un outil de diagnostic qui prend en compte les imprévus, les particularités du projet, son état d'avancement et le niveau de granularité souhaité. Cet outil est destiné à détecter les défaillances éventuelles du bâtiment et de ses sous-systèmes et à en identifier les causes pour enfin émettre des alertes quand cela est nécessaire. Il est dit «Dynamique» car il permet au fur et à mesure que le projet avance, d'ajouter ou de supprimer des tâches.

Cette boite à outils est ensuite évaluée par confrontation avec des experts dans le domaine et testée dans un cas réel afin de vérifier la pertinence des outils et leurs limites.

3.2.1 STRUCTURE DE LA BOITE À OUTILS

La Figure 2.19 illustre les grandes étapes de définition d'un plan de commissionnement. Le développement du plan de commissionnement initial s'est inspiré des travaux réalisés dans le cadre de l'Annexe 40 de L'AIE [Annexe40'2004], de standard internationaux tel «Passivhaus» [Assivhaus'2007] et Minergie® [Minergie'2007] et du retour d'expérience de projets expérimentaux (Cf. § 2-1.2). Le plan de commissionnement initial tient compte de trois facteurs :

- les informations initiales du projet : le programme, les normes, réglementations, contraintes du site etc.,
- le niveau de commissionnement qui dépend de la complexité du bâtiment (liée au type de bâtiment et à sa performance) et de la stratégie de l'entreprise [Annexe40'2004],
- la capitalisation et le retour d'expériences de projet performants énergétiquement.

Le plan de commissionnement générique appliqué à la partie énergétique d'un projet varie par rapport au :

- niveau de complexité du bâtiment : bas, moyen et important,
- niveau de performance énergétique souhaité : performant, très performant et BEPOS,
- champs d'application souhaité : global ou par corps d'état ou les deux.

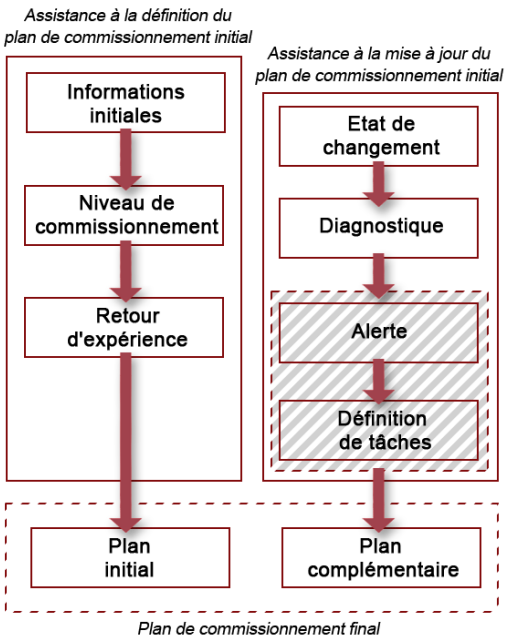


Figure 2.19 : Représentation des étapes majeures de définition du plan de commissionnement

Un ensemble d'indicateurs simples et d'aides mémoires sont intégrés à ce plan, afin d'orienter les commissionnaires ou de donner des éclaircissements pour certaines tâches. Ces indicateurs peuvent intervenir dans les phases amont du projet pour évaluer la justesse des choix faits comme par exemple : l'orientation du bâtiment, les types de vitrage, les épaisseurs de l'isolant, ou à des phases plus avancées pour rappeler des quantités et des estimations réglementaires par exemple.

La mise à jour du plan de commissionnement a plusieurs objectifs. Elle permet de :

- anticiper les dérives liées aux difficultés de communication que peuvent rencontrer les différents intervenants,
- gérer les imprévus tels que certaines surprises rencontrées suite à un diagnostic non exhaustif, ou un allégement de programme, ou les changement d'exigences de dernière minute,
- gérer le niveau de granularité du projet (niveau de détail),
- gérer la particularité de chaque projet.

La mise à jour du plan de commissionnement initial peut se faire de deux manières :

1. Recenser et alerter systématiquement des changements, décisions improvisées, ou situations inattendues, qui touchent les éléments qui influent sur les performances.
2. Faire un diagnostic rapide «probabiliste» à partir d'informations partielles d'un état du projet et émettre des alertes lorsqu'il y a risque de dégradation des performances.

Dans le cadre de cette thèse, le choix s'est porté sur un diagnostic[15] «rapide» qui évite des alertes systématiques et non pertinentes. La Figure 2.20 illustre la manière dont le plan de commissionnement initial est mis à jour.

L'outil dynamique doit permettre lors d'un changement d'état du projet, recensé suite à l'intervention d'un acteur ou au passage d'une phase à l'autre du processus de conception, de réaliser un diagnostic en temps réel de ce nouvel état. Si tel qu'il est, le projet est susceptible d'atteindre les exigences établies, rien ne change dans le plan de commissionnement initial, si ce n'est l'apport de précisions sur les éléments importants à évaluer. Si ce n'est pas le cas l'outil doit émettre une alerte qui implique un changement de choix, ou un changement des exigences. Dans le cas de changement d'exigences le plan de commissionnement initial devra être adapté à ce changement.

[15] Il n'est pas question de faire une évaluation précise telle que des simulations (trop coûteuses en temps et en argent), mais de se baser sur les informations disponibles pour établir des listes de tâches de commissionnement plus adaptées à certains cas.

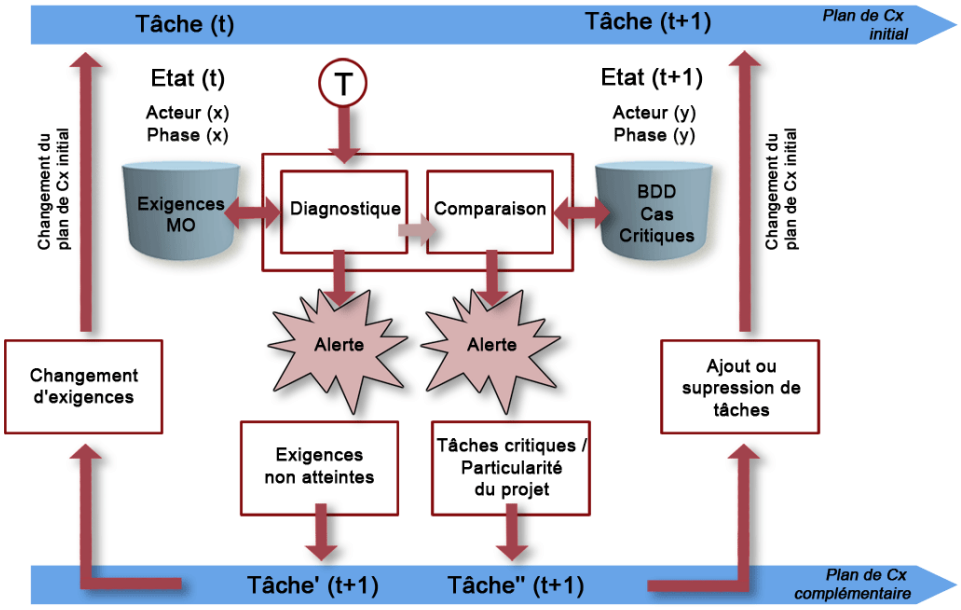


Figure 2.20 : Etapes de réalisation du plan de commissionnement

D'un autre coté, si l'outil détecte certains points sensibles dans le projet qui nécessiteraient une attention particulière, il doit émettre une alerte qui permettra d'affiner le plan de commissionnement initial. Ceci impliquera l'ajout de tâches particulières ou la suppression de certaines si leur réalisation est inutile.

Un outil tel que celui-ci doit pouvoir prendre en charge des informations numérisées ou non. Pour ce qui est des informations numérisées, cet outil pourra extraire ces informations directement d'une base de données, en se basant sur l'hypothèse que dans l'avenir toutes les informations nécessaires seront prises en compte dans les IFC. Pour le cas des systèmes HVAC par exemples, il est possible d'imaginer l'utilisation des modèles de donnés développés par O.Akin [Akin'2004]. En cas de manques, le modèle IFC offre la possibilité d'ajouter des attributs spécifiques à une application (PSET). Pour ce qui est des informations non numérisées (Cf. § 1-1.4.3.3), il suffit de mettre en place une interface adaptée qui permette d'intégrer les informations disponibles manuellement.

Le diagnostic étant réalisé sur la base d'un projet incomplet, surtout en phase amont du processus de conception, l'outil se base sur un raisonnement de type probabiliste (type réseau bayésien) qui permet de réaliser un diagnostic à partir d'informations partielles. Il s'agit donc de mettre en relation des causes à leurs effets, et d'évaluer la probabilité d'atteindre les exigences requises à partir des informations connues du projet. Inversement, il est possible de repérer quelles sont les caractéristiques du projet à modifier pour atteindre les exigences (Cf. Figure 2.21), ou définir de nouvelles exigences par rapport à des contraintes connues.

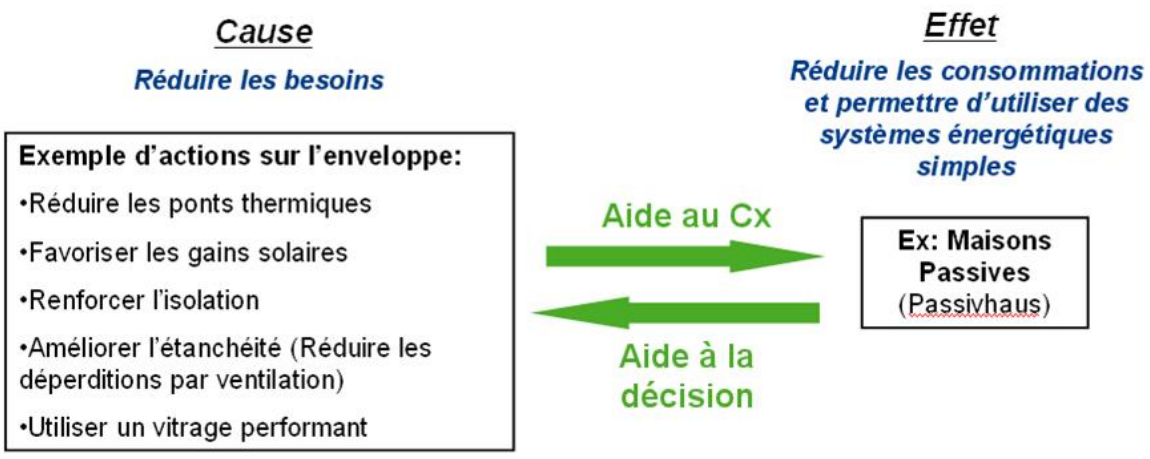


Figure 2.21 : Capitalisation de l'information par l'utilisation d'un raisonnement probabiliste tel que les réseaux bayésiens qui permet de faire du commissionnement et de l'aide à la décision

3.2.2 CHAMPS D'APPLICATION DE LA BOITE À OUTILS

L'utilisation de la boite à outils d'assistance à la définition du plan de commissionnement se fait dès les premières phases du projet et tout au long du cycle de vie du bâtiment.

La Figure 2.22 présente les points critiques du processus de conception au cours desquels le commissionnement doit être intégré :

1. suite à la définition du programme, pour vérifier que les besoins du maître d'ouvrage sont bien décrits, que la mission de chaque acteur est bien définie, que les aspects de gestion de projet (budget, délais, etc.) sont pris en compte et que les exigences du maître de l'ouvrage peuvent être atteintes,

2. lors du passage d'une phase à une autre du processus de conception, pour vérifier que la mission de clôture du projet est bien réalisée, que tous les intervenants ont réalisé leurs missions respectives, que les dossiers de clôtures sont complets et que tous les choix faits dans cette phase permettent d'atteindre les exigences fixées,

3. lors d'une même phase, suite au changement d'acteurs ou de nouvelles prises de décisions pour vérifier la pertinence des choix réalisés, le bon déroulement des échanges d'informations ainsi que du respect de tous les aspects de gestion de projet.

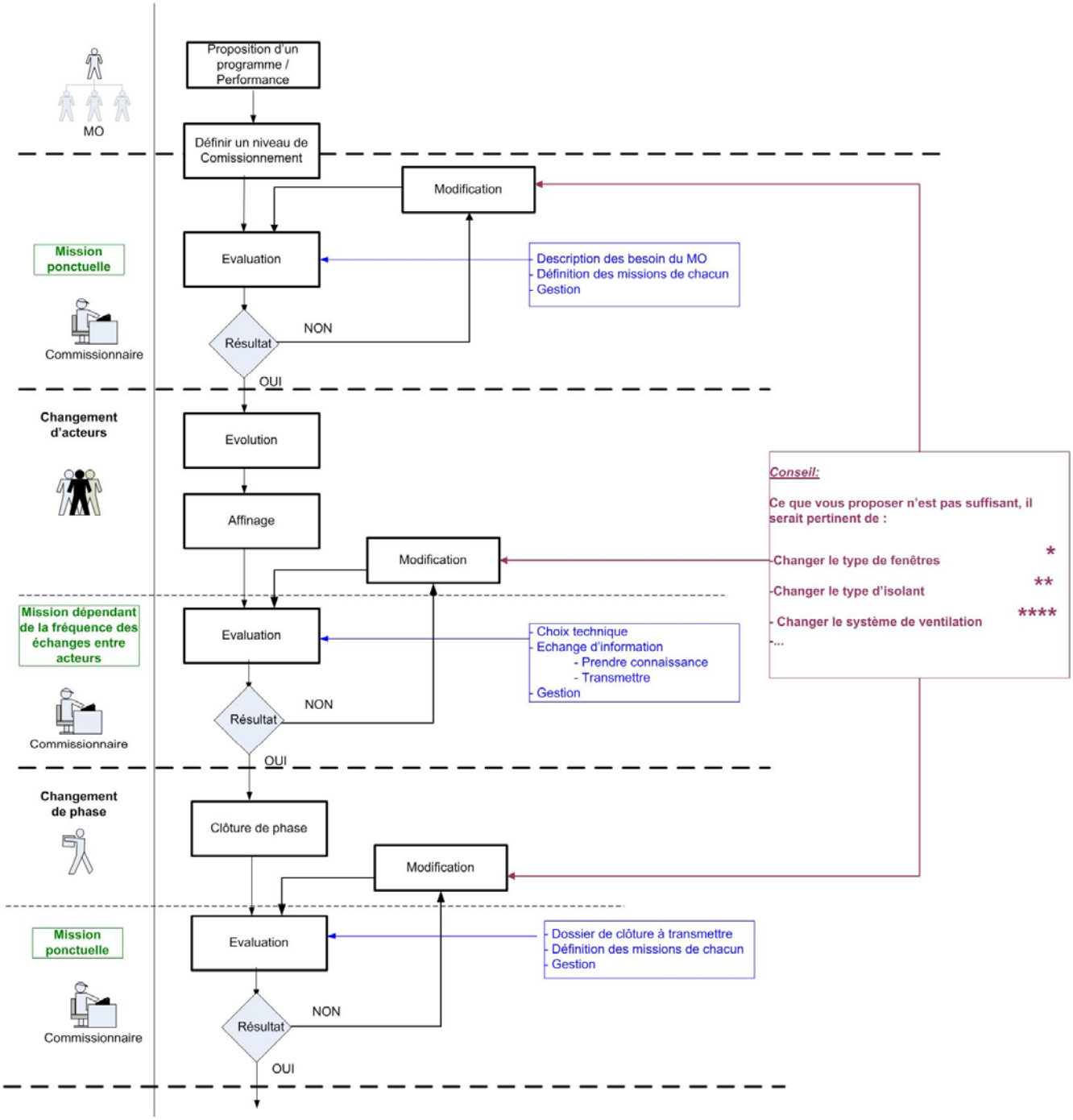


Figure 2.22 : Schématisation de l'utilisation des outils de Commissionnement

Cette boîte à outils doit permettre également de donner des orientations vers les parties sensibles du projet qui nécessitent une attention particulière.

4. CONCLUSION

Ce chapitre a montré tout d'abord le caractère opérationnel de cette recherche. Par le biais d'enquêtes puis d'études de cas réels de conception et de réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie, il a été possible de vérifier et de valider «in situ» les constats faits lors de l'étude bibliographique et de les enrichir. Cette prise de connaissance du contexte réel a mis en évidence les limites d'un commissionnement précoce fondé sur un plan fixé à l'avance et a permis de dégager une nouvelle hypothèse à savoir la nécessité d'intégrer au processus de réalisation un processus de commissionnement évolutif qui permet de définir des plans de commissionnement adaptés à chaque projet.

La deuxième partie de ce chapitre a décrit une méthodologie globale proposée pour assister la maîtrise d'œuvre dans la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie. Cette méthodologie intervient à trois niveaux de la conception : 1) Aide à la décision, 2) Assistance au commissionnement, 3) Assistance à la gestion de l'information. Elle s'est concentrée dans un second temps sur la partie assistance au commissionnement en présentant un cahier des charges qui décrit la boite à outils qui assistera le commissionnaire dans la mise en place de ce plan de commissionnement évolutif.

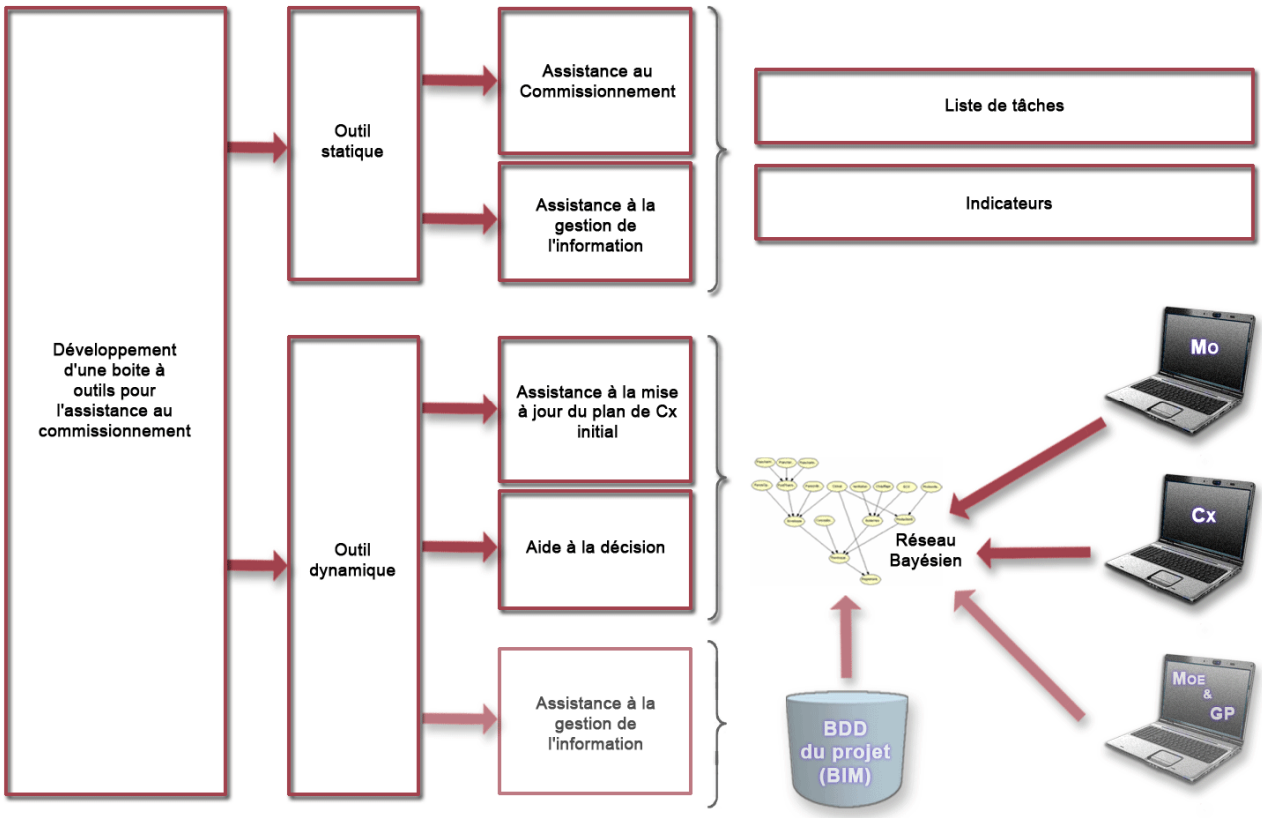


Figure 2.23 : Description de la boite à outil d'assistance à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie

La boite à outils doit permettre :

1. De définir un plan de commissionnement initial générique mis à jour au fur et à mesure de l'avancement du projet. Cette mise à jour consiste à ajouter des précisions dues aux spécificités d'un projet (ajouter ou enlever des tâches) ou à le changer en tenant compte des nouvelles exigences émises.
2. De faire un diagnostic rapide pour évaluer la possibilité d'atteindre les performances exigées par la maîtrise d'ouvrage dans le programme, en tenant compte des contraintes du site et des exigences de conception éventuellement émises dans celui-ci.
3. De changer les exigences émises par le maître d'ouvrage Ce changement peut se traduire par un changement du niveau de performance, de coût ou de confort préalablement défini.

Cette recherche se focalise sur les phases amont du processus de conception, à savoir la phase programme et esquisse. Les deux chapitres suivants décrivent l'implémentation de cette boite à outils.

CHAPITRE 3

IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA DÉFINITION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL

Comme son nom l'indique, ce chapitre présente l'implémentation de l'outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement initial. Cet outil permet de définir un plan de commissionnement générique suivant la caractéristique d'un bâtiment. Cette présentation met en avant, son rôle, l'environnement dans lesquels il est implémenté, sa structure ainsi que l'ébauche d'un outil informatique.

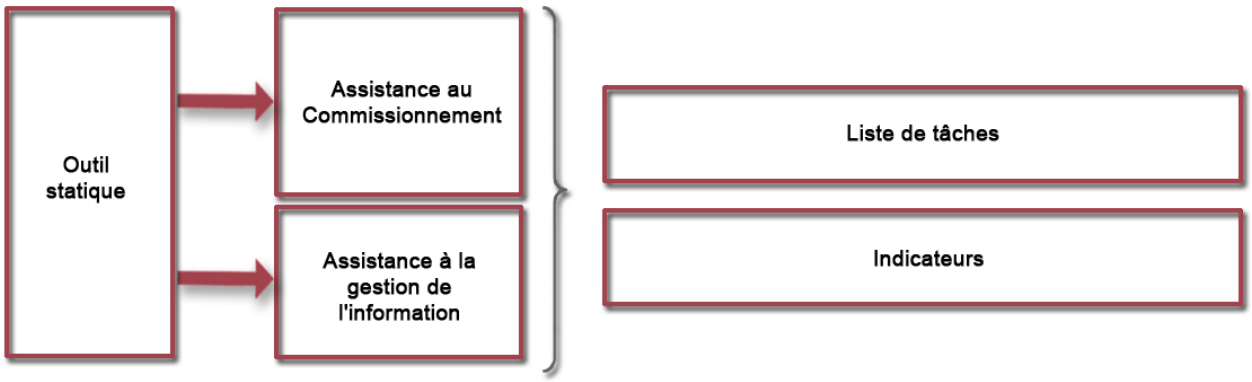


Figure 3.1 : Description de l'outil statique : Outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement initial

1. DESCRIPTION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA DÉFINITION DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL (OUTIL STATIQUE)

Le rôle de cet outil est d'assister le commissionnaire dans la définition du plan de commissionnement initial à réaliser tout au long du cycle de vie du bâtiment. Ce plan comporte l'ensemble des tâches de vérification communes à tous les projets de bâtiments à faible consommation d'énergie. Ces tâches visent à vérifier, à chaque phase du processus de conception, que les actions réalisées par les différents acteurs du bâtiment vont bien dans le sens de la performance énergétique exigée par la maîtrise d'ouvrage.

L'ensemble des tâches de vérification nécessaires au bon déroulement du processus de conception est stocké dans une base de données Access (Microsoft) (Cf. § 3-2.3). Celle-ci est organisée suivant une structure décrite dans la section suivante.

1.1 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL

L'ensemble des tâches constituant le plan de commissionnement initial est stocké dans une base de données structurée suivant le niveau de performance énergétique établi par la maîtrise d'ouvrage, le niveau de commissionnement nécessaire, le domaine à commissionner et l'échelle de détail selon laquelle le commissionnement est réalisé. L'objectif est d'aider le commissionnaire à définir pour chaque phase du processus de conception une liste de tâches de commissionnement générique répondant aux caractéristiques de son projet (Cf. Figure 3.3).

1.1.1 NIVEAU DE PERFORMANCE ENERGÉTIQUE

Suivant la performance énergétique d'un bâtiment, quatre niveaux de performances ont été définis dans le cadre de ce travail : réglementaire, performant, très performant et BEPOS.

1. ***Le bâtiment réglementaire*** est un bâtiment qui au minimum répond aux exigences de la réglementation thermique Française RT 2005 (Cf. § 1-1.3.1). Ces exigences sont liées à la réduction des consommations d'énergie (pour le chauffage, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et le refroidissement), à la température intérieure etc. [RT'2005].
2. ***Le bâtiment performant*** est un bâtiment appelé le plus souvent «basse énergie» [Chlela'2006]. Ce type de bâtiment correspond aux exigences du label «Minergie®» [Minergie'2007] (Cf. § 1-1.3.3). Ce type de construction favorise une architecture bioclimatique, une enveloppe imperméable, une réduction des ponts thermiques, une isolation de 15 à 20cm, des fenêtres performantes (type double vitrage). Pour les systèmes, il est préconisé l'intégration des systèmes de ventilation double flux avec récupération de chaleur, puits canadiens, des systèmes de chauffage performants (pompe à chaleur, chaudière à condensation, etc.) et l'intégration d'énergie renouvelable (solaire, air, etc.).

3. ***Le bâtiment très performant*** est un bâtiment dit «passif» [Chlela'2006]. Il correspond au label «Passivhaus» [Passiv'2006] ou «Minergie® P» [Minergie'2006] (Cf. § 1-1.3.3). Il est dit passif car il se veut assurer un confort intérieur tant en hiver qu'en été sans avoir recours à un système de chauffage ou de refroidissement en réduisant fortement les besoins de chauffage et de climatisation. Pour y parvenir, il préconise la mise en place d'une super-isolation de 30 à 40 cm, des fenêtres très performantes (type triple vitrage) avec une réduction importante des ponts thermiques et une étanchéité maximale à l'air de l'enveloppe. Les déperditions éventuelles par ventilation sont éliminées grâce à une ventilation double flux avec récupération de chaleur sur air extrait, qui est parfois couplée à un puits canadien qui préchauffe l'air neuf. Pour ce qui est du confort d'été, il est assuré par un rafraîchissement de l'air neuf grâce au puits canadien, un couplage rafraîchissement nocturne et inertie thermique pour évacuer les gains internes de la journée et refroidir la structure, et l'intégration de protections solaires. Tout cela en plus de l'intégration fort recommandée des énergies renouvelables.
4. ***Le bâtiment zéro énergie ou BEPOS*** dit «à énergie positive», est un bâtiment qui produit autant voire plus d'énergie qu'il ne consomme [Chlela'2006] (Cf. § 1-1.3.3). Ces bâtiments sont des bâtiments basse énergie ou passifs, auxquels sont ajoutés des toits solaires photovoltaïque et thermique. Les besoins en chauffage, refroidissement et électricité sont réduits au maximum grâce à une enveloppe et des systèmes très performants et économes dont le complément en besoin énergétique est comblé par une production d'énergie renouvelable.

La base de données de l'outil statique devra englober l'ensemble des tâches qui permettent de vérifier que les spécificités de chacun des niveaux de performances sont respectées.

1.1.2 NIVEAU DE COMMISSIONNEMENT

Le niveau de commissionnement (bas, moyen, et élevé) détermine l'importance du commissionnement à réaliser. Plus le niveau de commissionnement est élevé plus le plan de commissionnement est précis et plus la liste de tâches de commissionnement est fournie. Le niveau de commissionnement dépend du niveau de risque défini par le maître d'ouvrage suivant la complexité du projet (minime, élevé, très élevé), et de la stratégie qu'il adopte dans le projet (coût, confort, performance énergétique).

Un niveau de commissionnement bas implique un nombre réduit de tâches qui portent sur les évaluations incontournables telle que la vérification de la complémentarité des dossiers, de l'optimisation des ressources existantes, ou de la prise en compte de l'ensemble des caractéristiques nécessaires à la réalisation de l'étude thermique.

Plus le niveau de commissionnement est élevé plus le nombre de tâches augmente et le commissionnement devient précis.

Tous les bâtiments ne peuvent pas être commissionnés de la même manière (Hôpital, bureaux, centrale nucléaire, résidence, etc.). Suivat que le maître de l'ouvrage donne la priorité :

- *au coût*, avec un budget limité pour la réalisation du projet. Ce qui réduirait le niveau de commissionnement à réaliser par soucis d'économie,
- *au confort*, sans se soucier de la performance énergétique de son bâtiment dans le cas de bâtiments prestigieux par exemple,
- *à la performance énergétique*, dans l'objectif de réduire le coût des factures énergétiques et/ou l'impact sur l'environnement.

Voici trois exemples qui permettent d'illustrer le choix du niveau de commissionnement par rapport à ces deux critères :

- Un hôpital par exemple, peut être considéré comme un bâtiment à risque, vu la complexité des systèmes qui sont mis en œuvre pour le réaliser. Un bâtiment de ce type doit exiger un niveau de commissionnement élevé, car toute défaillance dans son fonctionnement global pourrait engendrer des répercutions dramatiques sur ses utilisateurs.
- Un hôtel de prestige dont le maître d'ouvrage exige un confort absolu - quelle que soit la dépense, ou un hôtel de classe standard, dont le maître d'ouvrage exige un niveau de performance énergétique élevé, nécessiteraient tous deux un commissionnement élevé. Que la cible soit la performance énergétique ou le confort thermique le commissionnement sera de niveau élevé mais il visera des équipements différents. Il insistera, dans chaque cas sur ce qui influe le plus sur la stratégie adoptée par l'un ou l'autre des propriétaires.
- Dans le cas d'un maître d'ouvrage qui ne prévoit pas un budget conséquent pour la mission de commissionnement. Le commissionnaire se doit de conseiller son client, si son bâtiment nécessite un commissionnement élevé, tout en sachant que la décision finale revient au maître d'ouvrage.

Un scénario a été imaginé pour expliquer le mode de prise de décision du niveau de commissionnement (Cf. Figure 3.2). Suite à la décision de concevoir un bâtiment et la mise en place de son programme, le maître d'ouvrage peut choisir son commissionnaire, qui après étude du programme proposera à son client le niveau de commissionnement préconisé pour ce projet. Le client peut accepter le niveau proposé ou revoir ses objectifs, en termes de performances ou de confort en fonction de son budget. La mission du commissionnaire se limite à conseiller son client et à lui démontrer les risques en cas de réduction du niveau de commissionnement.

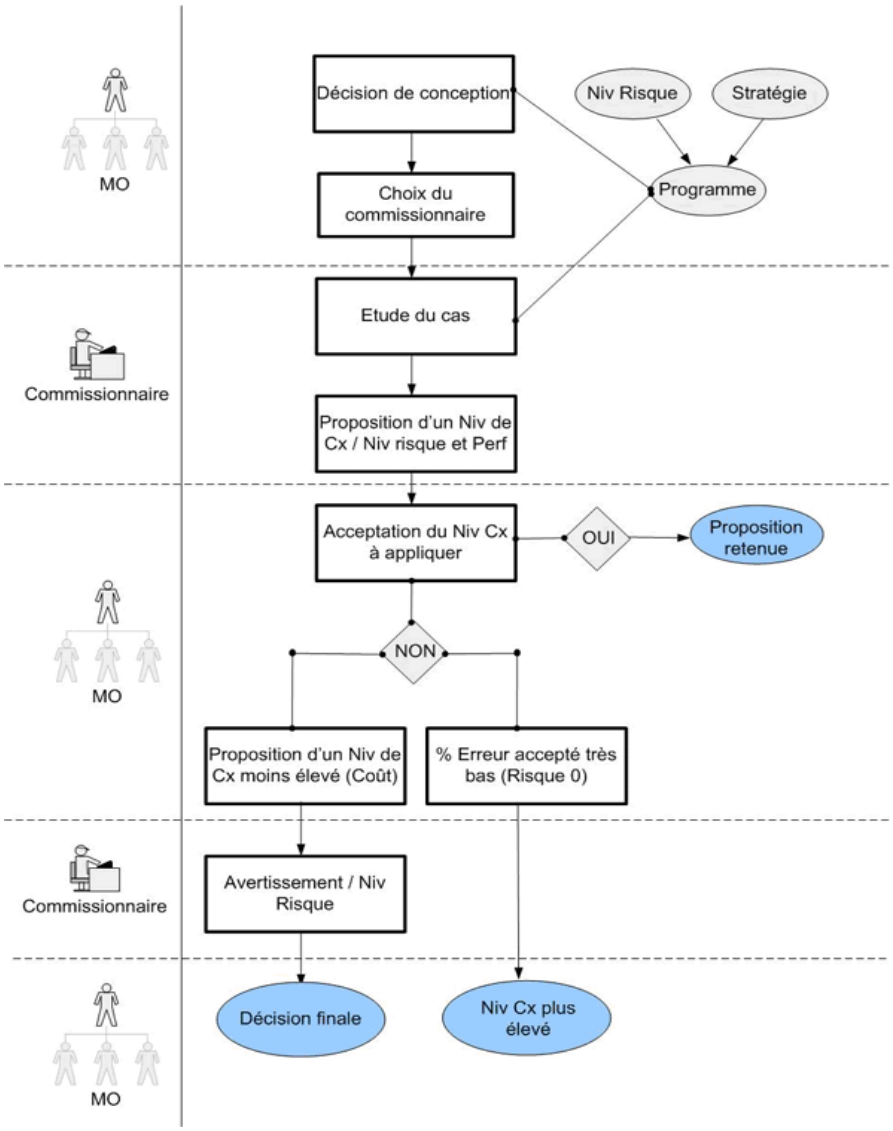


Figure 3.2 : Schématisation de la prise de décision du niveau de commissionnement à réaliser

Cette recherche se penche essentiellement sur les niveaux de risques et de performances liés à la consommation d'énergie, et plus particulièrement l'aspect thermique.

1.1.3 DOMAINES À COMMISSIONNER

Les domaines à commissionner représentent un troisième filtre dont seuls les deux aspects en rapport avec la qualité énergétique du bâtiment sont traités dans cette thèse.

1. ***Le domaine gestion de projet*** inclut toutes les tâches de commissionnement qui concernent : la gestion de l'information (définition des besoins dans le programme, dossiers de clôture de phase, etc.), ainsi que l'ensemble des informations nécessaires au bon déroulement du projet (étude des potentialités du site, contraintes du site, etc.), le jeu d'acteurs (mission, accès à l'information, etc.), le respect des contraintes réglementaires, les délais, les estimations financières, etc.

2. ***Le domaine performance énergétique*** couvre quatre sous domaines : l'architecture, l'enveloppe, les systèmes et l'énergie.

   • ***Le domaine de l'architecture*** regroupe toutes les tâches qui permettent de vérifier si les solutions qui portent sur l'optimisation de la conception architecturale (la structure, la volumétrie du bâtiment, son orientation, son organisation spatiale etc.) ont été prises en compte afin de limiter les pertes et d'améliorer le confort des habitants. Cette partie se base essentiellement sur les principes de la conception bioclimatique.

   Plusieurs études ont été réalisées dans ce domaine, elles ont permis de définir des stratégies qui affectent la conception du volume du bâtiment. La préoccupation première de [Wright'1979] dans les années soixante dix, a été d'introduire des paramètres climatiques et la notion d'économie d'énergie lors de la conception architecturale. Il a défini huit outils naturels pour la conception d'un projet énergétiquement performant (facteur thermique, facteur solaire, déperdition, apports, stockage thermique, protection solaire, ventilation, climatisation). Des études plus récentes telles que celles de [Liébard'2005] et [Courgey'2006] ont organisé ces outils suivant cinq principes de la conception bioclimatique sur lesquelles s'est basée la structure des tâches de commissionnement à réaliser dans ce domaine :

   1. capture des radiations caloriques,
   2. limitation des pertes (en agissant sur les matériaux, l'orientation etc.),
   3. recommandation concernant la volumétrie (compacité, aérodynamisme etc.),
   4. confort d'été,
   5. optimisation de l'organisation spatiale.

   • ***Le domaine de l'enveloppe*** traite des tâches liées aux performances techniques de l'enveloppe du bâtiment, opaques et transparentes. La structure des tâches qui traitent ce point sest basée sur des travaux réalisés au CSTB, dans le domaine de la simulation avec des outils tels que TRNSYS [TRNSYS'2005], et les solutions adoptées dans les différents labels internationaux telles que *«Minergie®»* [Minergie'2007], *«Passivhaus»* [Passivhaus'2007] et les *«Zero Energy Buildings»* [Chlela'2006]. Chacun de ces labels, propose un package de solutions et de combinaisons possibles pour la conception technique de l'enveloppe (épaisseur de l'isolant, type et pourcentage de vitrage, ponts thermiques, etc.). Le classement des tâches de commissionnement s'en est inspiré et aborde les aspects suivants :

   1. traitement des parois opaques,
   2. traitement des parois transparentes,
   3. perméabilité,
   4. ponts thermiques.

- ***Le domaine des systèmes*** regroupe toutes les tâches nécessaires à vérifier la performance des systèmes durant leur conception, dimensionnement, installation et exploitation. Cette partie du travail se base essentiellement sur les travaux réalisés dans le cadre des deux Annexes 40 et 47 [Annexe40'2004] [Annexe40'2007] [Annexe47'2007] de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie). Le commissionnement de ces systèmes est structuré suivant leurs composantes :

    1. la production de chaleur et de froid,
    2. la distribution,
    3. l'émission.

- ***Le domaine de l'énergie*** vise à évaluer les solutions énergétiques choisies dans le cadre d'un projet suivant les ressources existantes, la production d'énergie, l'estimation et le dimensionnement de consommation, etc. Cela par rapport aux deux possibilités :

    1. énergies renouvelables?
    2. autres types d'énergies (combustibles fossiles, électricité nucléaire).

Les tâches à réaliser dans le cadre du sous domaine gestion de projet sont communes à l'ensemble des plans de commissionnement. Elles ne varient pas suivant le niveau de performances énergétiques du bâtiment, seul le nombre de tâches varie suivant le niveau de commissionnement. Concernant les parties enveloppes, systèmes et énergie, la liste de tâches de commissionnement chargées de les évaluer peut changer en fonction du niveau de performance du bâtiment et du niveau de commissionnement à réaliser. Plus le niveau de commissionnement est élevé, plus il est nécessaire d'aller commissionner ces trois aspects dans le détail. Le domaine de l'architecture dépend du type de conception adoptée par le maîtrise d'œuvre (Cf. §.3-1.1.4). Cette classification donne au commissionnaire la possibilité de faire le choix de commissionner un ou tous les aspects décrits ci-dessus (Cf. Figure 3.3).

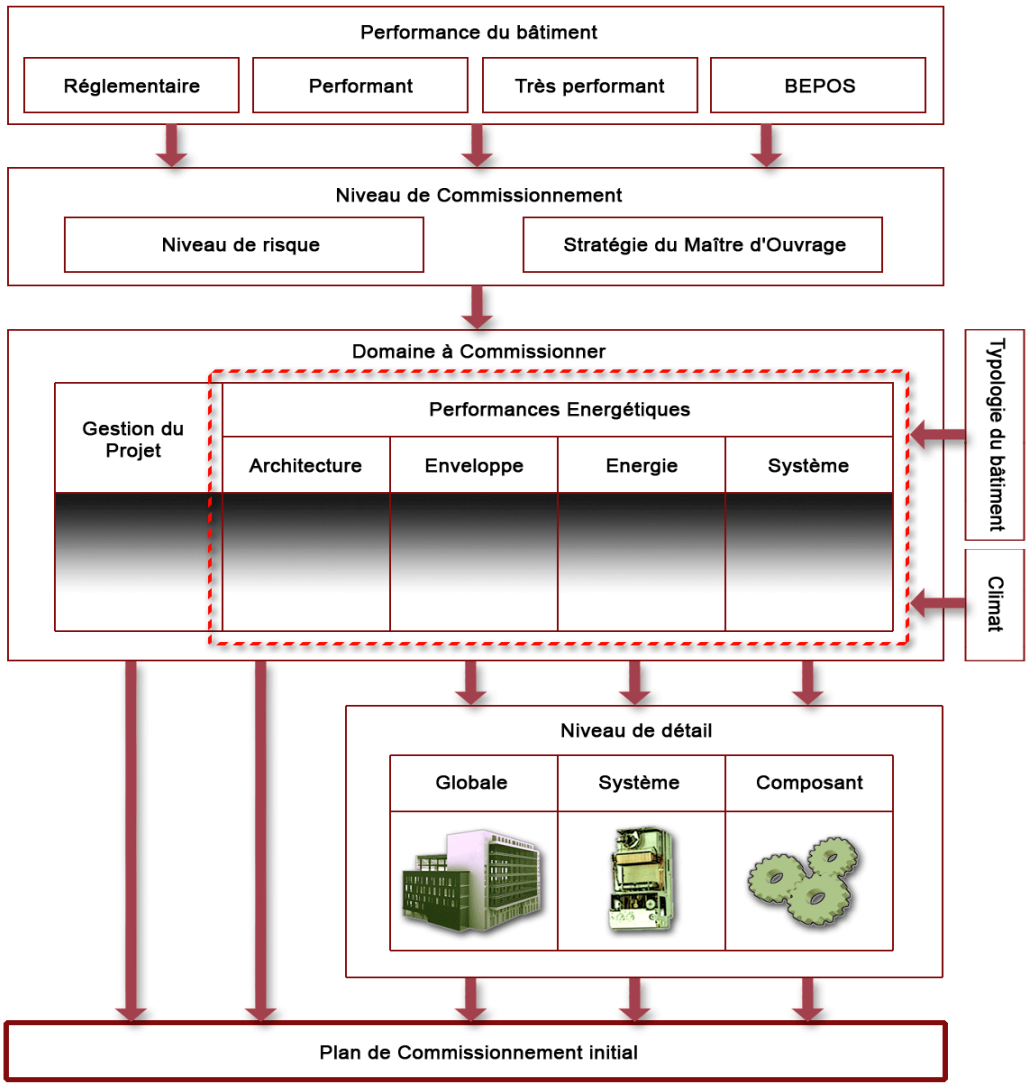


Figure 3.3 : Structure du plan de commissionnement Initial

1.1.4 FACTEURS COMPLÉMENTAIRES AYANT UNE INCIDENCE SUR LE PLAN DE COMMISSIONNEMENT

D'autres facteurs peuvent influer dans la composition du plan de commissionnement. Parmi ces facteurs il y a : la zone climatique et le degré d'intégration des nouvelles technologies dans le bâtiment.

a. Climat

Le facteur climat est une donnée importante dans la composition du plan de commissionnement. Suivant que le bâtiment est situé en zone H1, H2 ou H3, les solutions architecturales et techniques peuvent êtres différentes et de ce fait, les tâches de commissionnement également. La présence d'un bâtiment en zone H3 (Cf. Figure 3.4) par exemple, nécessiterait de se soucier du confort d'été, et donc d'intégrer des tâches de commissionnement en conséquence.

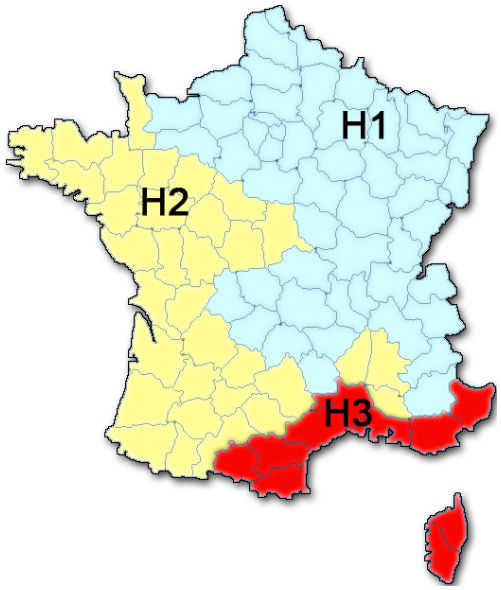


Figure 3.4 : Zones climatiques définies par réglementation thermique française

b. Degré d'intégration des nouvelles technologies

Dans le cadre de cette thèse, deux types de bâtiments à basse consommation d'énergie ont été définis : le bâtiment environnemental qui se base essentiellement sur les principes de l'architecture bioclimatique pour économiser de l'énergie et le bâtiment environnemental qui, ajoute à cela des procédés plus techniques et plus élaborés pour atteindre la performance escomptée.

Les bâtiments bioclimatiques s'adaptent à l'environnement extérieur, et tentent de profiter au maximum des possibilités qu'il peut leur fournir (ensoleillement, morphologie du site, etc.). Dans ce cas, le commissionnement de la partie architecture doit être plus poussé. Un rappel devra être fait dans le cas où le commissionnaire l'a négligé (Cf. Figure 3.12).

La construction de bâtiments environnementaux qui intègrent des systèmes actifs repose sur une isolation renforcée, une ventilation très performante, un vitrage performant et des systèmes HVAC innovants et plus complexes, voire une production d'énergie renouvelable. Dans ce cas, les listes de tâches de commissionnement de l'enveloppe, des systèmes HVAC et de production de l'énergie seront fournies. Dans le cas de bâtiments environnementaux qui se basent sur une architecture bioclimatique la liste de tâches liées à ce domaine devra être plus fournie.

1.1.5 ECHELLE DE COMMISSIONNEMENT

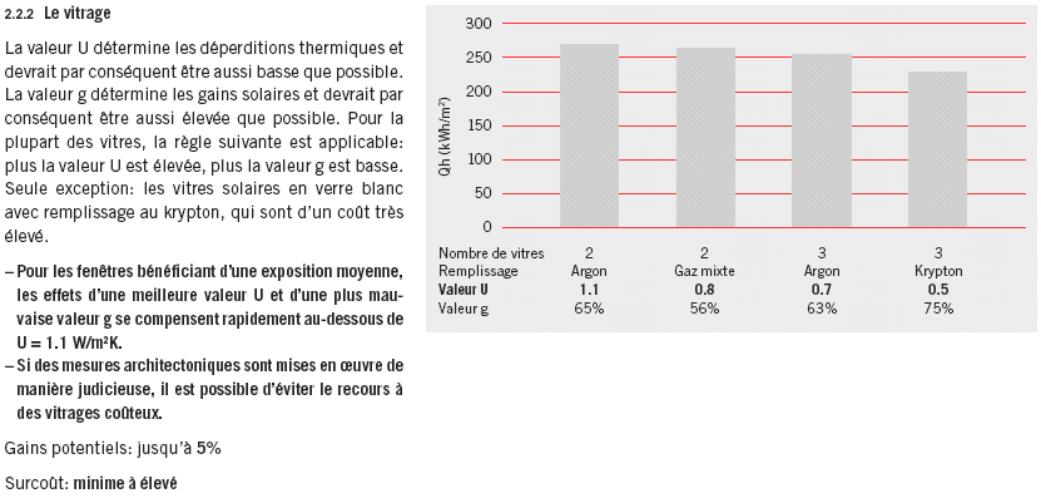
L'outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement permet de définir une échelle sur laquelle va intervenir le commissionnaire. Suivant le niveau de commissionnement et la typologie du bâtiment, il peut intervenir :

- à l'échelle globale du bâtiment avec quelques indications sur l'enveloppe, ou les systèmes,
- à l'échelle du système, avec des plans de commissionnement propres à chaque système (enveloppe, chauffage, climatisation, etc.) ou figureraient pour chaque étape de sa conception des tâches de commissionnement à réaliser et des FPT[16] «Fonctional Performance Testing» qui permettront de détecter et de diagnostiquer les malfaçons,
- à l'échelle du composant, en fournissant des listes de tâches de commissionnement aux constructeurs des systèmes.

1.1.6 INDICATEURS ET AIDES MÉMOIRE

Des indicateurs et aides mémoires ont été définis afin d'intégrer dans cette méthodologie des données pédagogiques qui permettent d'expliquer certaines tâches, de donner une liste de sous tâches, de justifier l'intérêt d'une tâche etc. Ils peuvent se traduire sous forme d'indicateurs de performances énergétique, d'indicateurs de précisions ou des rappels.

- ***Un indicateur de performance,*** permet au commissionnaire de vérifier si les choix réalisés sont propices pour atteindre le niveau de performance souhaité. Par exemple le choix d'un triple vitrage est conseillé pour un bâtiment très performant (Cf. Figure 3.5).



2.2.2 **Le vitrage**

La valeur U détermine les déperditions thermiques et devrait par conséquent être aussi basse que possible. La valeur g détermine les gains solaires et devrait par conséquent être aussi élevée que possible. Pour la plupart des vitres, la règle suivante est applicable: plus la valeur U est élevée, plus la valeur g est basse. Seule exception: les vitres solaires en verre blanc avec remplissage au krypton, qui sont d'un coût très élevé.

– **Pour les fenêtres bénéficiant d'une exposition moyenne, les effets d'une meilleure valeur U et d'une plus mauvaise valeur g se compensent rapidement au-dessous de U = 1.1 W/m²K.**
– **Si des mesures architectoniques sont mises en œuvre de manière judicieuse, il est possible d'éviter le recours à des vitrages coûteux.**

Gains potentiels: jusqu'à **5%**

Surcoût: **minime à élevé**

Figure 3.5 : Un indicateur de performance : Indicateur sur le type de vitrage [Minergie'2007]

[16] FTP : Procédures de vérification de performances

- ***Un indicateur de précision,*** donne plus de précision sur une tâche, telle que l'énumération des composants d'un dossier (d'aide mémoire) (Cf. Figure 3.6).

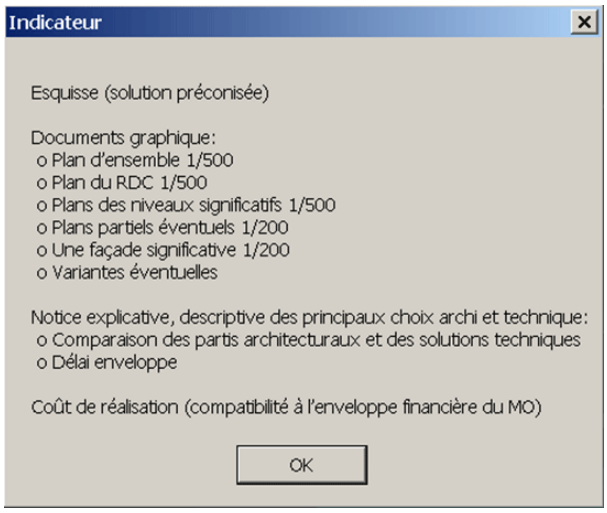


Figure 3.6 : Un indicateur de précision : Rappel des composants du dossier esquisse

- ***Un indicateur de rappel,*** permet de rappeler au commissionnaire une valeur de référence de la réglementation par exemple. Tout comme le plan de commissionnement, un indicateur dépend du niveau de commissionnement et de la performance escomptée (Cf. Figure 3.7).

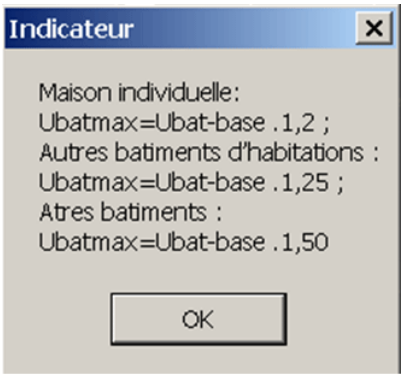


Figure 3.7 : Un indicateur de rappel : valeur Ubatmax dans la RT2005

1.2 IMPLÉMENTATION DE LA BASE DE DONNÉES DE TÂCHES DE COMMISSIONNEMENT

Cette recherche se limite à illustrer de manière non exhaustive le type de plan de commissionnement souhaité. Cet outil sera mis par la suite entre les mains d'experts de chaque domaine qui seront habilités à remplir la base de données en intégrant l'ensemble des vérifications nécessaires au bon déroulement du projet.

Le nombre important de tâches de commissionnement et l'interaction des domaines considérés peuvent rendre complexe le renseignement de la base de donnée. Pour éviter les doublons et les incohérences, il est nécessaire de tenir compte :

1. **de la complexité liée à ce type de bâtiments et des contradictions possibles :** de grandes baies vitrées orientées sud par exemple vont favoriser les économies de chauffage en hiver et d'éclairage, mais risquent de poser des problèmes de confort d'été et de déperdition. Il est donc important de tenir compte de ces deux éventualités lors de la définition des tâches de commissionnement. Une des possibilités serait de regrouper les tâches par thèmes (ouvertures par exemple) et de les hiérarchiser, ou de les gérer avec un deuxième outil.

2. **des recoupements entre différents domaines :** tel qu'architecture et enveloppe par exemple, dans lesquels il faudrait faire attention à ne pas dédoubler les tâches liées à l'enveloppe du bâtiment, telles que le pourcentage et l'orientation des ouvertures,

3. **de la complémentarité entre les domaines :** il est important de mettre en évidence dans la base de données la complémentarité entre des domaines différents, Par exemple, la tâche : vérifier la mise en place de brise-soleil dans les façades sud pour réduire les besoins de rafraîchissement, présente dans le domaine enveloppe et la tâche vérifier l'optimisation du système de rafraîchissement en fonction des choix de l'enveloppe et de la conception architecturale, présente dans le domaine système

L'ensemble des tâches de commissionnement ainsi que les indicateurs qui leurs sont rattachés sont classés dans les tables d'une base de données Access (Microsoft) suivant leur domaine d'application et les critères de sélection. Ainsi, ces tâches sont réparties dans cinq tables :

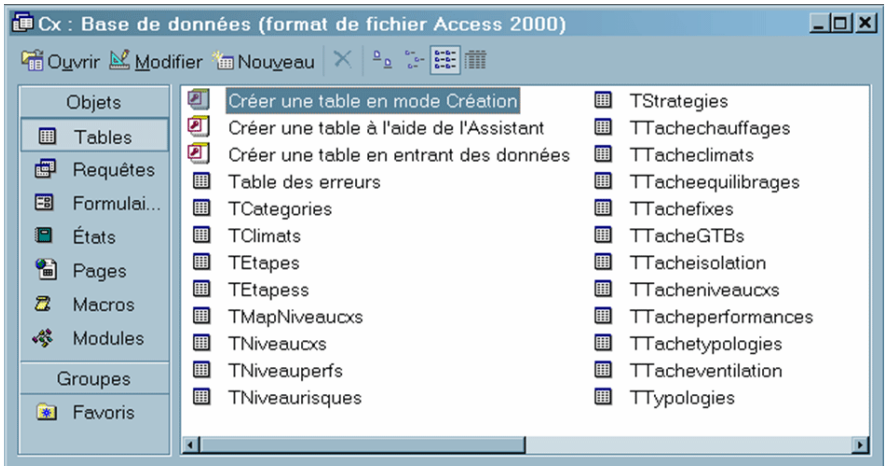


Figure 3.8 : Liste des tables de la base de données

Dans la table Ttachefixes sont classées les tâches communes à tous types de bâtiments quels que soient les critères sélectionnés. Il s'agit principalement des tâches de gestion, et quelques tâches liées au domaine.

La table Ttachetypologies regroupe les tâches qui varient en fonction du type du bâtiment (bâtiment faisant ou ne faisant pas appel à des technologies nouvelles).

La table Ttacheperformances regroupe les tâches qui varient en fonction du type du bâtiment et du niveau de performance.

La table Ttacheniveaucxs regroupe les tâches qui varient en fonction du niveau de commissionnement (bas, moyen et élevé).

La table Ttacheclimats regroupe les tâches qui varient en fonction du type du bâtiment et du climat.

Des requêtes sur Access permettent d'obtenir une liste de tâches de commissionnement en fonction des caractéristiques d'un projet. Pour faciliter l'accès aux listes de tâches, un outil informatique a été implémenté sous Visual Basic.

2. IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE DE L'OUTIL STATIQUE

Cette section présente l'architecture ainsi que les possibilités qu'offre cet outil informatique.

2.1 ARCHITECTURE ET APPLICATION DU PROTOTYPE D'OUTIL STATIQUE

Un prototype d'outil a été implémenté pour faciliter l'exploitation de la base de données de tâches de commissionnement. Son architecture a été organisée selon la structure illustrée dans la Figure 3.9. Ce prototype se veut clair et dynamique de manière à avoir des plans de commissionnement par phases du processus de conception ou par domaine (gestion, architecture, enveloppe, système, énergie).

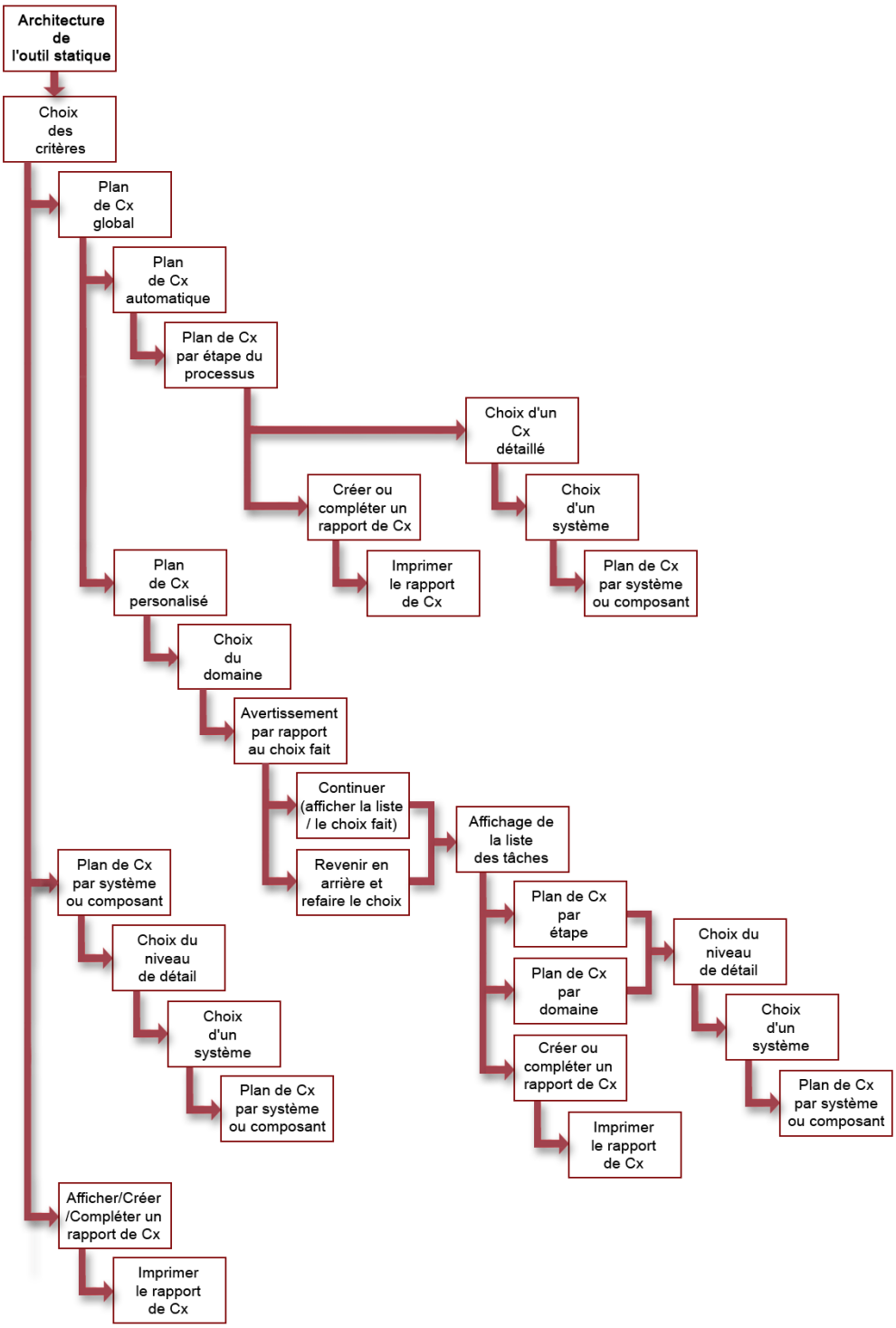


Figure 3.9 : Architecture de l'outil statique

Au niveau de ses fonctions, cette outil permet de :

- Afficher un plan de commissionnement par phase du processus de réalisation et pour tous les domaines, suivant les critères décrit dans la Figure 3.10 : le niveau de performance, le niveau de commissionnement, la phase du processus de conception, la zone climatique, le degré d'intégration de systèmes techniques dans le bâtiment, l'échelle à commissionner.

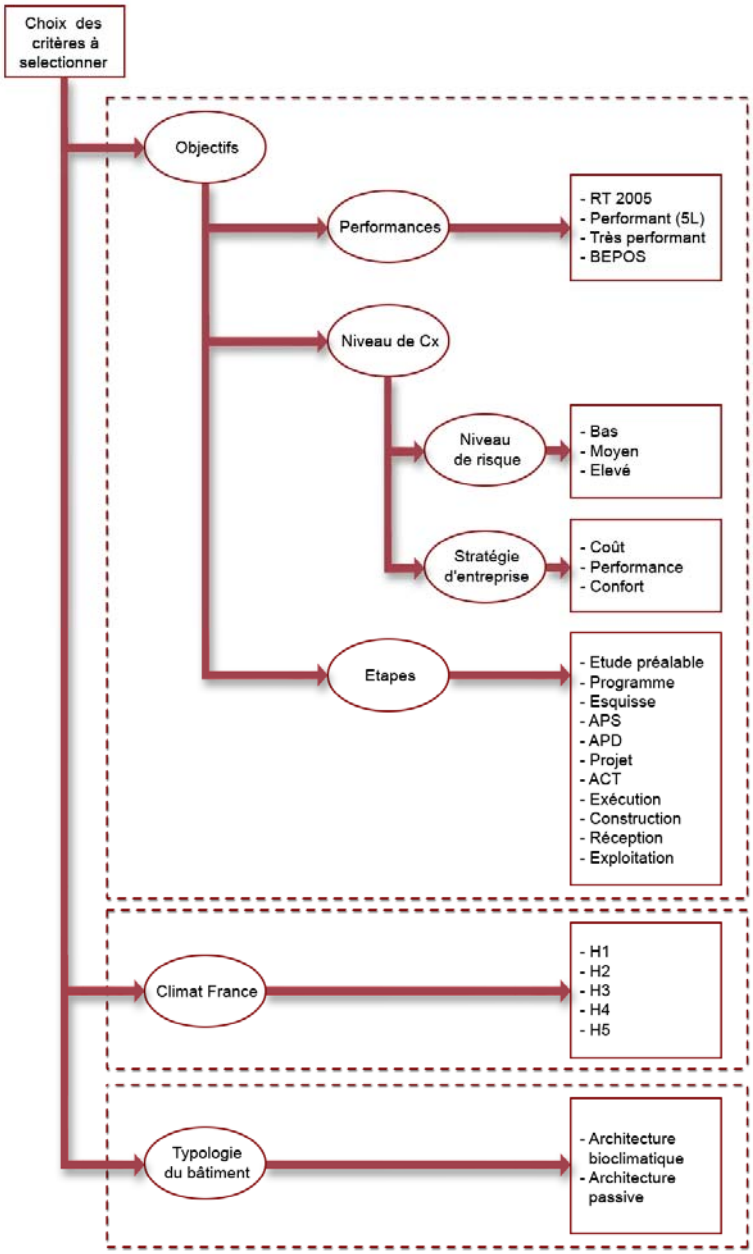


Figure 3.10 : Critères de sélection

- Définir des plans de commissionnement à différentes échelles (Cf. Figure 3.11) :
  - globale,
  - par système (enveloppe, système, source et production d'énergie),
  - par composant.

Un exemple de plan de commissionnement du système réalisé dans le cadre de l'annexe 40 de l'AIE est présenté dans l'annexe 3.

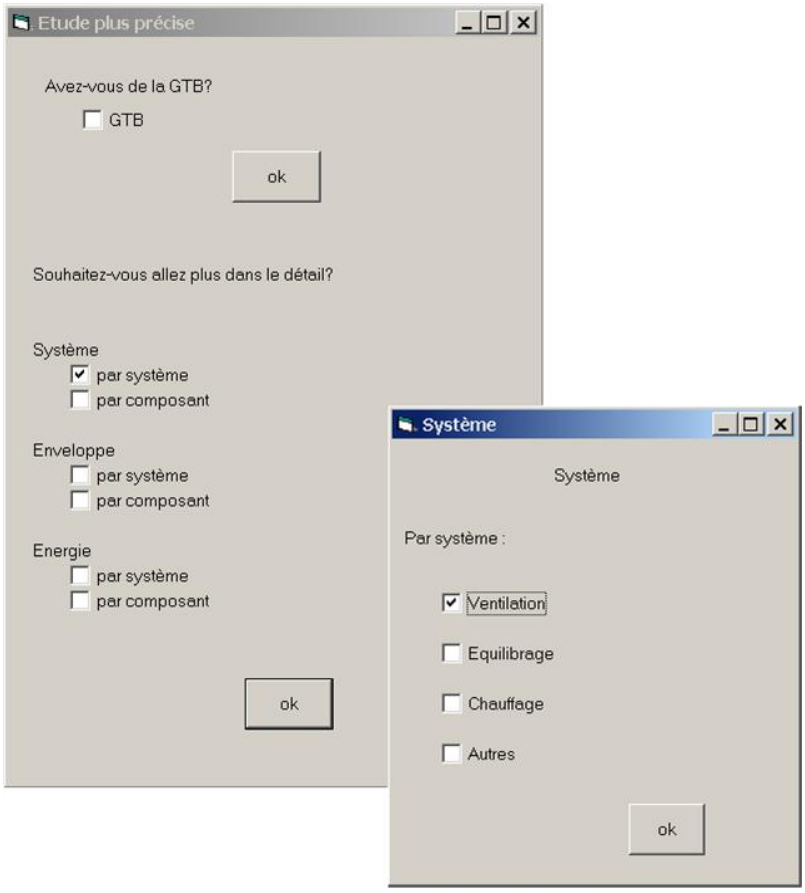


Figure 3.11 : Illustration du choix de l'échelle de détail du commissionnement

- Personnaliser la liste de tâches en fonction des domaines que le commissionnaire a décidé d'évaluer (dans le cas où celui-ci juge qu'ils méritent une d'attention particulière), cette liste s'affichera pour toutes les phases de conception, suivant les critères énumérés plus haut (Cf. Figure 3.12).

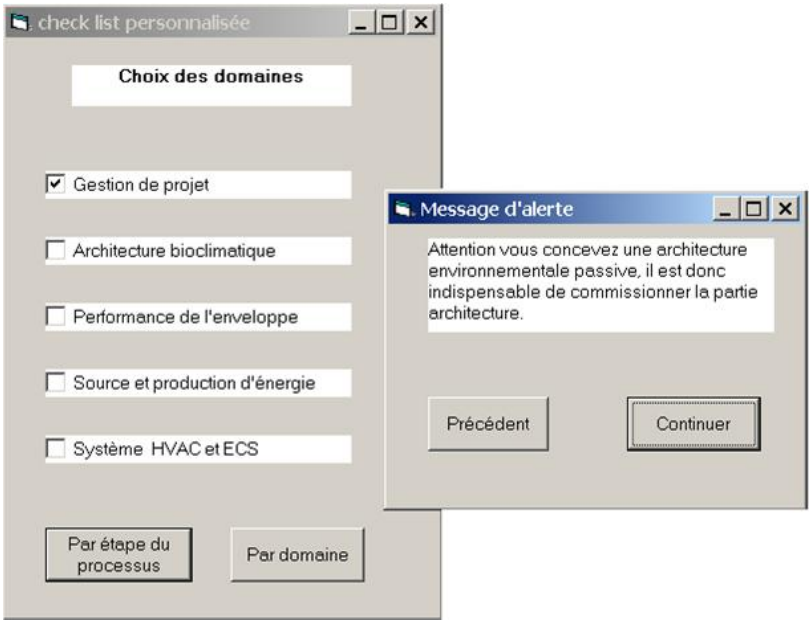


Figure 3.12 : Illustration du choix du domaine à commissionner et du message d'alerte

Un exemple de plan de commissionnement par domaine est présenté dans l'Annexe 4.

- Emettre un message d'alerte dans le cas d'omission par le commissionnaire du domaine qui correspond au type de bâtiment à commissionner. Dans le cas où le bâtiment à traiter se base sur une architecture bioclimatique par exemple et que le commissionnaire ne sélectionne pas le domaine architecture, une alerte est émise telle que le montre la Figure 3.13.
- Vérifier l'état du commissionnement (si toutes les tâches sont réalisées ou pas) (Cf. Figure 3.14 et Annexe 3)
- Noter par projet et pour chaque phase de sa conception des commentaires et les imprimer (Cf. Figure 3.15).

2.2 UTILISATION DE L'OUTIL STATIQUE

Le plan de commissionnement initial représenté dans la Figure 3.14 illustre une liste regroupant des tâches de commissionnement globales et dites automatiques (qui décrit l'ensemble des tâches à réaliser pour une phase donnée du processus et pour tous les domaines). Les tâches nécessitant des précisions sont reliées à des indicateurs (qui apparaissent en bleu sur cette figure). L'accès à une évaluation plus précise pour les trois sous domaines (enveloppe, système, énergie) peut se faire à deux niveaux : 1) à partir de la première fenêtre illustrée dans la Figure 3.13, ou 2) à partir de la fenêtre affichant la liste de tâche, en cliquant sur la touche «plus de précision» (Cf. Figure 3.14).

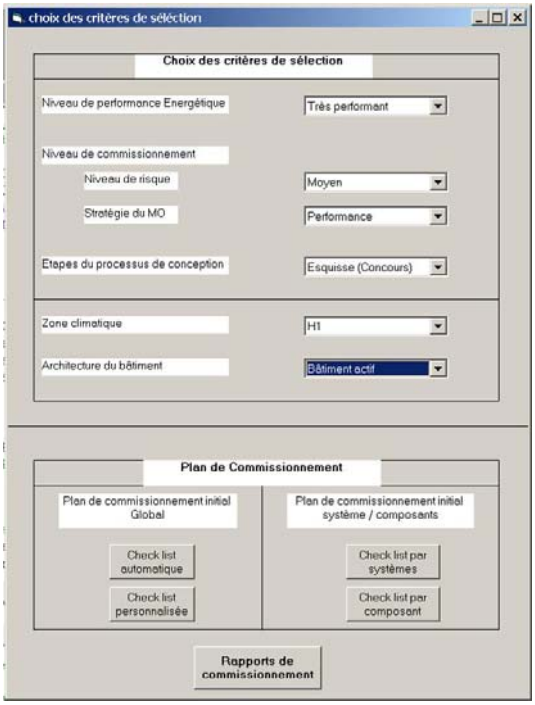


Figure 3.13 : Illustration de la première fenêtre de l'outil où les caractéristiques du projet sont sélectionnées

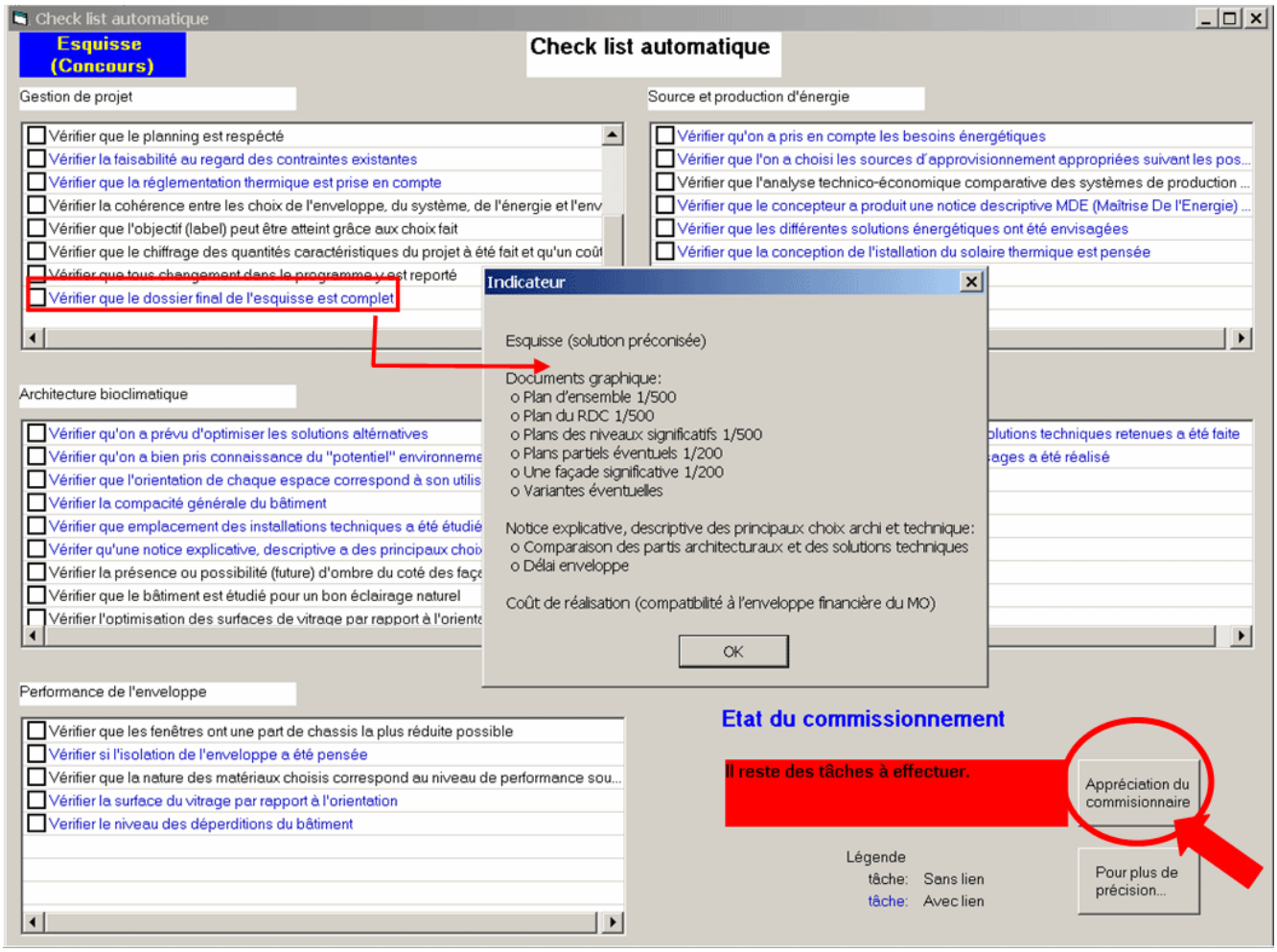


Figure 3.14 : Plan de commissionnement automatique

Le commissionnaire a la possibilité d'apporter pour chaque phase ou domaine commissionné des commentaires sur le résultat de sa mission. Cette option lui permet de mettre en place un historique, et de garder une traçabilité du commissionnement réalisé.

Une convention de couleurs a été définie pour permettre au commissionnaire d'émettre un avis général sur le résultat du commissionnement de la phase en cours, avec la possibilité d'y ajouter un commentaire si nécessaire (Cf. Figure 3.15) :

- vert pour un résultat satisfaisant du commissionnement du projet,
- orange pour un bon résultat mais nécessitant quelques révisions,
- rouge pour un résultat insatisfaisant.

Ces commentaires sont enregistrés dans un document TXT, classé dans un répertoire propre au projet en cours. Ce tableau de bord servira comme un outil de suivi du projet et de base de discussions avec le maître d'ouvrage (Cf. Figure 3.15).

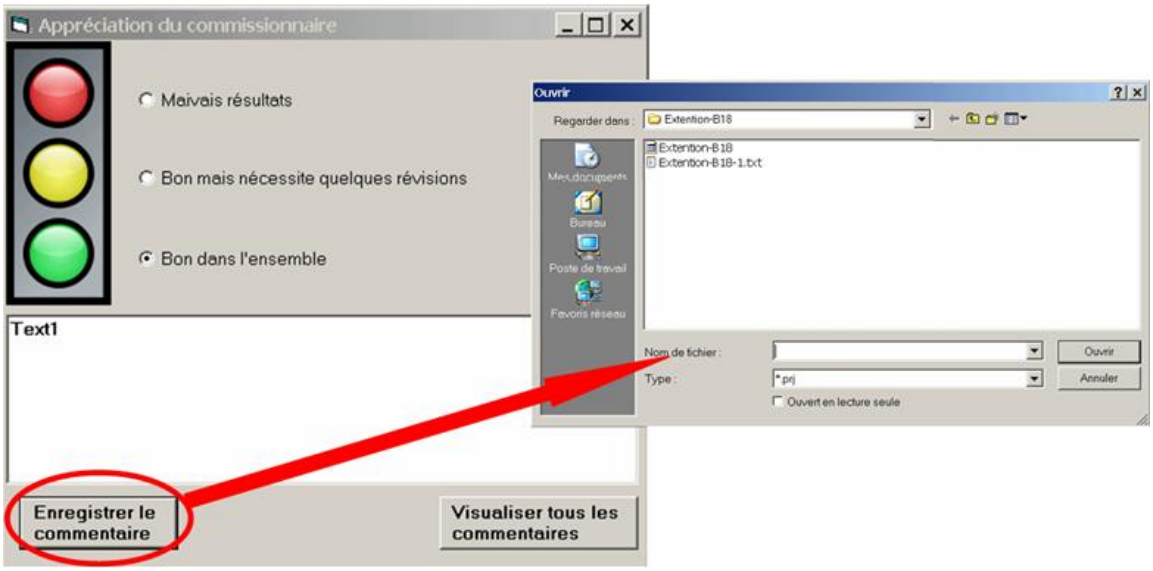


Figure 3.15 : Mise en place du rapport de commissionnement

3. CONFRONTATION DE L'OUTIL STATIQUE AVEC DES EXPERTS

Pour faire évoluer cet outil et le valider, une série de présentations et d'interviews auprès d'utilisateurs potentiels et d'experts en bâtiments à faible consommation d'énergie ont été faits. Cette confrontation a permis de retrouver les limites de cet outil et de le faire évoluer. Parmi ces acteurs :

- un maître d'ouvrage (M. Weinberg - CSTB),
- un architecte maître d'œuvre (M. J-Y.Dorosz),
- trois experts en bâtiment à faible consommation d'énergie (et thermique du bâtiment) (M. E. Fleury, M. H. Lahmidi - CSTB et M. A. Husaunndee - Veolia),
- un expert en procédure d'évaluation de la haute qualité Environnementale du bâtiment (Mme S. Nibel -CSTB),
- un expert en RT2005 (Mme. R. Lahrech).

Cette confrontation s'est faite en plusieurs étapes (Cf. Figure 3.16). Elle a commencé par une présentation de l'outil aux différents experts lors d'une réunion, où une première opinion sur sa structure a été recueillie. Ensuite, une présentation des exemples apportés dans le remplissage de la base de données a été faite afin de recueillir les commentaires et recommandations au sujet du type de tâches qui doivent y être intégrées et le recensement des contradictions ou les regroupements possibles. L'analyse des résultats de chaque confrontation a été faite et synthétisée afin d'apporter les améliorations nécessaires à l'outil.

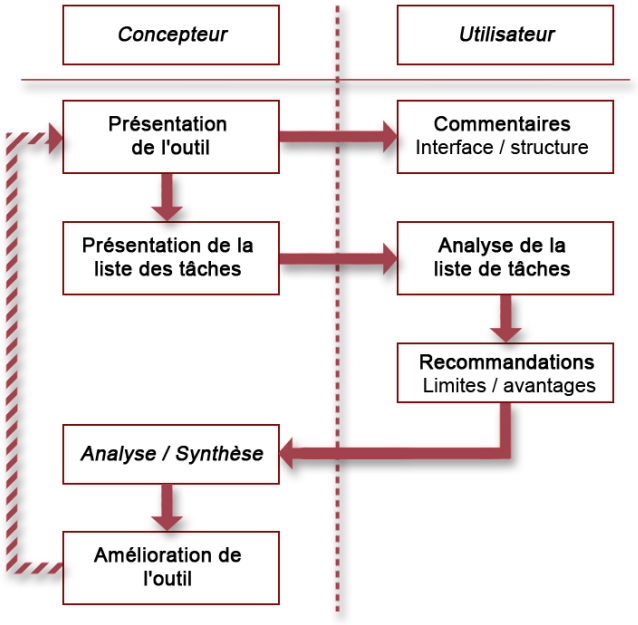


Figure 3.16 : Schématisation de la procédure de confrontation

Parmi les remarques et les questions qui reviennent le plus lors de ces confrontations :

- Comment traiter la différence entre le neuf et la réhabilitation ?
- A qui est il destiné, étant donné que le commissionnaire n'existe pas encore en France ? Le contrôleur technique, le maître d'ouvrage, l'assistant à maîtrise d'ouvrage, autres ?
- C'est une méthodologie structurante et qui pourrait faciliter la mission de l'assistant à maîtrise d'ouvrage.
- Elle peut être lourde et redondante étant donné que toute cette connaissance est le plus souvent acquise par les acteurs du bâtiment.

Les remarques les plus liées à la structure et à la base de données :

- Comment traiter les possibles croisements et redondances entre les différents domaines ? (précision apportée dans Cf. § 3-1.2)
- Donner plus de possibilités quand au choix d'affichage du plan par domaine ou par phase (amélioration apportée).

Certaines réponses ont déjà été données dans les premiers chapitres de cette thèse, telles que celle qui pose le problème du destinataire éventuel de l'outil, (Cf. § 1-2.4). Pour ce qui est de la manière dont cet outil peut traiter les deux cas réhabilitation et construction neuve, il suffit d'ajouter un critère de choix tel que le présente la Figure 3.17 et d'aménager les tables de la base de données de telle sorte qu'elles éliminent ou ajoutent des tâches suivant le type d'opération traitée.

Dans le cas d'une réhabilitation il est nécessaire de vérifier s'il est possible d'intervenir au niveau de la façade, et à quel degré par exemple.

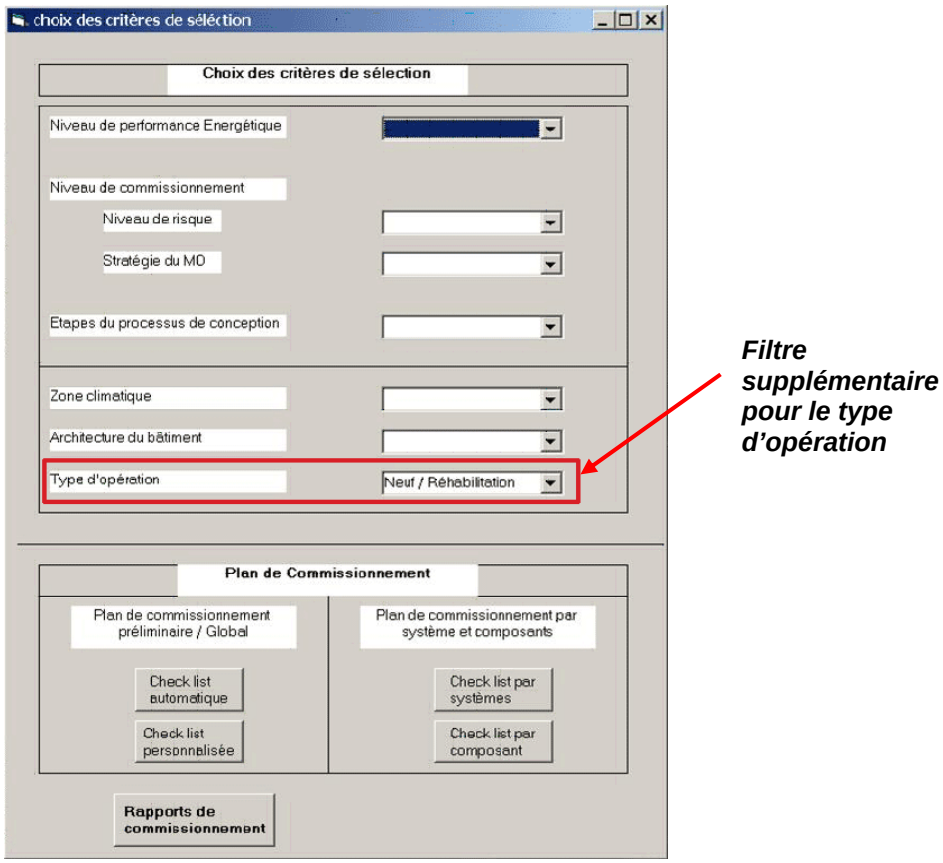


Figure 3.17 : Représentation des possibilités d'extension de l'outil dynamique (ajouts de critères de sélection tel que le type d'opération à réaliser)

4. CONCLUSION

Le prototype d'outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement initial est un outil qui vise à faciliter la tâche du commissionnaire en lui permettant d'extraire à partir d'une base de données exhaustive, un plan de commissionnement pour chaque phase du processus de conception. Ce plan correspond au niveau de performance énergétique souhaité par le maître d'ouvrage, et aux caractéristiques du projet.

Tout d'abord, une structuration de la base de données a été mise en place. Cette structure tient compte des aspects caractérisant un bâtiment à faible consommation d'énergie, de la volonté de la maîtrise d'ouvrage : la performance, le niveau de risque, la stratégie du maître d'ouvrage, et du domaine à commissionner (gestion de projet et performance énergétique). Par la suite, un travail d'exploration dans la littérature ainsi qu'auprès d'experts a permis de remplir cette base de données pour illustrer ce travail. L'objectif de cette recherche est de décrire une méthodologie qui à terme, devra être confiée à des experts qui la compléteront de manière exhaustive.

Afin de faciliter au commissionnaire l'exploitation de cette base de données, un outil informatique a été implémenté.

Enfin, cet outil peut évoluer suivant les besoins. Il est possible d'y intégrer d'autres critères tels que le type d'opération, le secteur du bâtiment etc. Il est également possible d'enrichir la base de données par le commissionnaire dès qu'il constate un problème qui se répète. Cet outil a été présenté à un groupe d'utilisateurs potentiels et d'experts du domaine de l'efficacité énergétique du bâtiment. Un ensemble de remarques a été collecté et a permis de l'améliorer.

Cet outil permet de classifier ces tâches et de fournir des plans génériques qui peuvent être dans certains cas trop importants et rendre la mission de commissionnaire laborieuse. D'un autre coté, seul, cet outil ne peut pas gérer tous les changements et imprévus qui ont lieu lors de la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie ainsi que la particularité de chaque projet et les contradictions qui peuvent être retrouvés dans la base de données. C'est pour cela que le choix a été fait de développer un deuxième outil dit dynamique qui permet d'adapter ce plan aux particularités de chaque projet, et de gérer certains dédoublements qui peuvent apparaître dans la base de données.

A cet effet, le chapitre suivant décrit un prototype d'outil qui permet d'adapter et d'optimiser le plan de commissionnement initial.

CHAPITRE 4

IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE À LA MISE À JOUR DU PLAN DE COMMISSIONNEMENT INITIAL

Ce chapitre présente l'implémentation du prototype d'outil d'assistance à la mise à jour du plan de commissionnement initial dit «outil dynamique». Cette mise à jour permet d'adapter le plan de commissionnement aux particularités d'un projet, pour plusieurs raisons : pour gérer les imprévus, en cas de changements d'objectifs du projet, pour mettre en évidence les spécificités d'un projet, pour faciliter le commissionnement détaillé d'un projet, ou pour gérer certaines difficultés rencontrées dans l'organisation de la base de données.

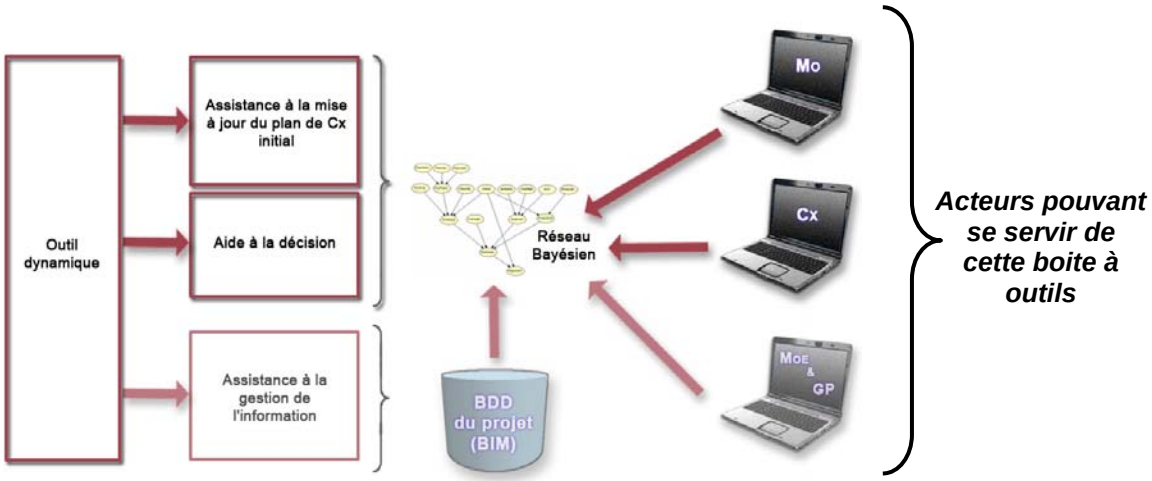


Figure 4.1 : Description de l'outil dynamique : Outil d'assistance à la mise à jour du plan de commissionnement initial

1. CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DYNAMIQUE

L'outil dynamique a pour objectif d'adapter le plan de commissionnement initial aux particularités d'un projet. Il permet d'anticiper les dérives dues aux difficultés de communication entre les différents acteurs, aux pertes d'informations, à l'apparition de situations particulières en cours de réalisation en prévoyant leur impact sur la performance énergétique. Cet outil peut, suivant les situations, générer (dans le cas où il est nécessaire de commissionner plus scrupuleusement) ou supprimer des tâches de commissionnement.

Cette mise à jour est faite suite à un diagnostic rapide des choix et des modifications apportées en cours de projet. De nombreuses méthodes et outils existants traitent du diagnostic des performances énergétiques. Parmi elles, trois sont décrites dans la section suivante.

1.1 OUTILS DE DIAGNOSTIC DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES EXISTANTS

Il existe plusieurs possibilités pour diagnostiquer les performances énergétiques d'un bâtiment. Celles-ci varient suivant le niveau de précision désiré et leur utilité. Parmi ces méthodes :

- la simulation numérique,
- le diagnostic énergétique simplifié,
- le diagnostic probabiliste.

1.1.1 MÉTHODES ET OUTILS DE SIMULATION NUMÉRIQUE

Les outils de simulation numériques sont devenus des moyens incontournables dès qu'il s'agit de l'utilisation rationnelle de l'énergie et de l'optimisation et du test de la performance énergétique de bâtiments. Ces outils, présents sous forme de logiciels d'évaluation des consommations énergétiques ou codes de calcul détaillés pour la conception et la compréhension de phénomènes, jouent un rôle important dans l'accompagnement des décideurs tout au long du processus de conception (pour l'évaluation et la validation de leurs choix).

Ces outils de simulation consistent en la modélisation de phénomènes physiques. Ils peuvent être : 1) simplifiés tels que dans la méthode Th-CE de la RT 2005 [RT'2005], pour laquelle les modèles ainsi que les méthodes de calcul sont prédéfinies, et où il n'y a que les paramètres qu'il est possible de faire varier pour vérifier si les consommations sont réglementaires ; ou 2) détaillés tels que dans des outils comme SIMBAD [SIMBAD'2001] ou TRNSYS [TRNSYS'2005] dans lesquels il est possible d'agir sur les modèles (en développant de nouveaux ou en les modifiant) et les paramètres.

Bien que très performants ces outils ne permettent pas de réaliser un diagnostic rapide, car [CRAW'1998] [Hauglustaine'2001] [CEN'1998] :

- Ils sont trop précis et demandent une quantité de données très importante, ce qui rend leur utilisation longue et fastidieuse, et surtout réservée à des experts du domaine. Sans oublier le fait que leur rentabilité n'est réelle que lors de phases avancées du projet (pour disposer des informations nécessaires).

- L'aspect technique de ces modèles étant très présent, il n'encourage pas les non experts à s'y aventurer.

- Ils traitent le plus souvent l'aspect performance énergétique et confort et négligent l'aspect coût.

1.1.2 MÉTHODES ET OUTILS DE DIAGNOSTIC SIMPLIFIÉS

Des méthodes conventionnelles de calcul simplifié ont été mises à disposition de personnes chargées d'établir des diagnostics de performance énergétique (DPE). Parmi les trois méthodes proposées par l'arrêté du 15 Septembre 2006 [Arrêté'2006], la méthode annuelle simplifiée, dite 3CL-DPE (Calcul Conventionnel des Consommations des Logements). Cet outil est développé dans un tableur EXCEL avec macro VBA, permet facilement d'établir un diagnostic qui fournit les consommations en chauffage, ECS (Eau Chaude Sanitaire), climatisation, etc. ainsi que le coût des consommations par type d'utilisation.

Bien que conviviale et répondant à certaines des limites recensées dans les précédentes méthodes (limites par rapport à la problématique émise dans cette thèse), une telle méthode nécessite néanmoins que le projet soit bien avancé pour pouvoir en faire une estimation fiable.

1.1.3 MÉTHODES ET OUTILS DE DIAGNOSTIC PROBABILISTE

Un troisième type de méthodes de diagnostic utilise les probabilités. De nombreux domaines, nécessitant le diagnostic lié à des études multicritères, ont eu recours à ce type de solution tels que la médecine, l'armée et la finance. Les travaux intégrant les probabilités dans l'évaluation des performances énergétiques dans le domaine du bâtiment se sont concentrés sur l'évaluation des systèmes. Les recherches réalisées dans les années 90 par [Kreider'1996] visaient des diagnostics en ligne pour les systèmes HVAC. Ils utilisaient les réseaux neuronaux et les réseaux de conviction probabiliste pour identifier des défauts. Ce qui leur a permis de faire de l'évaluation et d'aider à la décision en temps réel. D'autres travaux [Krarti'2003] ont utilisé les probabilités pour la détection de défaut et le diagnostic pour construire des systèmes d'énergie, sans pour autant aborder le bâtiment dans son ensemble.

Des études plus récentes réalisées par [Naticchia'2007], ont utilisé les réseaux Bayésiens dans le cadre de l'aide à la conception de bâtiment équipés de «*Roof pond*»[17]. Grâce à la structure causale explicite des réseaux Bayésiens, ils ont réussi à modéliser le comportement thermique très complexe des «*Roof pond*». L'avantage d'un tel modèle probabiliste est qu'il permet de faire face à plusieurs configurations de bâtiments et qu'il fournit aux architectes un outil d'aide à la décision multicritères simple d'utilisation.

Le choix s'est porté dans le cadre de cette thèse, sur un diagnostic rapide du projet basé sur les probabilités, et plus particulièrement les réseaux Bayésiens [Naïm'2004]. Cette solution permet de mettre en place un outil d'évaluation multicritères, accessible et convivial, peu coûteux en temps et en argent. Les réseaux Bayésiens mettent en relation les causes à leurs effets, et permettent de faire des diagnostics rapides à partir d'informations incomplètes - souvent le cas dans la phase amont de conception- (commissionnement). Ils donnent également la possibilité de déduire les caractéristiques du projet à modifier pour atteindre les performances (Aide à la décision). De plus, ce type de représentations est suffisamment simple et lisible pour être utilisé par des personnes non expertes dans tous les domaines intervenant dans la conception de bâtiments énergétiquement performants.

1.2 LES RÉSEAUX BAYESIENS, ENVIRONNEMENT DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DYNAMIQUE

Plusieurs domaines font appel aux probabilités : la médecine dans le cadre de diagnostics ou traitements médicaux ; les finances pour l'évaluation de crédit ; l'agronomie pour la production de plantes ; l'analyse d'erreurs ; etc. Le point commun entre ces différents domaines est qu'ils se caractérisent par des structures de cause à effet, où souvent les effets ne sont pas complètement déterminés ou connus (car un événement peut avoir plusieurs effets différents). Ce phénomène est appelé *incertitude causale «causal uncertainty*» [HelpHugin'2007]. Ce type de réseau permet également de diagnostiquer un problème dont seuls les symptômes (effets) sont connus pour retrouver leurs causes.

Les réseaux Bayésiens permettent donc de modéliser des domaines contenant des incertitudes qui peuvent être dues à une compréhension partielle ou à une information incomplète issue de ce domaine. Ils peuvent également être utilisés dans le cas d'un mécanisme à caractère aléatoire gouvernant un domaine, ou pour la combinaison de ces deux cas de figure.

[17] «Roofpond ou toit capteur» : système de récupération de chaleur latente voire http://www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/30.html

1.2.1 LE THÈORÈME DE BAYES

En théorie des probabilités, le théorème de Bayes énonce 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) [Naïm'2004].

Pour aboutir au théorème de Bayes, il est nécessaire de commencer par une des définitions de la probabilité conditionnelle :

$$P(A|B)P(B) = P(A \cap B) = P(B|A)P(A)$$

En notant $P(A \cap B)$ représente la probabilité que les événements A et B ont tous les deux eu lieux. En divisant de part et d'autre par P(B), on obtient le théorème de Bayes soit [Naïm'2004] :

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

- P(A) est la probabilité a priori de A. Elle est «antérieure» au sens qu'elle précède toute information sur B. P(A) est aussi appelée la probabilité marginale de A.
- P(A|B) est appelée la probabilité a posteriori de A sachant B (ou encore de A sous condition 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.
- P(B) est appelé la probabilité marginale ou a priori de B.

L'utilisation d'un réseau Bayésien peut être envisagée au même titre que d'autres modèles : réseaux de neurones, systèmes à base de règles, arbre de décisions, modèles d'analyse de données (régressions linéaires), etc. La section suivante présente ce qui a motivé le choix de cette solution.

1.2.2 FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE DE SOLUTIONS

Le choix de cette méthode est motivé- en dehors de la description apportée précédemment - par la facilité de mise en œuvre d'une solution, décrite par [Naïm'2004] comme suit :

1. *Facilité d'acquisition des connaissances* : La possibilité de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle (retour d'expérience, expertise, observations, etc.), car ces informations sont souvent insuffisantes individuellement pour fournir une représentation précise et réaliste du système analysé. Cette facilité d'acquisition est caractérisée par :

a. Un recueil d'expertises facilité

- Représentation intuitive des connaissances grâce à une relation des causes à des effets par des flèches. Pratiquement toute représentation graphique d'une connaissance peut se faire de la sorte.

- Facilité de représentation des connaissances sous forme de graphe causal par rapport à une base de règles. En effet, un système expert représente un processus de raisonnement qui conduit des observations de l'expert à sa conclusion. Or, un modèle fondé sur un graphe causal décrit la perception de l'expert du fonctionnement d'un système.

b. Un ensemble complet de méthodes d'apprentissage

- En l'absence de connaissance, il est possible de rechercher la structure du réseau la plus adaptée et de quantifier les relations entre les différentes variables du réseau grâce à l'apprentissage.

- En présence de connaissance, la structure de causalité se base sur cette connaissance pour définir les matrices de probabilités conditionnelles qui sont les paramètres du réseau.

- Ces méthodes peuvent être étendues dans le cadre de bases de données incomplètes. Dans l'optique de rechercher un compromis entre apprentissage et génération, il est également possible d'effectuer des apprentissages en contraignant la structure du réseau.

2. *Facilité de représentation des connaissances* : La représentation graphique est explicite, intuitive et compréhensible par un non spécialiste. Elle facilite à la fois la validation du modèle, son évolution et son utilisation.

3. *Facilité d'utilisation des connaissances* : Un réseau Bayésien est polyvalent. Il peut servir pour évaluer, diagnostiquer, prévoir ou optimiser des décisions, il est donc rentable.

4. *Qualité de l'offre en matière de logiciel :* Il existe de nombreux logiciels destinés à saisir et traiter les réseaux Bayésien. Ces logiciels présentent des fonctions plus ou moins évoluées telles que l'apprentissage des probabilités, de la structure du réseau Bayésien, la possibilité d'introduire les variables continues, des variables d'utilité et de décision, etc. Parmi les outils présents sur le marché, il y a : Hugin [Hugin'2007], Bayes Net Toolbox (BNT), BayeziaLab, Netica. L'outil choisi dans le cadre de cette étude est Hugin.

Une description de l'environnement de développement de cet outil est faite dans la section suivante.

1.2.3 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE SOUS L'ENVIRONNEMENT HUGIN

Hugin représente l'un des outils de construction de réseaux Bayésiens les plus connus et les plus utilisés. Il est édité par la société Danoise Hugin Expert A/S créée en 1989 [Hugin'2007]. Il est considéré comme l'un des produits les plus robustes et les plus simples à utiliser [Naïm'2004]. Il dispose d'algorithmes puissants et est facile à intégrer dans des applications existantes. Parmi ses nombreuses fonctionnalités : la possibilité de construire des bases de connaissances, des réseaux Bayésien orientés objet, l'apprentissage de structures et de paramètres. Cet outil permet deux types de représentations :

- une représentation qualitative par le biais de graphiques,
- une représentation quantitative par le biais de tables de probabilités conditionnelles.

Un réseau Bayésien est un réseau de nœuds connectés par des liens dirigés avec une fonction de probabilité attachée à chaque nœud. Le graphique d'un réseau Bayésien est un graphique acyclique dirigé (DAG) [HelpHugin'2007] (Cf. Figure 4.2). La représentation graphique se fait par :

- des nœuds discrets,
- des nœuds continus,
- des nœuds de décision,
- des nœuds d'utilité.

Un nœud représente une variable aléatoire avec un nombre fini (discret) ou non fini (continu) d'états. Le lien entre ces nœuds est la représentation d'une relation causale. Si un nœud est discret, il doit contenir toutes les probabilités sur les états de la variable qu'il représente (ses parents). S'il est continu, il contiendra une densité de fonction gaussienne de la variable aléatoire qu'il représente. Dans le cadre de ce travail, il s'agit de construire un réseau Bayésien à variables discrètes.

La construction d'un réseau Bayésien à variables discrètes s'effectue en définissant graphiquement l'architecture des réseaux et en renseignant les tables de probabilités (Cf. Figure 4.2). Lors de la saisie de ces tables, il est possible de définir des nœuds comme une expression arithmétique ou logique de l'état des parents (Cf. § 4-2.3.3). Le nombre de cellules dans une table de probabilités pour un nœud discret est égal au produit du nombre d'états possibles pour le nœud et le nombre d'états possibles de ses parents.

Les réseaux Bayésiens qui ne contiennent que des relations causales entre les variables, sont connus sous le nom de «Réseaux Bayésiens statiques» (SBNs). Ces modèles prennent en charge des situations statiques et ne prennent pas en charge la dimension temporelle *«le passé est négligé et l'avenir n'est pas prédit»* [HelpHugin'2007].

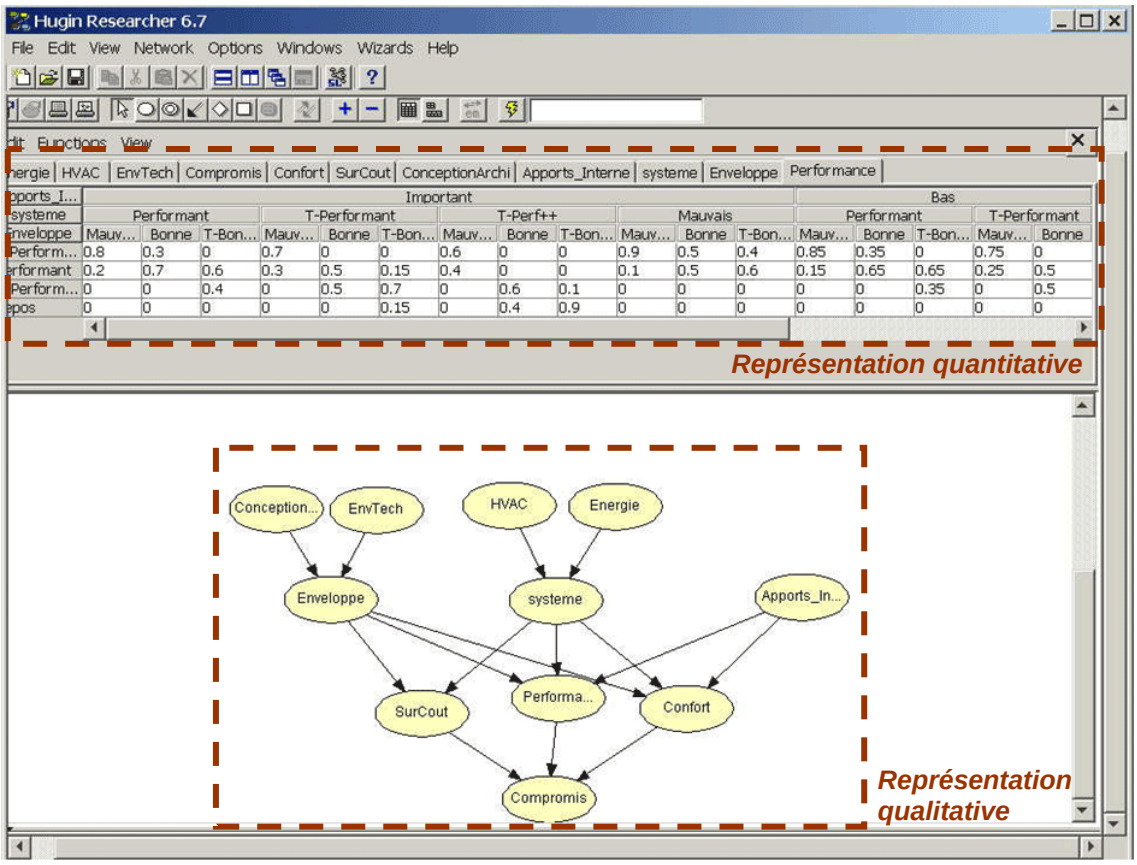


Figure 4.2 : Définition d'un réseau Bayésien et de ses tables de probabilités conditionnelles grâce à l'éditeur graphique Hugin

Dans beaucoup de domaines tels que le domaine médical, il est presque inconcevable de représenter des données et la relation entre elles sans utiliser une dimension temporelle, étant donné que les choses évoluent dans le temps. Ainsi, le réseau doit être augmenté pour inclure l'information temporelle. De tels réseaux sont connus sous le nom de "Réseaux Bayésiens Dynamiques" (DBN). La façon la plus simple pour étendre un Réseaux Bayésiens statiques vers un Réseaux Bayésiens Dynamiques est d'y ajouter plusieurs instances (les tranches de temps) du SBN et de les relier entre elles.

Un diagramme d'influence est un réseau Bayésien augmenté de nœuds de décision et d'utilité. Les variables aléatoires d'un diagramme d'influence sont appelées *«Chance variable*» ou variables de possibilité. Un lien avec un nœud de décision indique *«a time presedenc »* ou une priorité de temps, c'est-à-dire que si une variable aléatoire est connectée à une variable de décision, celle-ci ne sera connue que lorsque la décision sera prise. Un lien entre une variable de décision et une autre indique l'ordre de la prise de décision.

Pour optimiser la décision, des utilités «*spécifications*» sont associées suivant l'état du réseau. Chaque nœud d'utilité a une fonction qui associe pour chaque configuration de parents une spécification. Le Moteur de Décision de Hugin calcule ces utilités en supposant que toutes les décisions futures seront prises de manière optimale (utilisant toute preuve disponible lors de la prise de chaque décision).

Ce type de diagramme est plus approprié dans le cadre d'aide aux choix. Il pourrait éventuellement être utilisé dans le cadre du commissionnement dans le cas où il est prévu d'agir sur les conséquences de certaines décisions. Par exemple, lorsque le commissionnaire décide d'anticiper les prises de décision de la maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage (si le maître de l'œuvre diminue l'épaisseur de l'isolant, il diminuera la performance).

L'utilisation d'un outil de diagnostic basé sur les réseaux Bayésiens dans le cadre d'un projet de construction en cours a plusieurs avantages :

- Il permet de connaître la valeur la plus probable d'un nœud (représentant un élément de la conception du projet) en fonction des informations connues.
- Il permet d'obtenir l'impact de certains choix sur l'ensemble des variables. Ce résultat pouvant être affiné en ajoutant de nouvelles informations.
- Il permet de connaître la cause la plus probable d'un effet donné en terme d'inférence. Cette requête s'appelle «l'explication la plus probable».

- Il permet de faire des analyses de sensibilité par rapport à une information : il mesure comment la probabilité d'une hypothèse s'accroît par rapport a une observation (ce qui permet de classer les observations ou hypothèses : inutiles, suffisante ou cruciales).

- Il permet de déterminer l'action la plus appropriée à effectuer, ou l'information la plus pertinente à rechercher. En effet, ce mécanisme de propagation permet de retrouver la donnée dont la connaissance apporterait le plus d'informations. Dans le cas ou une recherche a un coût, il est possible de retrouver la solution optimale en tenant compte de ce coût. Il est notamment possible de retrouver une séquence optimale d'actions ou de requêtes à faire.

1.2.4 APPRÉCIATION QUALITATIVE ET PROBABILITÉS

Le renseignement des tables de probabilités associées aux différentes variables s'est fait grâce à la connaissance des experts. Ces travaux ont été réalisés dans les deux cas suivant : 1) dans le cas de variables ne possèdant pas de parents, une loi de probabilité marginale est définie, 2) dans le cas ou elle possède des parents, la dépendance de cette variable avec les variables parents est exprimée, soit au moyen de probabilités conditionnelles, soit par une équation déterministe, que le logiciel convertira par la suite en probabilités.

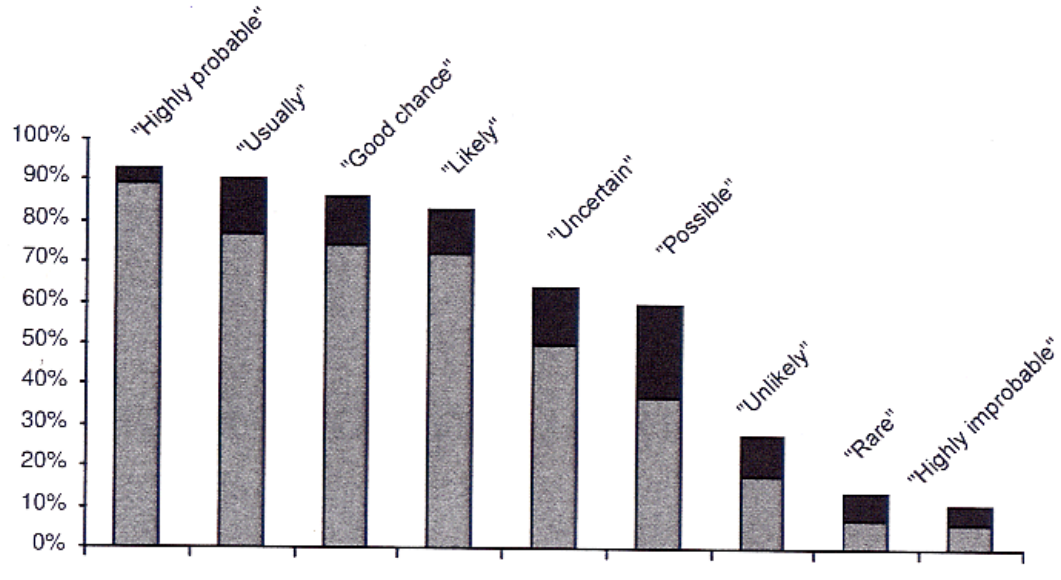


Figure 4.3 : Correspondance entre appréciations qualitatives et probabilités

La quantification de ces lois de probabilités auprés des experts est une étape délicate. Après une discussion approfondie, il a été possible d'aboutir à des appréciations qualitatives. Celles-ci sont exprimées par des «*il est probable que*» ces systèmes permettent d'atteindre les performances, là il est «*fortement improbable*» que ce type de fenêtre facilite l'atteinte de telle performance, etc. Pour quantifier ces réponses, une table de conversion d'appréciation qualitative en probabilités a été utilisée. La Figure 4.3 représente une partie de cette table la partie foncée de chaque barre représente les marges d'erreur associées à chaque probabilité [Naïm'2004].

Dans le cas d'absence d'informations concernant la loi de probabilité d'une variable, une loi arbitraire lui est affectée telle qu'une loi uniforme, option prise dans ce travail.

Le réseau labels développé dans cette thèse peut être exploité par une grande partie des métiers du bâtiment tel que le présente la section suivante.

1.3 LES APPLICATIONS DE L'OUTIL DYNAMIQUE DANS LE BÂTIMENT

Un diagramme d'influences des composants sur les performances énergétiques d'un bâtiment développé grâce à un réseau Bayésien peut être utilisé par différents acteurs du bâtiment, et durant différentes phases du processus. Telle que l'illustre la Figure 4.4, chronologiquement : la maîtrise d'ouvrage peut utiliser ce réseau pour l'assister lors de la définition du programme ; la maîtrise d'œuvre pour faire les choix les plus appropriés pour répondre aux objectifs de performance énergétique, de confort et de budget décrits dans le programme ; le gestionnaire de patrimoine, pour faire des choix adaptés en cas de rénovation ou changement d'activité ; et enfin par le commissionnaire tout au long du cycle de vie du bâtiment pour évaluer la faisabilité du programme, l'efficacité des choix réalisés, la robustesse du bâtiment et veiller au bon déroulement du processus de réalisation du bâtiment en émettant des alertes dès l'apparition de dérives.

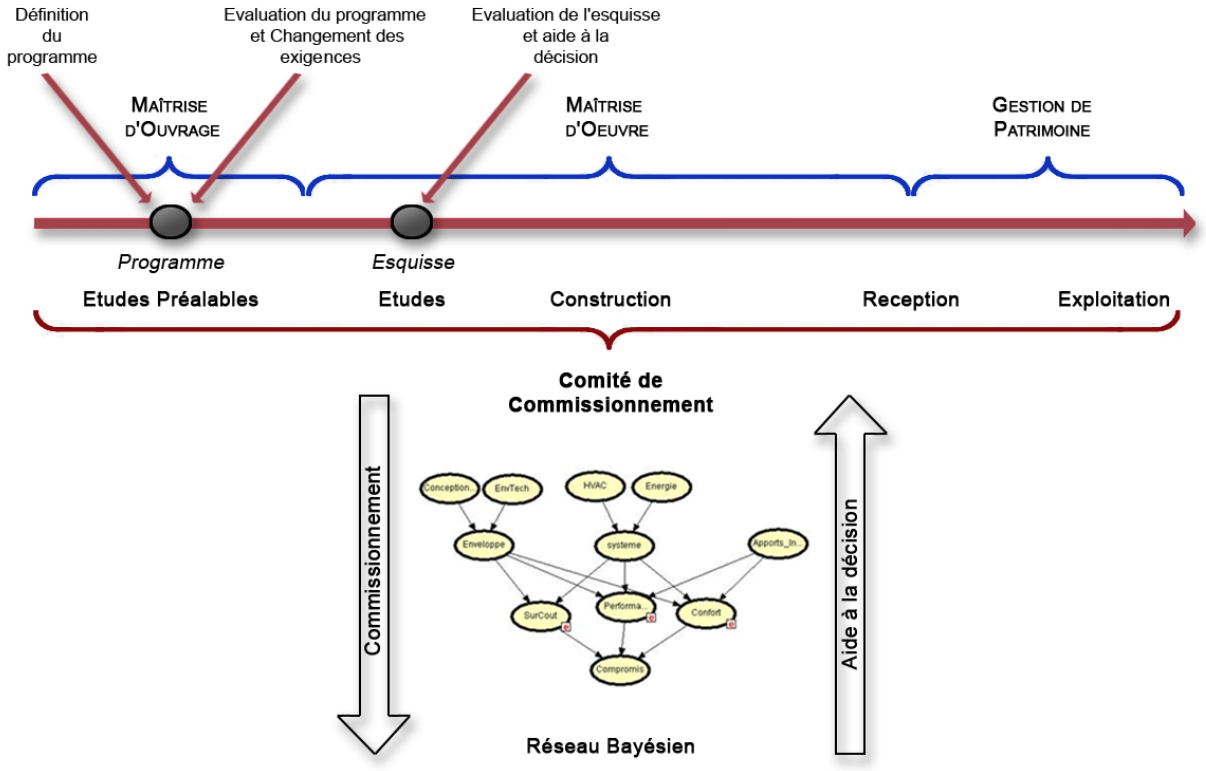


Figure 4.4 : Un réseau Bayésien pour plusieurs utilisateurs

L'intérêt d'un tel réseau est qu'il permet de capitaliser la connaissance qui le constitue, en l'exploitant dans différentes situations. Il est donc possible de l'utiliser du haut vers le bas pour réaliser des opérations de diagnostic et de commissionnement en intégrant les choix faits dans les nœuds supérieurs et en observant leur impact sur les nœuds inférieurs (qui représentent les critères d'évaluation), et du bas vers le haut pour l'aide à la décision, en fixant les besoins et contraintes définies par le maître d'ouvrage dans son programme ainsi que les contraintes de sites ou réglementaires et en allant voir les meilleurs choix.

L'implémentation de l'outil dynamique s'est faite en plusieurs étapes comme l'explique la section suivante.

1.4 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DYNAMIQUE

L'implémentation du prototype d'outil d'assistance à la définition du plan de commissionnement complémentaire s'est faite en trois phases. Une première phase d'expertise, une seconde d'implémentation de l'outil et une troisième de test et d'application (Cf. Figure 4.5).

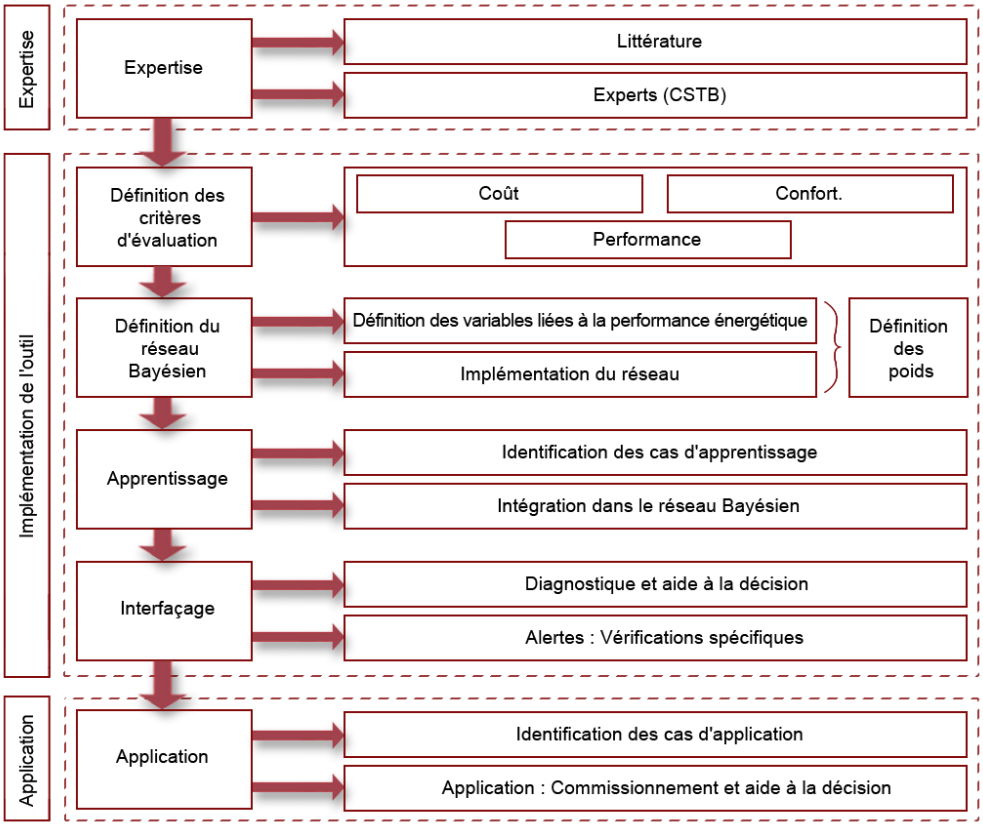


Figure 4.5 : Méthodologie adoptée pour réaliser l'outil dynamique

La phase d'expertise a nécessité, en plus d'une recherche bibliographique sur les travaux réalisés dans le cadre des divers labels décrits dans le premier chapitre, la consultation d'experts en bâtiments à faible consommation d'énergie. Cette recherche a permis de décrire un premier arbre dans lequel a été classé l'ensemble des éléments qui influent sur la performance énergétique.

La seconde phase consiste en l'implémentation de l'outil, à commencer par la définition de trois critères d'évaluation : la consommation d'énergie, le confort thermique et le surcoût.

Cette étape est suivie du développement du réseau Bayésien par lequel sont représentés les effets des éléments recensés et classés dans la phase préalable sur les critères d'évaluation choisis. Une fois le réseau développé, le poids des éléments composant le bâtiment sur ces trois critères d'évaluation a été estimé à dire d'experts ou par apprentissage. Pour faciliter son exploitation, un prototype d'interface a été implémenté.

Enfin, la troisième phase a consisté à appliquer cet outil dans des cas réels ou simulés.

2. IMPLÉMENTATION DE L'OUTIL DYNAMIQUE

La construction d'un réseau Bayésien se fait en trois étapes. Chacune de ces étapes a nécessité un recueil d'expertise important.

1. **Identification des variables et leur espace d'état :** les variables peuvent être catégorielles ou numériques. Une fois identifiées, un compromis entre la précision de la représentation et la faisabilité de la construction du modèle a été trouvé au moyen de discussions avec des experts du domaine. Une fois cela fait, il est nécessaire de préciser l'espace d'état de ces variables, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs possibles (en tenant compte du fait qu'une table d'état trop fine pourrait saturer la mémoire de l'ordinateur).

2. **Définition de la structure du réseau :** il s'agit ici d'identifier les liens entre les variables. Cette tâche se fait essentiellement par interrogation d'experts. Il est à noter que quelle que soit la dépendance stochastique entre variables aléatoires discrètes, il existe toujours une représentation par réseaux Bayésien de leur loi de jonction.

3. **Définition de la loi de probabilité conjointe des variables :** cela consiste à renseigner les tables de probabilité associées aux différentes variables. En cas d'absence totale d'informations concernant la loi de probabilité de l'une des variables, cela peut être résolu en lui affectant une loi de probabilité arbitraire (telle une loi uniforme).

Quatre versions de l'outil dynamique ont été implémentées. La structure et la complexité de chacune de ces versions répondent à une situation particulière, la première version, la plus simple, peut être utilisée dans le cadre du commissionnement de la performance énergétique de projets types pour lesquels toutes les solutions sont connues et quantifiées, la seconde pour des projets dont toutes les solutions n'ont pas été quantifiées, la troisième version permet de réaliser des diagnostics multicritères. La particularité de la dernière version, dont la structure est la plus complexe, est qu'elle permet non seulement de faire des diagnostics multicritères mais aussi d'aller à des niveaux élevés de détail et peut ainsi couvrir l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

2.1 VERSION 1 : UN OUTIL D'ÉVALUATION «MONO-CRITÉRE» BASÉ SUR UNE EXPERTISE

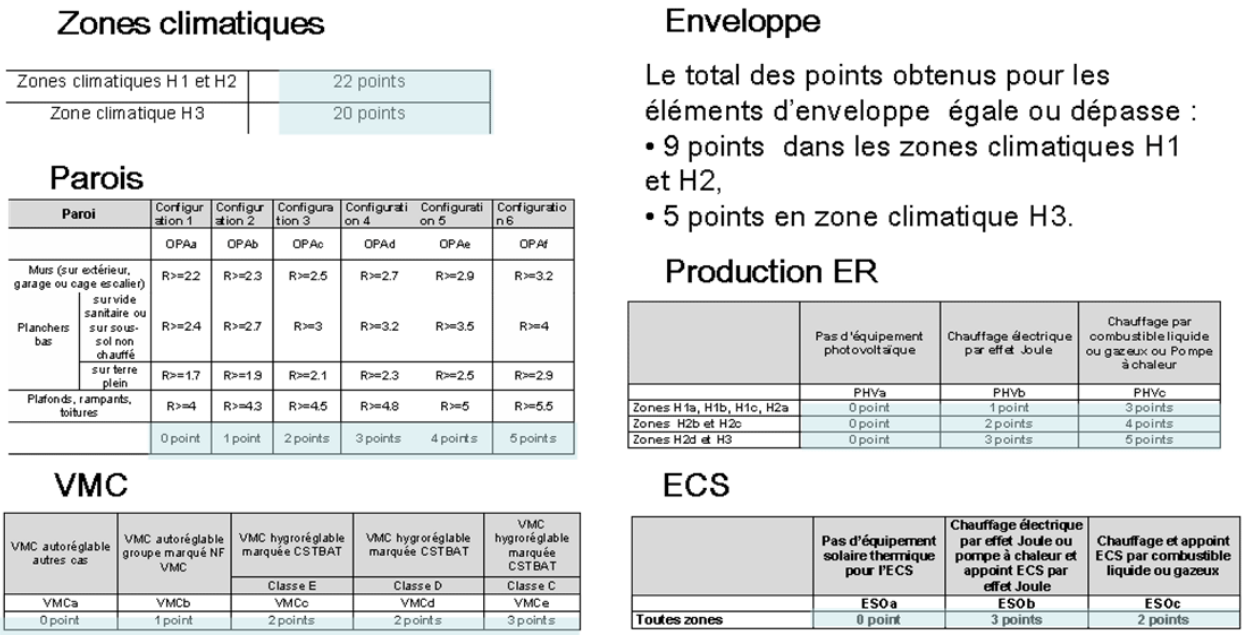
La première version de l'outil dynamique est destinée à l'évaluation de conception dont les choix et les poids de composants sont connus et prédéfinis. Il pourrait être utilisé par exemple dans le cas de la conception de maisons répétitives et/ou modulables, ou dans le cas de bâtiments usinés, pour lesquelles les solutions techniques sont les mêmes et dont les performances sont connues. L'implémentation d'un tel outil consiste donc en la mise en place d'un réseau Bayésien à partir de données estimées au préalable par des experts du domaine.

Pour illustrer ce type d'outils, le choix s'est porté sur un réseau destiné à commissionner les maisons individuelles et à vérifier si elles répondent à la RT2005 telle que définie par le décret du 24 mai 2006 [Décret'2006]. Ce réseau qui n'évalue que la thermique d'hiver pour les maisons individuelles non climatisées a été implémenté en se basant sur une méthodologie réalisée au CSTB dont le nom est «Solutions techniques RT2005 maisons individuelles non climatisées Projet V5» [ProjetV5'2007] et qui consiste en une base de données de points affectés à des solutions préétablies pour ce type de maisons.

Ces solutions techniques traitent successivement des obligations de la thermique d'hiver puis de celles du confort d'été en s'assurant que la maison respecte les règles de construction. Elle ne sont applicables qu'aux maisons non climatisées dont la surface habitable est inférieure à 250m², la surface des portes et fenêtres est inférieure à 25% de la surface habitable, et l'inertie est au moins légère.

Les facteurs pris en compte dans cette méthodologie sont les suivants :

- la conception bioclimatique,
- les parois opaques,
- les ponts thermiques,
- les baies,
- le système de ventilation,
- le système de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS),
- les équipements solaires de production d'ECS,
- les équipements photovoltaïques.



Zones climatiques

Zones climatiques H1 et H2	22 points
Zone climatique H3	20 points

Parois

Paroi		Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3	Configuration 4	Configuration 5	Configuration 6
		OPAa	OPAb	OPAc	OPAd	OPAe	OPAf
Murs (sur extérieur, garage ou cage escalier)		R>=2.2	R>=2.3	R>=2.5	R>=2.7	R>=2.9	R>=3.2
Planchers bas	sur vide sanitaire ou sur sous-sol non chauffé	R>=2.4	R>=2.7	R>=3	R>=3.2	R>=3.5	R>=4
	sur terre plein	R>=1.7	R>=1.9	R>=2.1	R>=2.3	R>=2.5	R>=2.9
Plafonds, rampants, toitures		R>=4	R>=4.3	R>=4.5	R>=4.8	R>=5	R>=5.5
		0 point	1 point	2 points	3 points	4 points	5 points

VMC

VMC autoréglable autres cas	VMC autoréglable groupe marqué NF VMC	VMC hygroréglable marquée CSTBAT	VMC hygroréglable marquée CSTBAT	VMC hygroréglable marquée CSTBAT
		Classe E	Classe D	Classe C
VMCa	VMCb	VMCc	VMCd	VMCe
0 point	1 point	2 points	2 points	3 points

Enveloppe

Le total des points obtenus pour les éléments d'enveloppe égale ou dépasse :
- 9 points dans les zones climatiques H1 et H2,
- 5 points en zone climatique H3.

Production ER

	Pas d'équipement photovoltaïque	Chauffage électrique par effet Joule	Chauffage par combustible liquide ou gazeux ou Pompe à chaleur
	PHVa	PHVb	PHVc
Zones H1a, H1b, H1c, H2a	0 point	1 point	3 points
Zones H2b et H2c	0 point	2 points	4 points
Zones H2d et H3	0 point	3 points	5 points

ECS

	Pas d'équipement solaire thermique pour l'ECS	Chauffage électrique par effet Joule ou pompe à chaleur et appoint ECS par effet Joule	Chauffage et appoint ECS par combustible liquide ou gazeux
	ESOa	ESOb	ESOc
Toutes zones	0 point	3 points	2 points

Figure 4.6 : Présentation de quelques tableaux définis dans la méthodologie «Solutions techniques RT2005 maisons individuelles non climatisées Projet V5»

Pour chacun de ces éléments, un nombre de points est affecté selon sa qualité thermique ou la configuration retenue pour un de ces composants (Cf. Figure 4.6). Afin qu'une maison soit conforme, elle doit répondre à deux critères :

- La conception de son enveloppe doit lui permettre d'accumuler 9 points si elle est en Zone climatique H1 et H2 et 5 points si elle est en zone climatique H3.
- La conception globale doit lui permettre d'accumuler 22 points si elle est en Zone climatique H1 et H2 et 20 points si elle est en zone climatique H3.

La construction du réseau Bayésien s'est faite suivant les trois étapes décrites dans (Cf. § 4-2). Une fois que toutes les variables, décrivant l'ensemble des choix offerts par cette méthodologie ainsi que les variables «intermédiaires» définis, l'influence de ces variables les unes sur les autres est décrite (Cf. Figure 4.7). Les variables «intermédiaires» sont nécessaires à l'organisation du réseau, car elles permettent d'éviter la convergence d'un trop grand nombre de variables vers un seul nœud. Cette situation rendrait difficile le renseignement des tables de probabilité d'une part, et ne pourrait pas être gérée par l'outil Hugin à partir d'une certaine taille d'autre part.

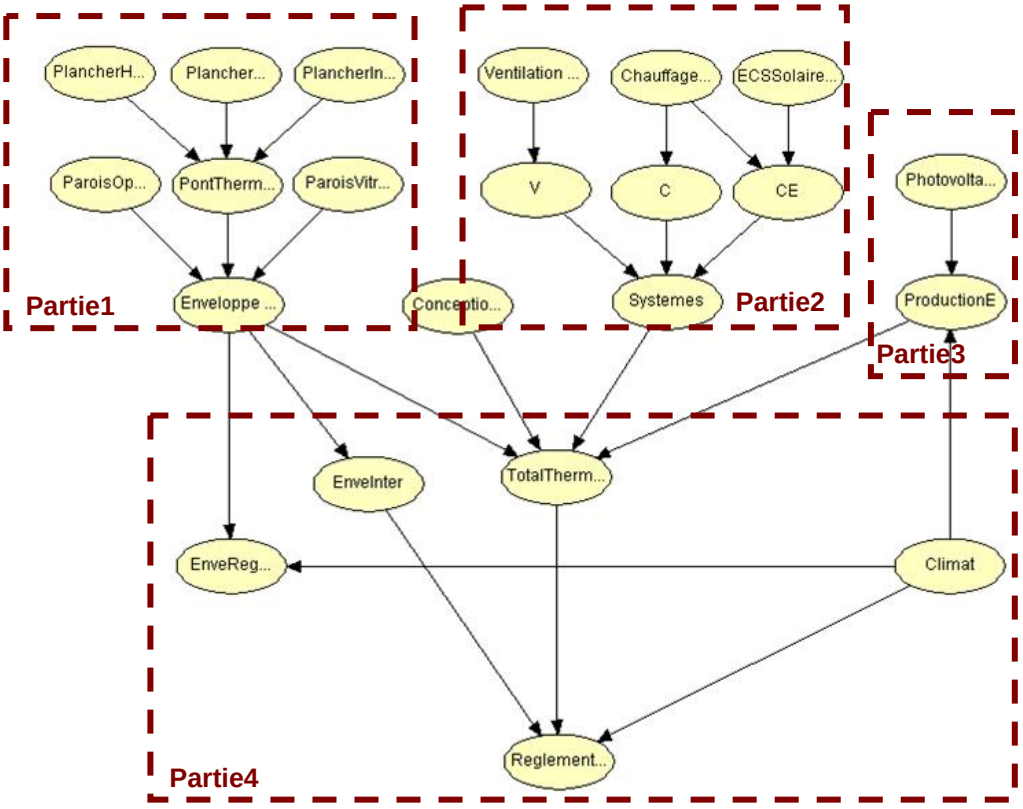


Figure 4.7 : Présentation du réseau Bayésien destiné à évaluer la conformité des maisons individuelles à la RT2005

Selon cette méthodologie, l'évaluation de la qualité de la variable intermédiaire ponts thermiques, par exemple, dépend de la présence et des caractéristiques des planchers hauts, bas et intermédiaires. Cette dépendance est représentée dans le réseau par trois nœuds de choix *PlancherHaut*, *PlancherBas* et *PlancherInter* et un nœud intermédiaire *PontThermique*. L'espace d'état de chaque nœud a été défini suivant les types de solutions préconisées par la solution technique. Le nœud PlancherBas par exemple a cinq états :

- épaisseur <= 20cm avec maçonnerie courante,
- rupture de pont thermique avec Mur isolé par l'intérieur,
- chape flottante avec mur isolés R<1.4,
- chape flottante avec mur isolé R>1.4,
- entrevous et PSE.

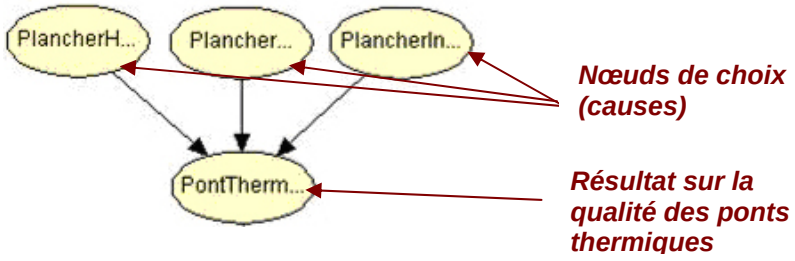


Figure 4.8 : Présentation du réseau Bayésien destiné à évaluer la qualité des ponts thermiques

La structure du réseau est créée en mettant en relation les nœuds de choix (causes) et le nœud résultat (effet). Elle se traduit par trois flèches qui partent des trois premiers et convergent vers le dernier (Cf. Figure 4.8).

La troisième étape consiste à renseigner les tables de probabilités conditionnelles associées à chaque variable. Cette étape se fait grâce à la connaissance du nombre de points donnés à chacun de ces éléments par rapport à son influence sur la performance thermique. Plusieurs manières ont été testées pour le remplissage des tables de probabilités : la première, laborieuse du fait du nombre important de combinaisons retrouvées dans la Partie1 (Cf. Figure 4.7), vise à renseigner toutes les cases des tables de probabilité de la première partie du réseau une à une (Cf. Annexe 5) ; la deuxième (Cf. Figure 4.7), a consisté à introduire des opérations arithmétiques qui ont permis d'additionner les points et de les classer dans des intervalles qui ont servi dans la suite de la propagation (Cf. Figure 4.9) ; dans la troisième partie (Cf. Figure 4.7) du réseau qui traite de la production d'énergie une simplification des zones climatiques a été faite (H1 pour la première ligne du tableau correspondant, H2 pour la deuxième ligne et H3 pour la troisième ligne (Cf. Figure 4.6)).

Pour pouvoir intégrer les opérations arithmétiques une série de nœuds intermédiaires a été ajoutée telle que l'illustre la Figure 4.9. Ces nœuds ont été introduits pour donner les valeurs numériques (nombre de points) qui correspondent à chaque choix.

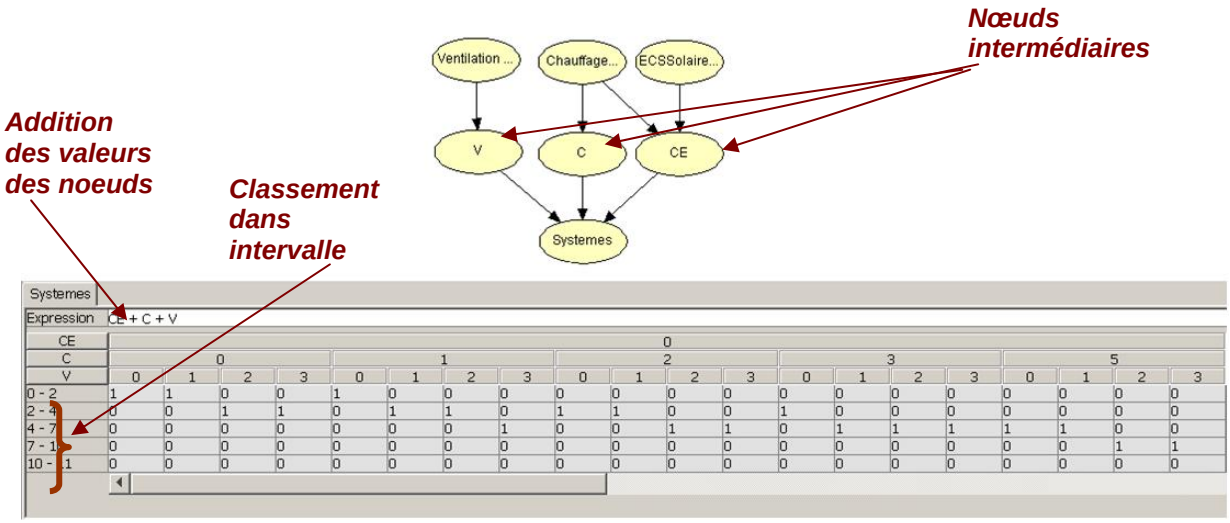


Figure 4.9 : Remplissage de la table de probabilité grâce à des opérations arithmétiques

Pour illustrer le mode de fonctionnement du réseau, un exemple est présenté sur la partie enveloppe. Le choix a porté sur une maison individuelle dont les seules informations connues sont : qu'elle ne possède pas de plancher intermédiaire, que le vitrage est un double vitrage et qu'elle se trouve en zone climatique H1 (ce qui apparaît en rouge sur la Figure 4.10).

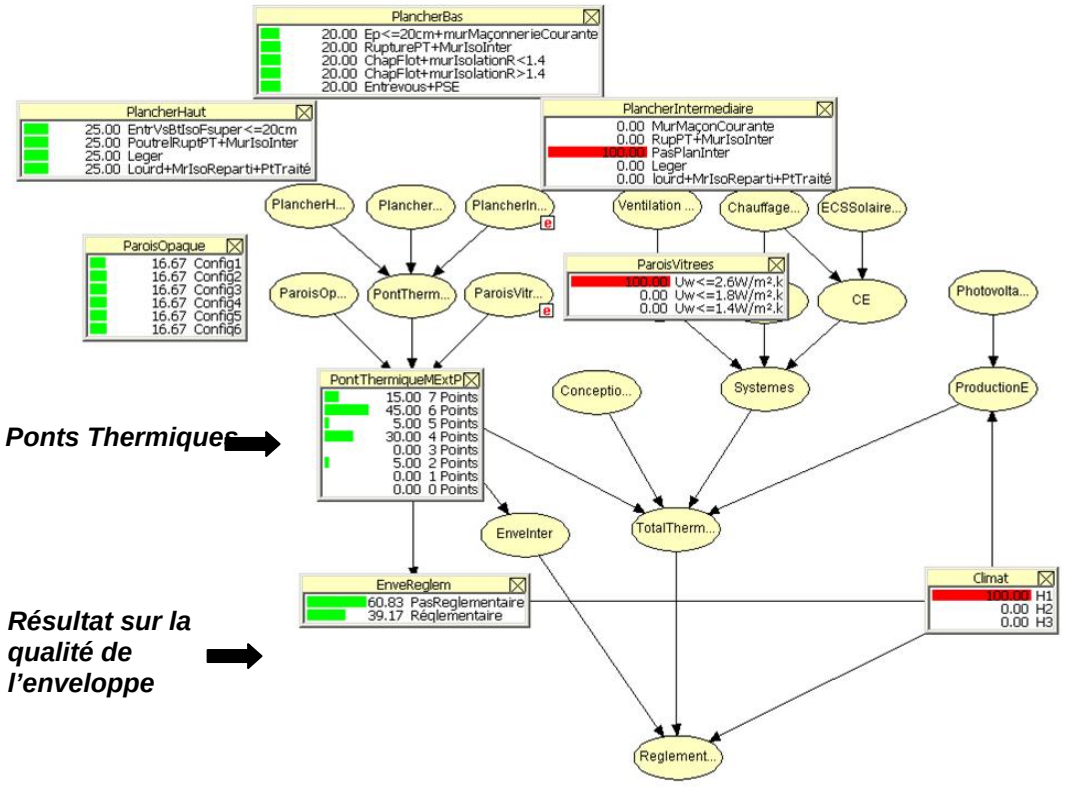


Figure 4.10 : Présentation d'un exemple de propagation dans la partie du réseau qui traite de la conformité de l'enveloppe par rapport à la RT2005 dans le sens de la vérification de la conformité

La propagation des informations disponibles montre que les chances d'avoir un pont thermique sont faibles[18], avec 45% de chance pour que la présence de ponts thermiques soit très faible contre 30% moyenne, et que l'enveloppe n'est pas réglementaire (avec 61%).

Pour savoir sur quels éléments il faut agir pour être sûr que l'enveloppe soit réglementaire, il faut imposer que la valeur réglementaire soit à 100% (voir Figure 4.11) et observer son influence sur le reste du réseau. Dans cet exemple, pour que l'enveloppe de cette maison soit réglementaire étant donné les informations connues, il faudrait que le plancher bas soit en chape flottante avec des murs dont l'isolation serait supérieure à 1.4 (avec 30%) ; que le plancher haut fasse partie des trois possibilités suivantes 1) une poutre avec rupteurs de pont thermiques, 2) un plancher léger ou 3) un plancher lourd avec mur avec isolation répartie et pont thermiques traités (avec 30% chacun) ; quant aux parois opaques, le meilleur choix serait la paroi opaque décrite dans la configuration 6 (avec 40%), dont la description est faite dans la référence [ProjetV5'2007].

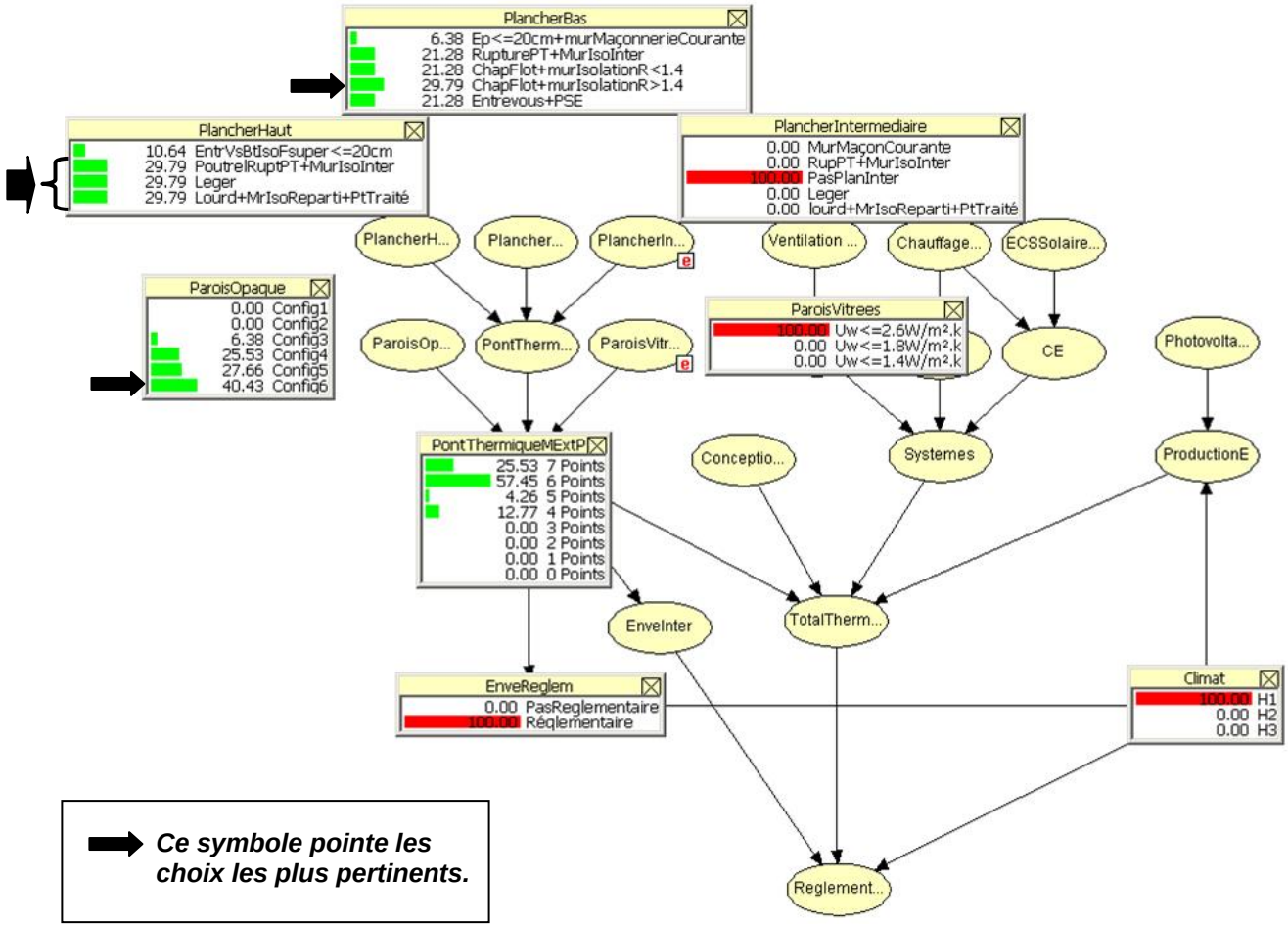


Figure 4.11 : Présentation d'un exemple de propagation dans la partie du réseau qui traite de la conformité de l'enveloppe par rapport à la RT2005 dans le sens de l'aide au choix

[18] Plus ne nombre de points cumulés dans le cas de la variable pont thermique est grand, moins il y a de chances d'avoir des ponts thermiques.

Ce type d'outils permet d'obtenir les résultats d'une évaluation de manière automatique et en temps réel, juste en intégrant les données connues, contrairement à la configuration actuelle de la méthodologie (Cf. Figure 4.6). D'un autre coté, cette méthodologie nécessite une connaissance de la totalité des données d'entrées pour pouvoir fournir un résultat, alors qu'un réseau Bayésien peut fournir une estimation des chances qu'à un bâtiment d'être ou non conforme à la RT 2005 à partir de données incomplètes.

Cette configuration du réseau est intéressante dans le cadre de l'évaluation ou de l'aide à la décision de projets dont la connaissance des composants est définie. Dans le cas d'un domaine plus vaste, pour lequel il n'est pas possible d'estimer et de quantifier toutes les possibilités et combinaisons, une autre solution est possible. Cette solution se base sur l'apprentissage, une des possibilités offertes par le réseau Bayésien.

2.2 VERSION 2 : UN OUTIL D'ÉVALUATION «MONO-CRITÉRE» AVEC APPRENTISSAGE

La deuxième version de l'outil dynamique met en œuvre un réseau Bayésien qui a pour objectif de diagnostiquer la performance énergétique d'un bâtiment par rapport à plusieurs niveaux de performances, et pas seulement l'aspect réglementaire. Il est peu réaliste qu'un expert puisse fournir de façon numérique l'ensemble des paramètres nécessaires à l'inférence d'un graphe comme celui-ci étant donné le grand nombre de combinaisons de choix possibles. Donc pour pouvoir mettre en place cet outil, un réseau plus adapté intègre l'apprentissage comme moyen pour le développer (Cf. Figure 4.12).

L'apprentissage peut s'appliquer à deux niveaux :

- Apprentissage pour la définition de la structure du réseau Bayésien en se basant sur des algorithmes tels que le «PC[19] algorithme» réalisé par [Sprites'2000].
- Apprentissage pour la correction, voire la définition des paramètres de renseignement des tables de probabilités conditionnelles, qui se base sur des algorithmes tels que le «EM[20] algorithme» développé par [Cowell'1992] [Lauritzen'1995] utilisé par l'outil Hugin [Hugin'2007].

L'implémentation de cet outil a été confrontée à l'ampleur et la variation des choix possibles dans la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, ainsi qu'à l'impact très variable des combinaisons de choix sur la performance. Il est difficile de quantifier de manière précise l'impact de tel ou tel système sur telle ou telle performance, sans tenir compte de l'environnement auquel il a été intégré. En effet, c'est une combinaison de choix par rapport au parti architectural, à l'enveloppe, aux systèmes, la production d'énergie, etc. qui fait qu'une performance est atteinte ou pas.

19 PC : Path Condition
20 EM : Estimation-Maximization

Ainsi, une production d'énergie grâce à des panneaux photovoltaïques est un choix fortement recommandé dans le cadre d'un bâtiment très performant, mais elle ne peut pas compenser à elle seule une qualité médiocre de l'enveloppe par exemple.

Cet état de fait, a rendu le renseignement des tables de probabilités conditionnelles très difficile autrement qu'avec de l'apprentissage. Cette technique permet de renseigner de manière automatique les tables de probabilité en utilisant une base de données de cas de projets réels ou simulés. Ce renseignement se fait suivant les combinaisons de choix présents (les cas d'apprentissage) et leurs impacts sur la performance. Seul l'apprentissage destiné à la correction ou à la définition des tables de probabilités conditionnelles a été utilisé.

La modélisation de ce réseau Bayésien s'est faite en trois étapes :

- Création de modèles graphiques suite à une expertise (Cf. Figure 4.12).
- Sélection des cas d'études et construction de la base de données.
- Application de l'apprentissage sur le réseau (en plusieurs étapes).

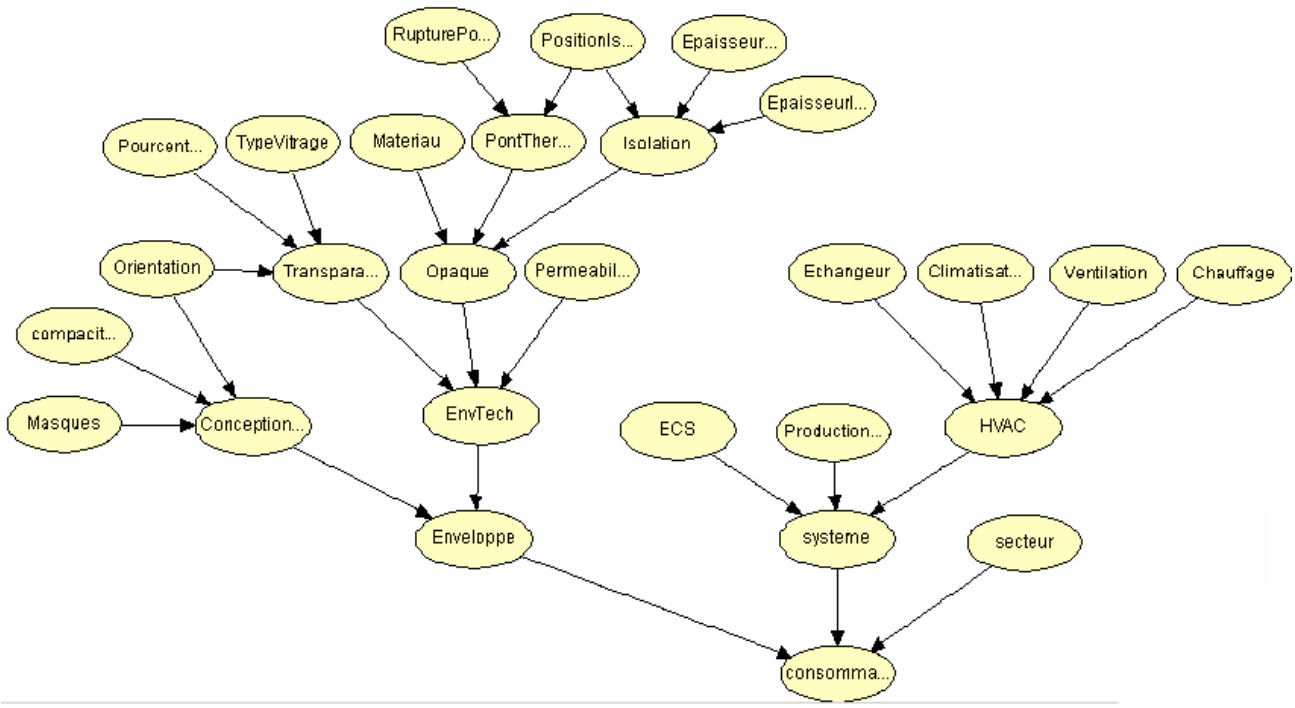


Figure 4.12 : Présentation du réseau Bayésien destiné à commissionner la performance énergétique des bâtiments quantifié en se basant sur l'apprentissage.

Vingt-six cas ont été utilisés dans l'apprentissage de ce réseau :

- Projet Bepos [Chlela'2006] (12 cas).
- Mallettes RT2005 [MaletteRT'2005] (6 cas).
- Projets simulés [Chlela'2008] (2 cas).
- Odmir [Odmir4'2007] (4 cas).
- Projet de réhabilitation de Fontenay sous Bois [Jandon'2006].
- Bâtiment Zen [Ricaud'2007].

Ces cas sont classés suivant leur secteur et leur niveau de performance dans le tableau suivant :

	< Rt 2005	RT 2005	Performan	TPerforma	Bepos
Résidentie	2	6	4	3	2
Tertiaire	0	3	1	5	0

Seuls les éléments qui ont un impact important sur la performance énergétique ont été pris en compte dans la construction du réseau et dans la mise en place de son apprentissage. Pour chaque cas d'étude, les données connues ont été classées dans une base de données (Cf. Figure 4.13) suivant le format exigé par Hugin. Une des forces de cet apprentissage est qu'il permet d'intégrer des cas dont toutes les variables de choix ne sont pas connues.

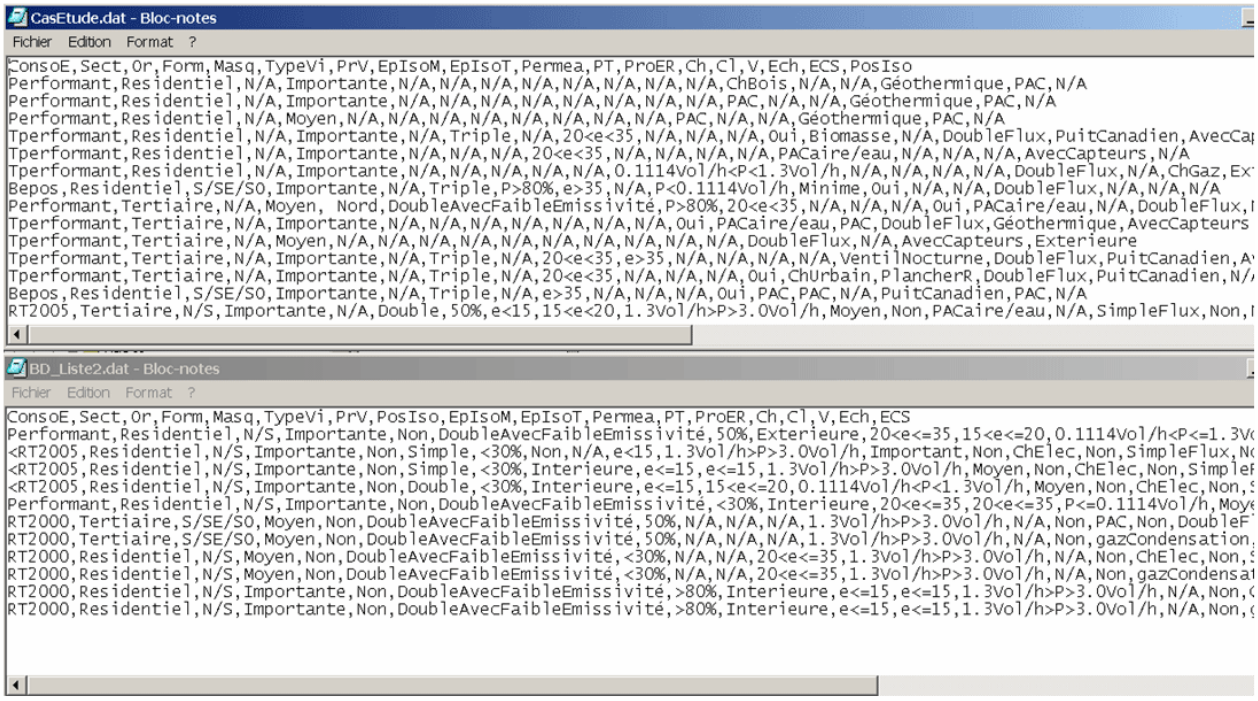


Figure 4.13 : Illustration des deux fichiers de bases de données qui ont servi dans l'apprentissage du réseau.

Les Figure 4.14 et Figure 4.15 montrent les nœuds qui ont été renseignés suite à l'apprentissage. Il est possible d'observer sur la Figure 4.15 que le pourcentage des attributs de chaque nœud qui a connu un apprentissage a changé. Dans le cas du nœud Masques par exemple, 86 % des cas introduits par l'apprentissage n'en possédaient pas, alors que 6 % en possédaient coté Nord et 8 % coté sud, est ou Ouest. Cette information est importante lors de l'analyse des résultats d'une évaluation comme cela sera explicité lors de l'application de cet outil (Cf. § 5-2.2.1).

Ces figures montrent également les nœuds de choix qui n'ont pas été renseignés suite à l'apprentissage, du fait de l'absence d'informations les concernant dans les cas d'apprentissage.

***NB** : Les nœuds intermédiaires ayant été renseignés à dire d'experts, ne connaissent pas de variations, seuls les nœuds externes sont concernés par l'apprentissage (les entrées et les sorties).*

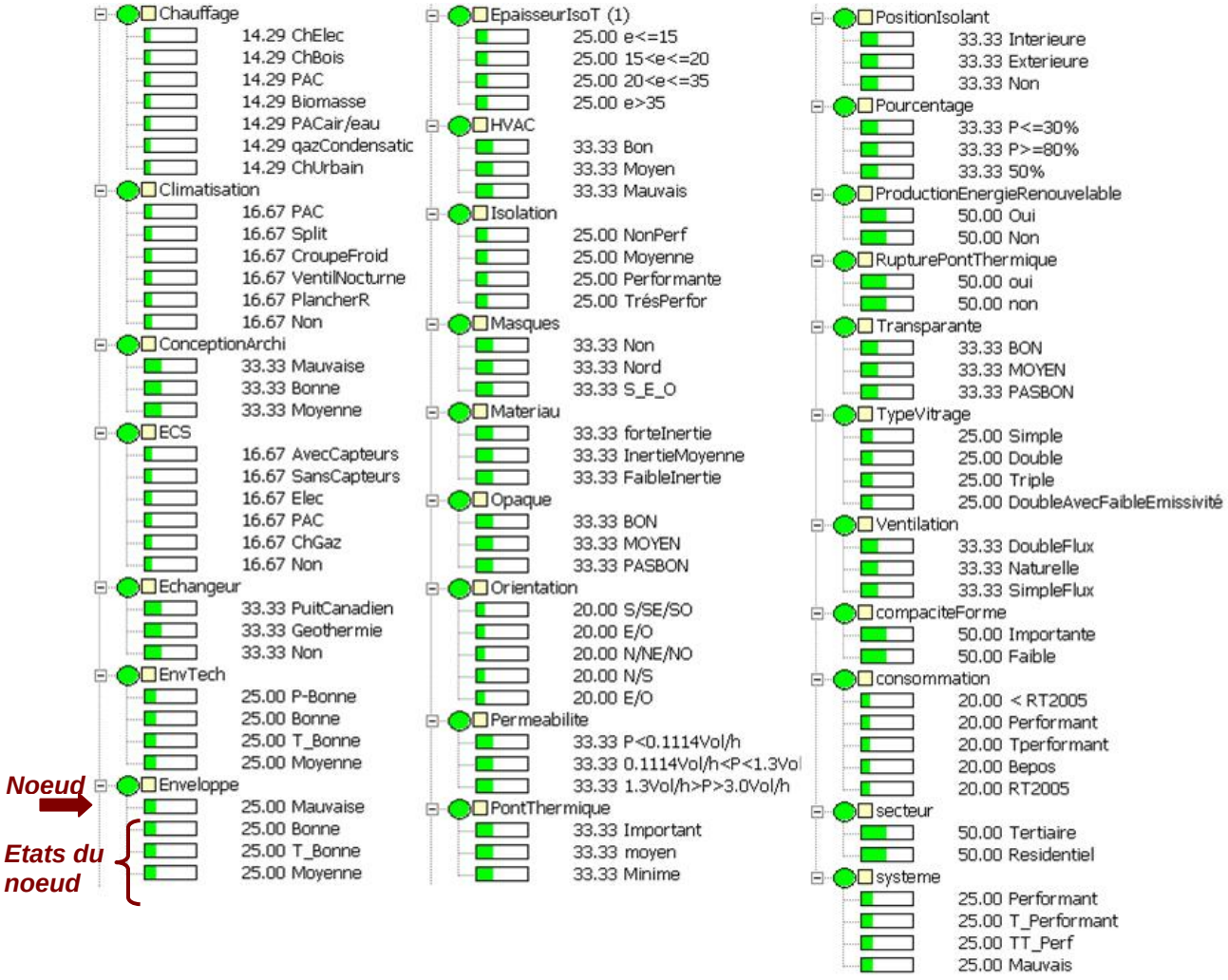


Figure 4.14 : Etats des nœuds avant apprentissage (les valeurs, par défaut, des états de chaque nœud sont identiques avant apprentissage)

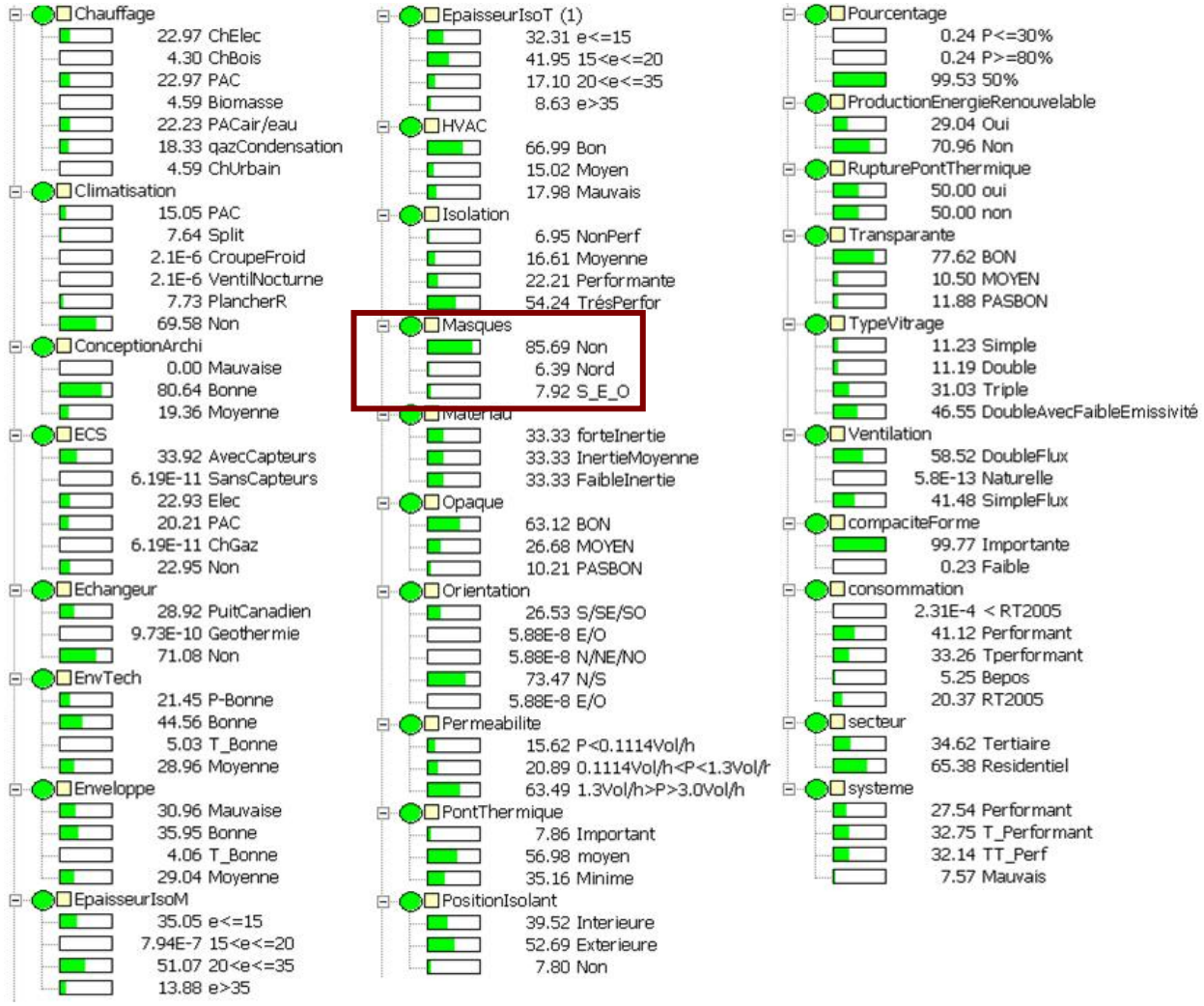


Figure 4.15 : Etat des nœuds après apprentissage

L'implémentation des réseaux Bayésiens est confrontée à une difficulté majeure qui est liée à sa taille (qui peut être due à un diagnostic multicritères ou de l'intégration d'un niveau de détail important) (Cf. Figure 4.16). La complexité algorithmique du formalisme des réseaux Bayésiens aussi bien en termes de représentation que d'utilisation les rend difficiles à manipuler à partir d'une certaine taille. Cette difficulté ne se traduit pas seulement en termes de compréhension par l'utilisateur, mais aussi par des problèmes sous-jacent qui sont pratiquement tous de complexité non polynomiale, et conduisent à développer des algorithmes approchés, dont le comportement n'est pas garanti pour des problèmes de grande taille [Naïm'2004].

Pour pallier ce problème le choix s'est porté sur l'implémentation d'un Réseau Bayésien Orienté Objet. Tout comme un réseau «normal», celui-ci est composé de nœuds et d'instance de nœuds, à la différence qu'il permet une structuration hiérarchique du réseau, un travail à différents niveaux d'abstraction et une meilleure lisibilité.

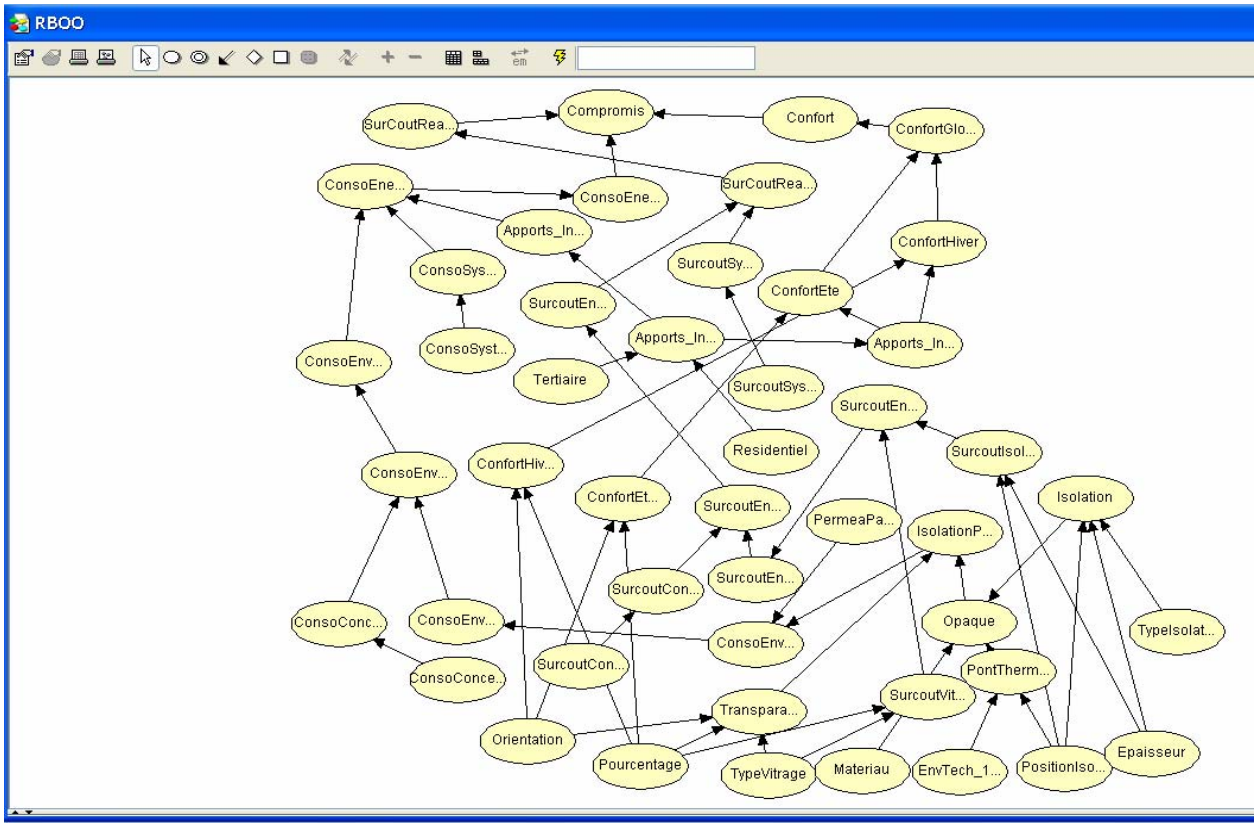


Figure 4.16 : Exemple d'un réseau Bayésien de grande taille due à l'intégration de plusieurs critères d'évaluation

2.3 IMPLÉMENTATION D'UN OUTIL D'ÉVALUATION MULTICRITÉRES

Les deux dernières versions de l'outil dynamique ont pour objectif d'intégrer plusieurs paramètres d'évaluation en se basant sur les réseaux bayésiens orientés objets (RBOO). En effet, l'évaluation s'est étendue au surcoût de réalisation et au confort d'été et d'hiver. Un nombre plus important de nœuds a également été intégré offrant ainsi plus de choix.

Ce type de réseaux est composé de classes imbriquées ou concaténées. Chaque classe représente un sous-réseau ou un ensemble de sous-classes. Ce mode de modélisation facilite la lecture et l'agrandissement du réseau suivant le besoin. Il permet également de structurer et d'assurer la fiabilité des réseaux Bayésiens de grande taille.

Les réseaux Bayésiens décrits dans cette recherche se construisent autour de trois critères d'évaluation décrits dans la section suivante.

2.3.1 DÉFINITION DES CRITÈRES D'ÉVALUATION

E.Abel souligne dans sa description du bâtiment à faible consommation d'énergie [Abel'1994] qu'il existe deux manières fondamentalement différentes de voir les bâtiments d'un point de vue énergétique :

- Les bâtiments à faible consommation d'énergie qui visent une indépendance énergétique totale, qui n'auraient besoin d'aucun apport externe.
- Les bâtiments performants énergétiquement qui sont traités de manière à ce que dans chaque détail de leur conception, ils nécessitent un minimum d'apports externes mais en limitant les surcoûts d'investissement.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans la deuxième approche. Pour définir un réseau Bayésien optimal et réaliste, il est donc important d'intégrer en plus de la dimension performance énergétique et de l'aspect confort- objectif premier d'une conception architecturale en plus de l'aspect fonctionnel - le surcoût raisonnable de réalisation d'un tel bâtiment.

Dans le cadre de la consommation d'énergie, seuls sont traités dans ce travail les systèmes qui influent sur le confort thermique, à savoir le chauffage, la climatisation, la ventilation et l'eau chaude sanitaire. Le confort d'été et d'hiver a également été pris en considération. Quant au surcoût, il est relatif au coût supplémentaire qu'engage la réalisation d'un bâtiment à faible consommation d'énergie par rapport à un bâtiment classique (ou courant).

Le modèle développé dans cette thèse vise à répondre aux phases amont du processus de conception, à savoir le commissionnement de la phase programmation et esquisse. La structure causale générale de ce réseau a été conçue de manière à traduire au mieux le comportement thermique de ce type de bâtiments en tenant compte des choix réalisés lors de ces deux phases. Suivant l'utilisation à laquelle il est destiné ce réseau peut prendre plusieurs formes, et peut être implémenté de plusieurs manières.

2.3.2 VERSION 3 : UN OUTIL DE COMMISSIONNEMENT MULTICRITÉRES

Le réseau développé pour cette troisième version de l'outil permet de diagnostiquer les choix réalisés par la maîtrise d'ouvrage, par rapport à quatre critères d'évaluation : la performance énergétique, le coût, le confort d'été et le confort d'hiver. L'évaluation de chacun de ces critères se fait dans une classe. Le Réseau Bayésien Orienté Objet (RBOO) développé dans cette section n'a pas la prétention de traiter l'ensemble des possibilités existantes dans la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, son objectif est d'illustrer les possibilités d'utilisation des RBOO dans ce domaine.

Ce RBOO est composé de six classes :

- une classe contenant l'ensemble des entrées (choix) utilisées pour faire un diagnostic,
- une classe permettant d'évaluer l'impact de ces choix sur la performance énergétique du bâtiment,
- une classe permettant d'évaluer l'impact des choix sur le confort d'été,
- une classe permettant d'évaluer l'impact des choix sur le confort d'hiver,
- une classe permettant d'évaluer l'impact des choix sur le surcoût de réalisation du bâtiment,
- une classe englobant l'ensemble des sorties (résultats).

La Figure 4.17 représente le RBOO final. Tel qu'expliqué dans [Korb'2004] chaque cadre d'objet est un mini réseau dans lequel toutes les variables d'interface (celles partagées par au moins deux classes) sont visibles contrairement aux autres. Les sous-réseaux constituants les classes de ce RBOO ont deux formes :

1. Des réseaux construits en étoile (Cf. Figure 4.18, Figure 4.19, Figure 4.20), dont l'avantage est que leur structure permet de définir directement l'impact de chaque choix sur un critère sans passer par des nœuds intermédiaires, ce qui facilite le renseignement de leurs tables de probabilités conditionnelles par le biais d'apprentissage exclusivement. Ce type de réseaux connaît néanmoins une limite qui est liée au nombre de nœuds entrées qui ne peut pas être trop important.

2. Des réseaux construits en arbre telle que la classe performance (Cf. § 4-2.2) (Cf. Figure 4.12). L'avantage de ce type de structure est qu'il permet de créer des réseaux plus importants vu qu'il donne la possibilité de décomposer les choix grâce à des nœuds intermédiaires. Néanmoins, cette solution a deux limites :

    - Elle ne peut pas se baser sur un apprentissage exclusif mais doit intégrer des données d'expertisent pour le remplissage des tables de probabilités conditionnelles des nœuds intermédiaires tels que les nœuds système, «envTech», conception etc. (Cf. Figure 4.12). Ce qui rend les résultats moins précis.

    - La taille du réseau reste limitée (Cf. § 4-2.2).

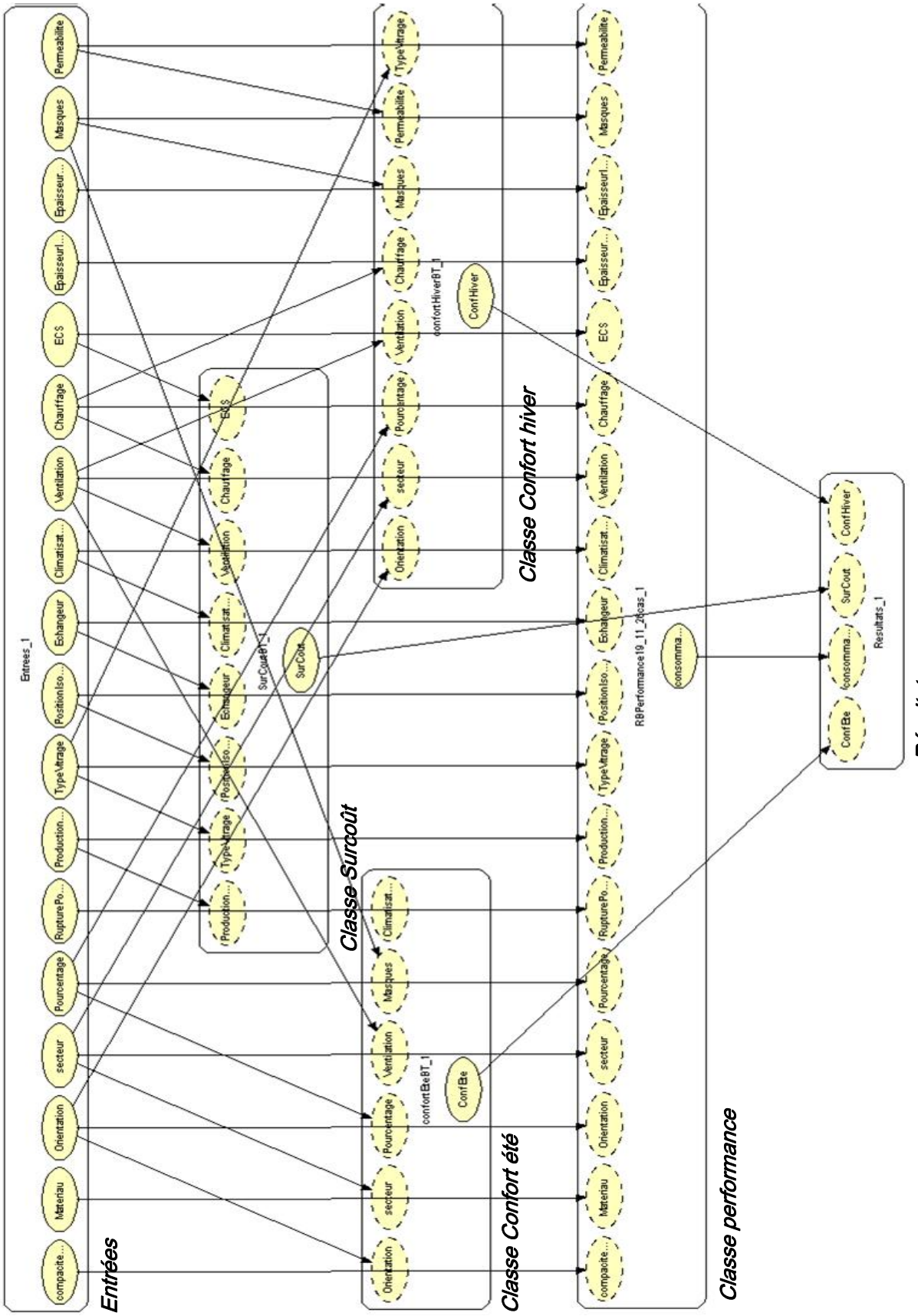


Figure 4.17 : Réseau Bayésien orienté objet permettant l'évaluation multicritères de l'évaluation des bâtiments à faible consommation d'énergie

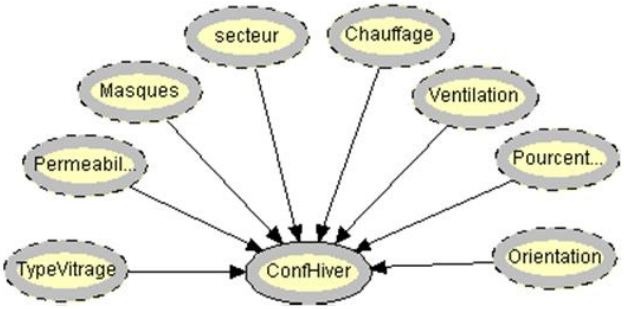


Figure 4.18 : Classe Confort hiver

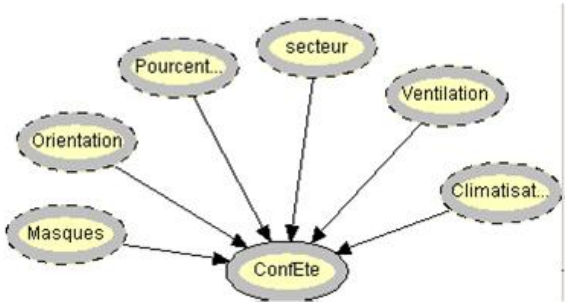


Figure 4.19 : Classe Confort été

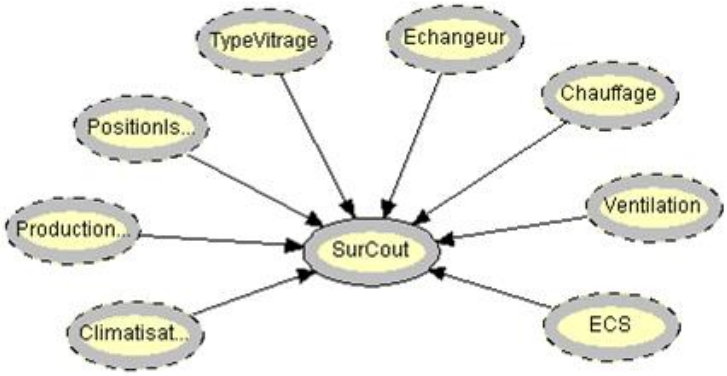


Figure 4.20 : Classe Surcoût

Pour pallier ces limites, un Réseau Bayésien Orienté Objet (RBOO) dit «flexible» est développé. Le processus de définition de la structure de ce réseau s'est fait suivant la description présentée dans la section suivante.

2.3.3 PROCESSUS DE MODÉLISATION D'UN OUTIL MULTICRITÉRES FLEXIBLE

La conception d'un réseau Bayésien de taille importante peut être confrontée à une barrière qui est liée à la représentation d'un graphe sensiblement identique au raisonnement réalisé. Pour pallier cela, une solution basée sur la notion de «construction de blocs» est proposée. Ces blocs sont appelés IDIOMES[21]. Cinq «IDIOMES» ont été référencés par [Neil'2000] :

- ***Idiome de définition/synthèse*** — cet Idiome modélise les définitions déterministes ou incertaines entre les variables ;

21 IDIOMES. «La forme syntaxique ou structurale particulière à un langage le génie ou la distribution d'une langue». [Neil'2000]

- ***Idiome de cause/conséquence*** — cet Idiome modélise l'incertitude d'un procédé causal qui a des conséquences observables ;
- ***Idiome de mesure*** — cet Idiome modélise l'incertitude de la précision d'un instrument de mesure ;
- ***Idiome d'induction*** — cet Idiome modélise l'incertitude liée au raisonnement inductif basé sur des entités similaires ou échangeables ;
- ***Idiome de réconciliation*** — cet Idiome modélise la réconciliation de résultats liés à deux idiomes différents et qui ont un nœud commun.

Des exemples sont présentés dans l'annexe 6.

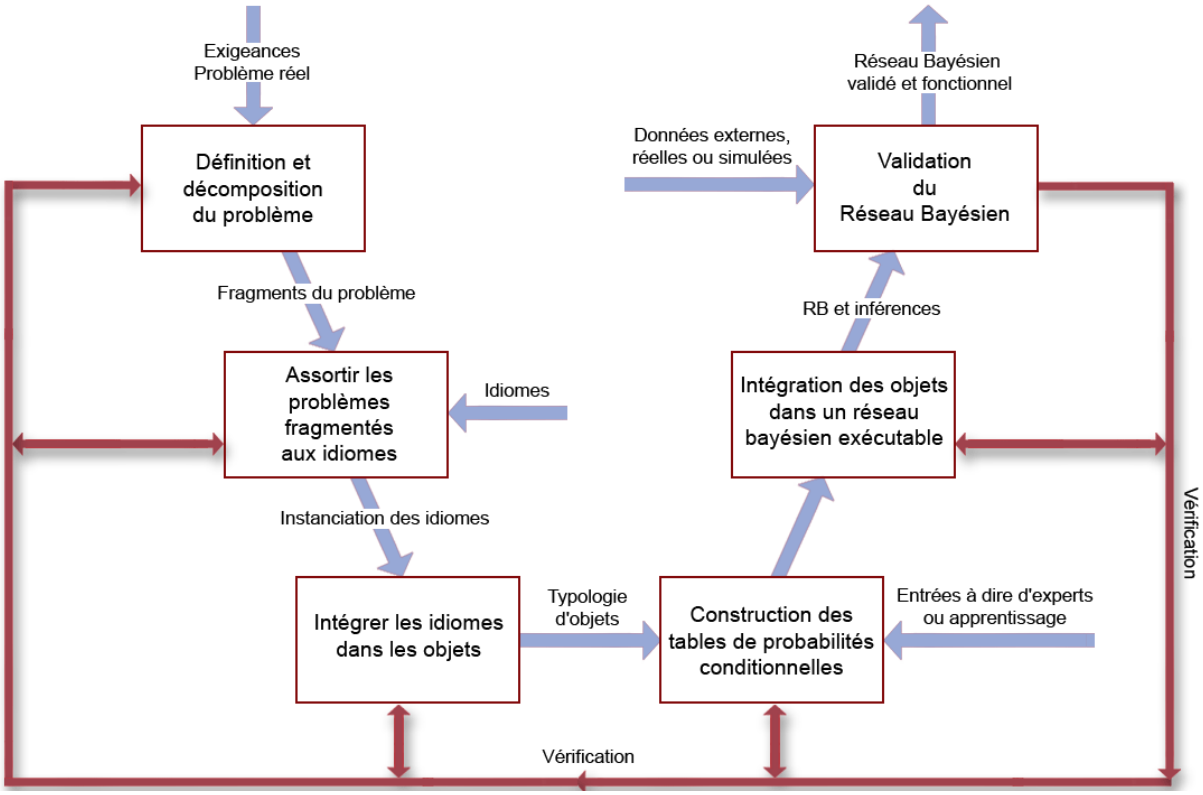


Figure 4.21 : Processus de développement d'un Réseau Bayésien Orienté Objet. Inspiré de [Neil'2000]

La modélisation de ce RBOO s'est faite en plusieurs étapes dont les plus importantes sont représentées dans (Cf. Figure 4.21). Ce processus commence par la définition du problème jusqu'à la validation du réseau. Après avoir défini le problème à modéliser, celui-ci est divisé en sous problèmes auxquels sont assimilés les idiomes correspondants. L'instanciation de ces idiomes permet d'obtenir des objets ou classes constitués de sous-réseaux dont les tables de probabilités conditionnelles sont renseignées à dire d'experts, ou par apprentissage. Ces classes sont ensuite reliées pour former le RBOO. L'idéal serait que le réseau soit validé grâce à des cas réels ou des données d'experts qui n'aient pas été utilisées dans son apprentissage.

Le choix des Idiomes peut être défini grâce au graphe décrit dans (Cf. Figure 4.22). Dans le cadre de cette thèse, deux IDIOMES sont utilisés dans la structuration du RBOO : Définition/Synthèse, et Cause/Conséquence. Un exemple est présenté dans la section suivante (Cf. § 4-2.3.4.2).

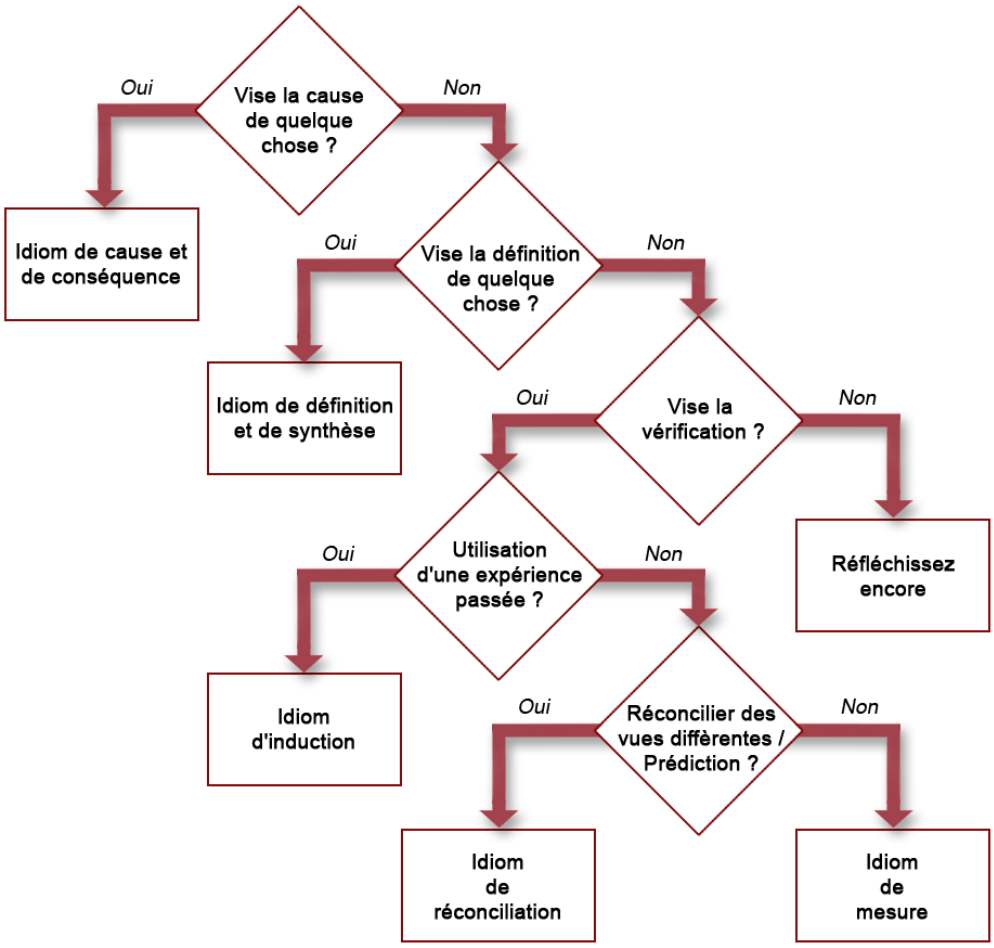


Figure 4.22 : Schéma permettant de choisir le bon IDIOME [Neil'200x]

2.3.4 UN OUTIL DE CX MULTICRITÉRES «FLEXIBLE»

La structure logique du modèle final du RBOO développé pour cette version de l'outil est composée de 13 réseaux élémentaires (ainsi que 4 sous-réseaux) connectés les uns aux autres pour former un Réseau Bayésien Orienté Objet. Ce RBOO permettra au final d'évaluer les choix faits par la maîtrise d'ouvrage ou maîtrise d'œuvre en terme de consommation d'énergie, de confort et de surcoût. La particularité de ce réseau comme son nom l'indique est qu'il est flexible car il offre la possibilité d'intégrer de nouvelles classes ou sous classes et de nouveaux nœuds suivant les besoins, sans porter atteinte à son intégrité.

Le réseau tel qu'il est conçu ne tient compte que des choix -dont l'impact sur la performance énergétique est plus important - réalisés dans ces deux phases de programmation et d'esquisse. Dans un souci de clarté, ce graphique est fractionné en 3 niveaux (Cf. Figure 4.23) :

1. Le premier niveau inclut les choix réalisés lors de ces deux phases amont du processus. Il permet de faire un calcul élémentaire de l'impact de ces choix sur les trois critères d'évaluation par rapport aux composantes : Architecture, Enveloppe, Système et Production d'Energie. Ce niveau peut être divisé en deux sous-niveaux : le premier sous-niveau représente d'une part les choix faits en conception architecturale et sur l'enveloppe technique en vue de réduire les besoins en chauffage, en rafraîchissement et en consommation d'énergie, et d'autre part le calcul les besoins énergétiques induit par ces choix ; le second sous-niveau simule les solutions alternatives qui permettent de fournir le reliquat en chauffage, en rafraîchissement et en énergie, à savoir le choix des systèmes de production d'énergie, des systèmes HVAC et ECS.

2. Le deuxième niveau vise à faire une estimation de l'impact de ces choix sur les critères d'évaluation et par corps d'état (systèmes et enveloppe).

3. Le troisième et dernier niveau fournit le résultat du diagnostic global du bâtiment par rapport aux différents critères d'évaluation (consommation, confort et coût), en prenant en compte l'ensemble de ces composants.

La structure décrite dans ce réseau s'est inspirée d'expertises et de travaux réalisés dans le cadre de la conception de bâtiments performants [ADEM'2000] [Minergie'2007] [Passivhaus'2007] [Jandon'2006]. L'exemple du premier niveau est présenté dans la section suivante pour illustrer les principes retenus pour la construction de ce Réseau Bayésien Orienté Objet. Les deux autres sous-niveaux seront décrits dans l'annexe 7.

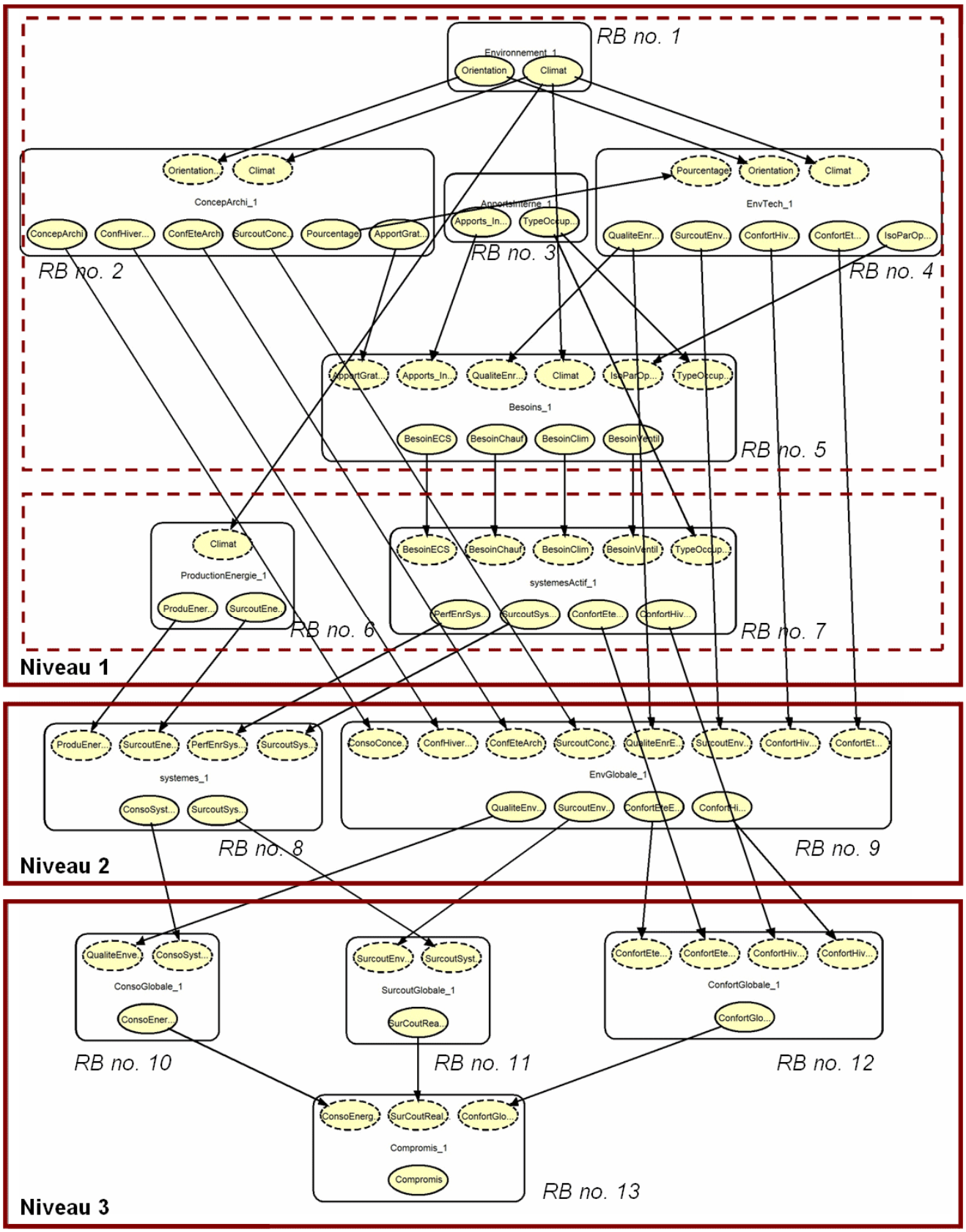


Figure 4.23 : Le Réseau Bayésien Orienté Objet flexible

2.3.4.1 Description de la structure du premier niveau

Le premier niveau du Réseau est divisé en deux sous-niveaux (Cf. Figure 4.24). Chaque sous-niveau est composé de réseaux élémentaires (ou classes) qui ont pour mission de simuler un procédé physique particulier dont le résultat sert d'entrée pour d'autres réseaux élémentaires. La structure décrite dans chaque réseau traduit des connaissances extraites d'expertises et de travaux réalisés.

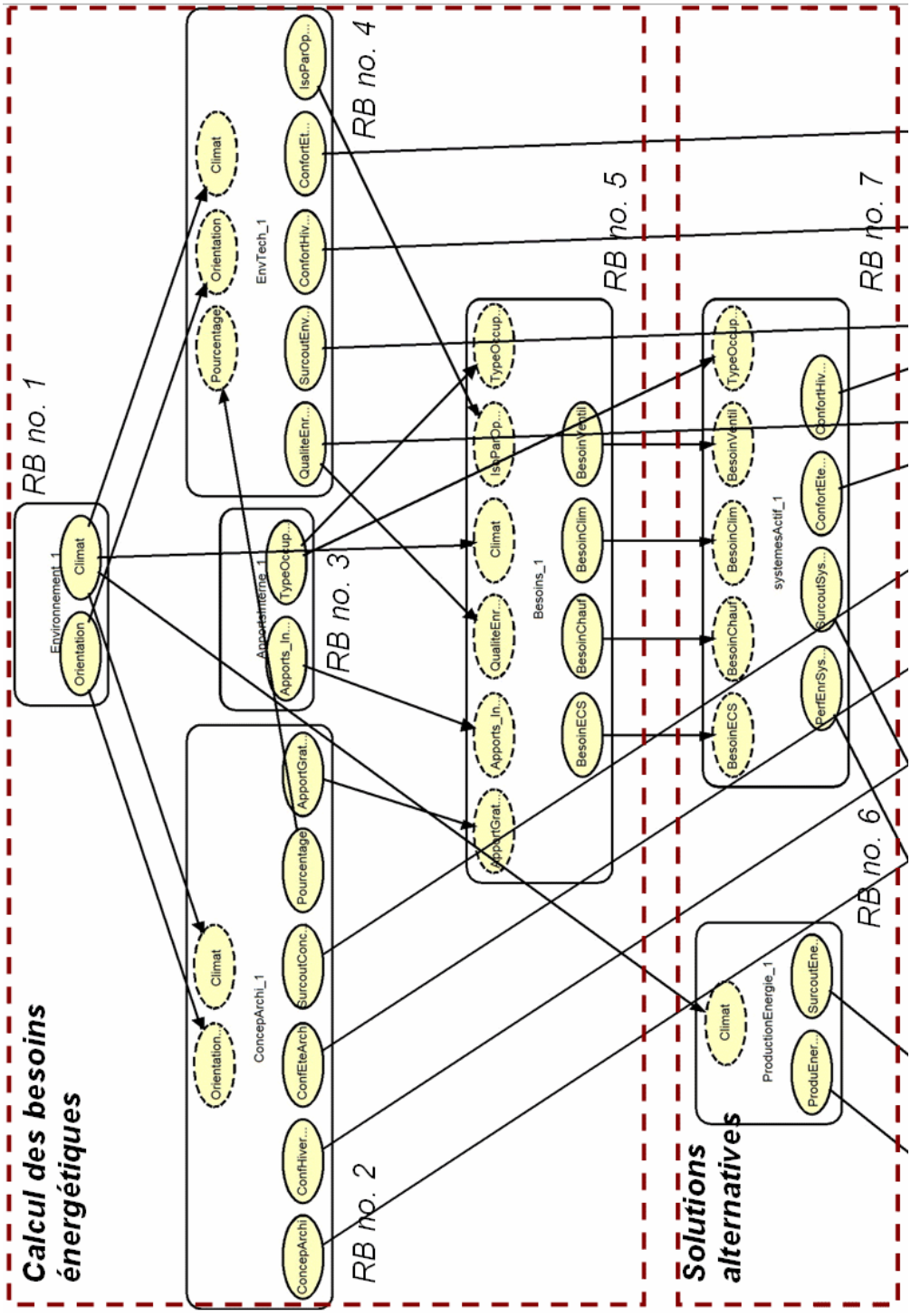


Figure 4.24 : Le premier niveau du Réseau Bayésien Orienté Objet flexible

Les classes du premier sous-niveau permettent de définir les besoins à partir des contraintes existantes et des choix réalisés. Ces classes sont (Cf. Figure 4.24) :

- La classe RB n°1 «Environnement_1» dans laquelle les contraintes d'orientation et de climat sont représentées (Cf. Annexe 7),
- La classe RB n°2 «ApportsInternes_1» dans laquelle le type d'occupation et une estimation des apports internes engendrés par cette occupation sont décrits (Cf. Annexe 7).
- La classe RB n° 3 «ConcepArchi_1» dans laquelle les choix qui sont réalisés sur le plan architectural sont décrits (Cf. Figure 4.25).
- La classe RB n°4 «EnrTech_1» dans laquelle les choix liés à l'enveloppe technique sont décrits (Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).
- La classe RB n°5 «Besoin_1» dans laquelle une estimation des besoins en chauffage et rafraîchissement est faite (Cf. Figure 4.29).

Les quatre premières classes vont permettre de faire une estimation des besoins en chauffage, rafraîchissement et ECS (Cf. Figure 4.29), et vont fournir une estimation concernant la qualité de l'enveloppe et de la conception architecturale, leur surcoût éventuel et les chances de chacun de garantir le confort d'été et d'hiver.

A. Classe RB n°2 : conception architecturale

Le choix des variables représentées dans ce réseau, sa structuration et le remplissage des tables de contraintes probabilistes, s'est basé sur la référence [ADEME'2000] qui part d'une démarche qui vise à composer avec le climat et l'enveloppe pour :

- réduire les besoins énergétiques,
- offrir un confort en toutes saisons,

pour ensuite compléter le reliquat d'énergie en ajoutant des systèmes performants et une production d'énergie renouvelable par exemple photovoltaïque.

Par sa conception architecturale le bâtiment doit être capable de satisfaire quatre fonctions principales décrites dans la section (Cf. § 2-1.1.3). Les éléments et fonctions majeurs intégrées dans la conception architecturale bioclimatique de bâtiments performants sont représentés dans ce réseau par des nœuds et des relations orientés suivant l'influence qu'ils ont les uns sur les autres (Cf. Figure 4.25).

Chaque réseau peut contenir des entrées et des sorties (Cf. Figure 4.25). Les entrées, représentées par des ellipses à fond gris et traits discontinus, reçoivent des données d'autres réseaux ou nœuds indépendants. Les sorties représentées par des ellipses à fond gris et traits continus vont alimenter d'autres réseaux ou nœuds.

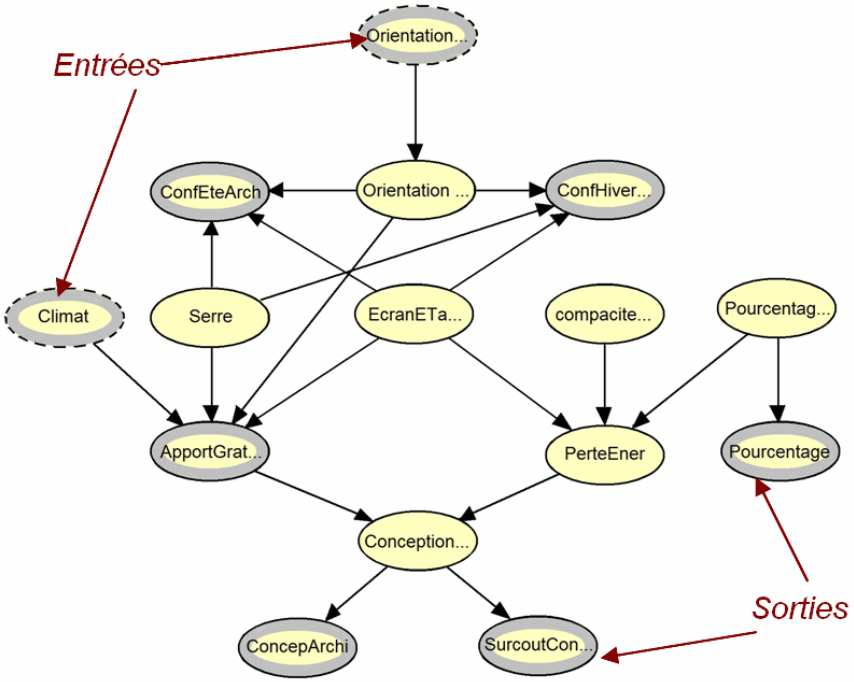


Figure 4.25 : -RB n° 2 - Choix Architecturaux

Ce réseau prend en entrées le type de climat et l'orientation du bâtiment, il fournit en sortie six valeurs qui peuvent être classées dans deux groupes :

1. Les sorties intervenant au premier sous-niveau, qui vont alimenter la classe RB n°5 «Besoin_1» qui permet de calculer les besoins énergétiques et la classe RB n°4 «EnvTech_1» afin d'évaluer la qualité de l'enveloppe (ApportGratuit et PourcentageVitrage) (Cf. Figure 4.24).

2. Les sorties externes au premier niveau, qui vont servir d'entrées à la classe enveloppe globale du deuxième niveau du RBOO (Cf. Figure 4.23). Ces entrées vont servir à estimer les probabilités d'atteindre les exigences du maître d'ouvrage, par rapport aux quatre critères définis, et par corps d'état. Concernant le surcoût de conception éventuel, l'hypothèse prise dans ce travail est qu'il est nul dans le cas de la conception architecturale [Fraefel'2007].

B. La classe RB n°4 : Enveloppe technique

Le réseau Bayésien qui évalue les choix de l'enveloppe technique tient compte de l'isolation des parois opaques et transparentes, leur inertie, ainsi que la perméabilité de l'enveloppe. Ce réseau prend en entrées, le climat et l'orientation à partir du réseau environnement et le pourcentage de vitrage à partir du réseau conception architecturale. Il prend également la position et l'épaisseur de l'isolant de la sous-classe SS-RB n°14 «Isolation_2» (Cf. Figure 4.27) qui rentre dans l'évaluation de la qualité énergétique et du surcoût de l'enveloppe. De même que le réseau précédemment décrit, ce réseau fournit en sortie une estimation de la qualité énergétique de l'enveloppe technique, de confort et de son surcoût éventuel. Ces trois sorties vont alimenter le deuxième niveau. Elle fournit également la qualité de l'isolation de la paroi opaque «IsoParOpac» et la qualité énergétique de l'enveloppe «QualitéEnerg» qui jouent un rôle dans la détermination des besoins.

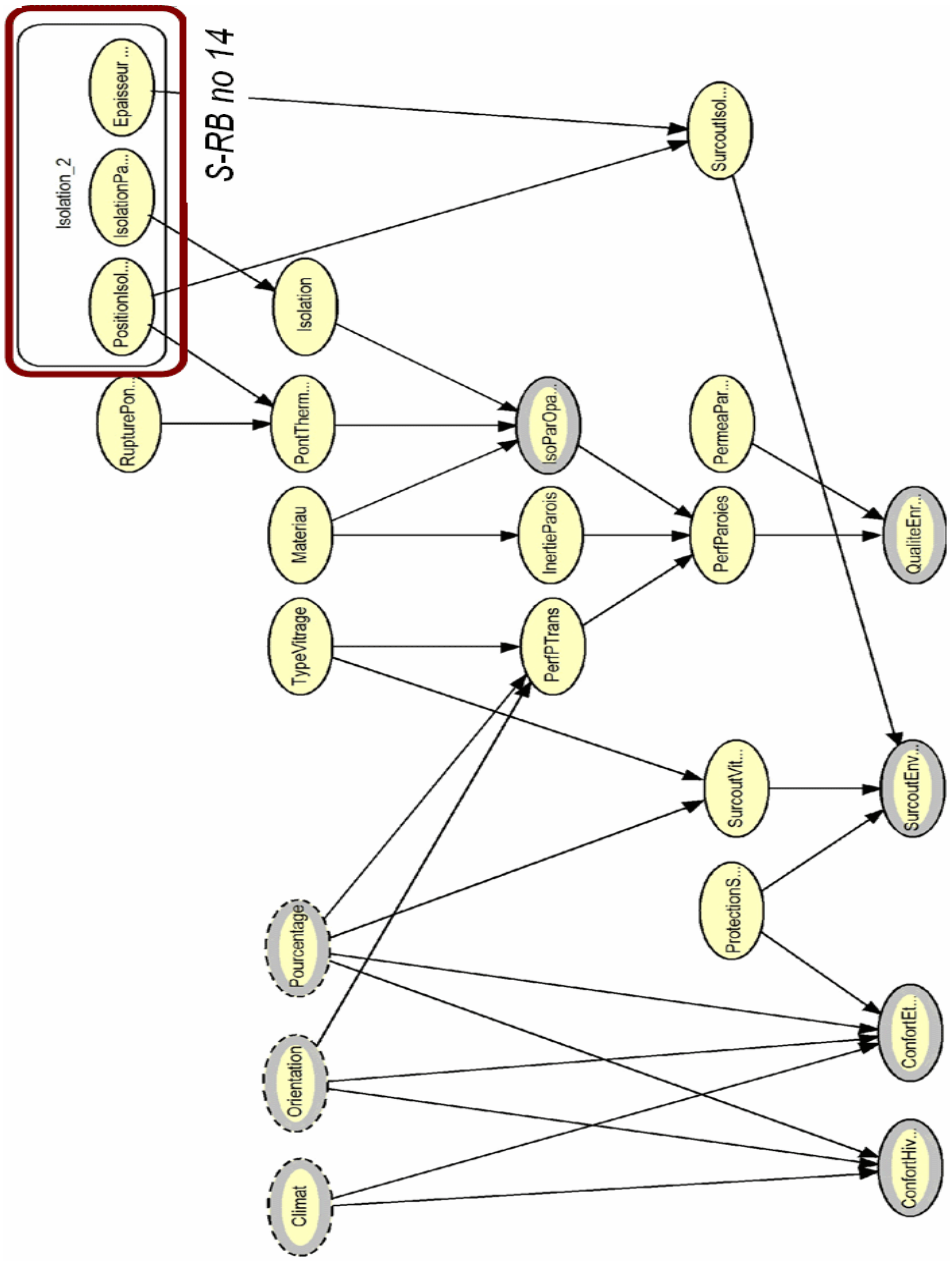


Figure 4.26 : -RB no.4 - Choix de l'enveloppe technique (Selon leur complexité, les classes peuvent être représentées par des sous-classes imbriquées, tel que le cas pour la classe enveloppe technique)

Tel que l'illustre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Figure 4.27 et Figure 4.28, ce réseau est constitué de classes imbriquées. Il est possible, en effet, de faire appel à cette configuration autant de fois que nécessaire et cela en fonction de la complexité d'une classe mère et du niveau de détail souhaité. L'intégration des idiomes (Cf. § 4-2.3.3) paraît pertinente pour structurer ce genre d'imbrications.

L'idiome le plus communément utilisé est l'idiome de définition et synthèse. Cet idiome couvre l'ensemble des cas où un nœud de synthèse est déterminé par les valeurs de ses parents en utilisant des lois de combinaison. Le sous-sous-réseau n°15 «IsolationMurs_2» en est un exemple. Dans ce cas, la qualité de l'isolation des murs est évaluée par rapport aux nœuds parents qui représentent : le type d'isolant, son épaisseur et sa position (Cf. Figure 4.28), il représente ainsi une synthèse de la combinaison de certains nœuds.

L'idiome cause/conséquence est utilisé pour modéliser un processus de causalité par des relations entre les événements (qui sont des entrées du processus) et leurs conséquences (qui sont ses sorties). Le processus de causalité permet de représenter la transformation d'une entrée existante en une nouvelle version, ou l'utilisation d'une entrée pour produire une sortie. Cet Idiome est utilisé dans un grand nombre de classes de ce modèle. En effet, la classe enveloppe technique représente un bon exemple. Elle illustre les conséquences qu'ont les différents choix (les causes) sur la consommation d'énergie, le surcoût et le confort (Cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) qui serviront d'entrées vers d'autres classes.

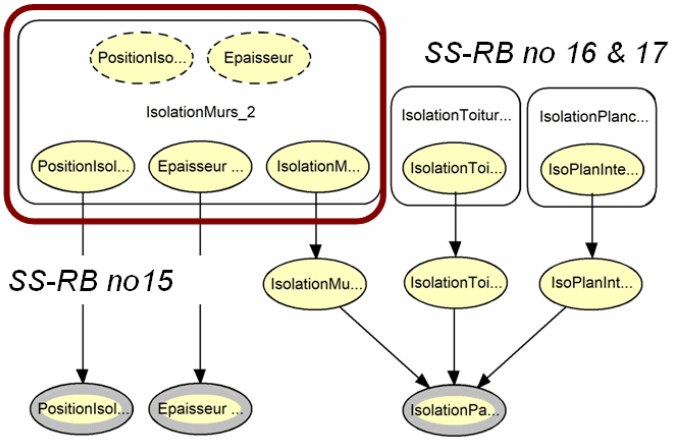


Figure 4.27 : Représentation du sous-réseau S-RB no14

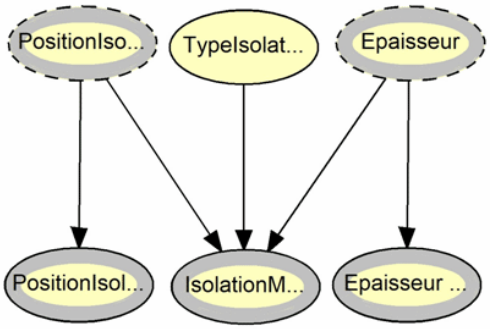


Figure 4.28 : Représentation du SS-RB no15 : Isolation des Murs

C. La classe RB n°5 : Calcule des besoins énergétiques

La construction du réseau Bayésien qui évalue les besoins énergétiques d'une conception se base sur les principes et les hypothèses suivants (Cf. Figure 4.29) :

- L'appel au chauffage peut être réduit grâce à des apports énergétiques «gratuits» tels que les apports internes liés à l'activité humaine et qui sont représentés dans le RBOO par la classe «Apports Internes» (Cf. Annexe 7) [ADEM'2000] :

  Ces apports internes ajoutés aux apports gratuits résultant de l'évaluation des choix architecturaux vont permettre d'estimer les apports pour le chauffage, qui représentent des charges pour la climatisation. En ajoutant à cela la donnée correspondant au climat il est possible de définir les besoins en rafraîchissement. Le calcul des besoins en chauffage nécessitent l'intégration de la qualité de l'enveloppe technique.

- La qualité de l'enveloppe technique a été négligée dans le calcul des besoins de rafraîchissement, car son impact est moindre par rapport au chauffage. Tout en sachant que si une enveloppe est très isolée et qu'une ventilation nocturne n'est pas faite, les apports internes sont conservés dans les espaces et donc augmentent les besoins de climatisation par exemple.
- Pour calculer les besoins en ventilation seule l'isolation des parois a été prise en compte. Car, à dire d'experts un bâtiment très isolé nécessite une bonne ventilation pour assurer une bonne qualité de l'air.
- Pour ce qui est des besoins en ECS seul le type d'occupation a été pris en compte.

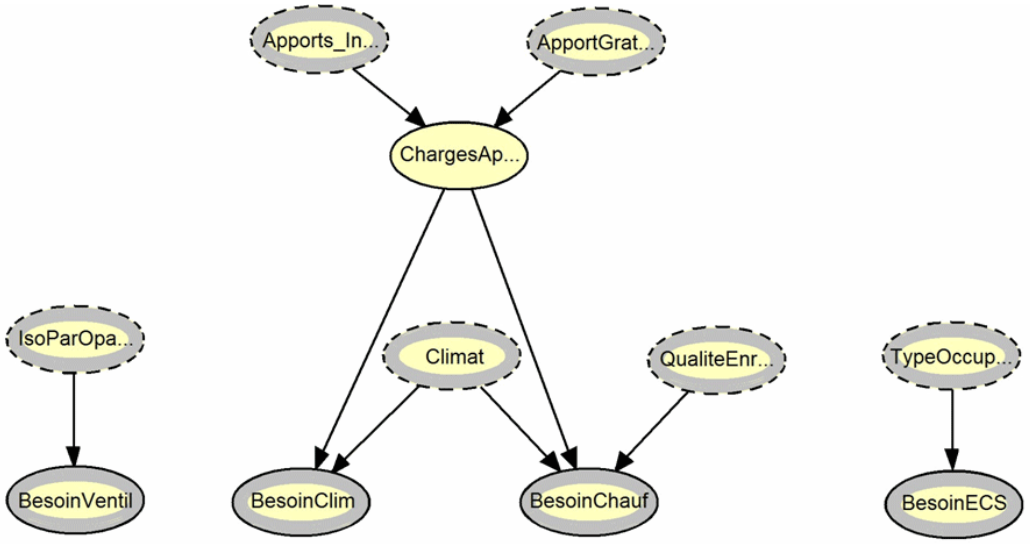


Figure 4.29 : -RB no.5- Définition des besoins

D. Les classes RB n°6 : Production d'énergie et RB n°7 : Système actif

Ces réseaux sont structurés de manière à faire un parallèle entre les besoins énergétiques et les choix réalisés en terme de systèmes HVAC et de production d'énergie (Cf. Figure 4.30). La qualité des choix des systèmes est estimée par rapport à leur capacité à répondre aux besoins calculés dans le premier sous niveau en fonction du type d'occupation.

Pour l'évaluation du confort d'été et d'hiver, la qualité des choix des systèmes est confrontée à la qualité de la ventilation. A dire d'experts, une ventilation importante réduirait le confort d'hiver et augmenterait le confort d'été (Cf. Figure 4.30).

Seuls les choix des systèmes rentrent dans l'évaluation de leur qualité énergétique et leur surcoût éventuel (Cf. Figure 4.30). Dans le cadre de cette recherche, le choix des systèmes s'est limité à trois types pour chaque système. Ces types ont été choisis de telle sorte que leur influence sur les trois critères d'évaluation soit variable.

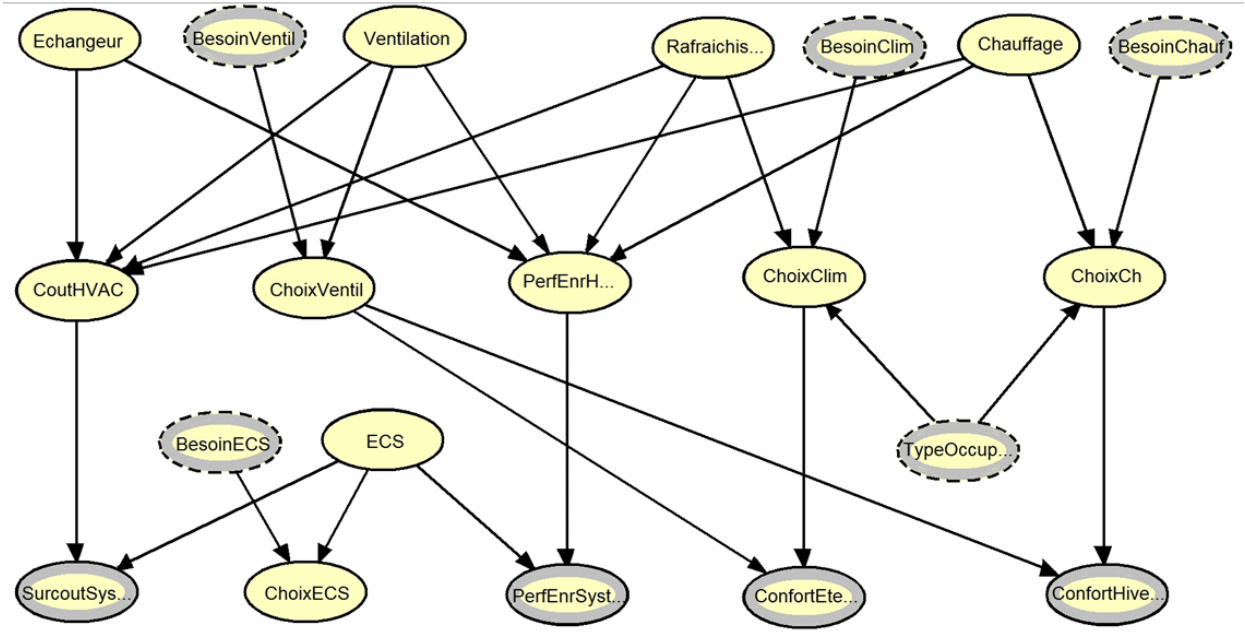


Figure 4.30 : - RB no.7 - Evaluation des choix des systèmes

2.3.4.2 Renseignement des tables de probabilités conditionnelles

La table de probabilités conditionnelles présentée dans la Figure 4.31 illustre les poids fournis pour chaque combinaison dans le choix des systèmes de rafraîchissement. L'estimation de ce choix s'est faite par rapport au type d'occupation, au besoin de rafraîchissement du type de système choisi (Cf. Figure 4.30). Les poids donnés pour chaque combinaison ont été quantifiés à dire d'experts.

L'idéal dans le cas de l'implémentation d'un réseau Bayésien qui prend en compte l'évaluation de combinaisons de choix multiples, et dont les résultats le sont tout autant, est d'y appliquer de l'apprentissage (Cf. § 5-.2.2) pour être sûr de donner des poids fiables qui reflètent la réalité. La recherche n'étant pas encore aboutie [Langseth'2004], sur ce plan par rapport au Réseaux Bayésiens Orienté Objet, les outils ont manqué pour l'appliquer à ce réseau.

ChoixClim

TypeOccupatio	Tertiare									HIndividuel	
BesoinClim	Bas			Moyen			Important			Bas	
Rafraichisseme	PAC	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai
Mauvais	0	0	0.5	0	0	0.75	0.5	0	1	0	1
Moyen	0.5	0	0.5	1	0	0.25	0.5	0	0	0.5	0
Bon	0.5	1	0	0	1	0	0	1	0	0.5	0

TypeOccupatio	HIndividuel							HCollectif			
BesoinClim	Bas	Moyen			Important			Bas			Moyen
Rafraichisseme	Passif	PAC	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai	Passif	PAC
Mauvais	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Moyen	0	0.4	0	0.4	0.2	0	0.6	0.5	0	0	0.4
Bon	1	0.6	0	0.6	0.8	0	0.4	0.5	0	1	0.6

TypeOccupatio	HCollectif				
BesoinClim	Moyen		Important		
Rafraichisseme	ClimSolai	Passif	PAC	ClimSolai	Passif
Mauvais	1	0	0	1	0
Moyen	0	0.4	0.2	0	0.6
Bon	0	0.6	0.8	0	0.4

Figure 4.31 : Représentation de la table de probabilités conditionnelles du noeud lié au choix de rafraîchissement

Pour illustrer les possibilités offertes par les Réseaux Bayésiens Orientés Objet dans le cadre du commissionnement et l'aide à la décision des bâtiments à faible consommation d'énergie, ce travail s'est basé lors du renseignement des tables de probabilités conditionnelles sur la base de règles d'experts et en introduisant quelques d'hypothèses :

- le surcoût de l'enveloppe et des systèmes est équilibré,
- la performance de l'enveloppe a plus de poids que celle des systèmes,
- l'estimation des surcoûts ne prend en compte que le coût des systèmes ou composants et pas leur installation ni leur maintenance (pour plus de précisions une étude technico-économique serait nécessaire),
- la qualité de l'enveloppe est négligée dans le calcul des besoins en climatisation,
- etc.

L'application de cet outil est présentée dans le chapitre 5. L'exploitation d'un réseau Bayésien à partir d'Hugin devient plus difficile à mesure que le réseau s'agrandit. C'est pour cela qu'un prototype d'interface a été imaginé pour faciliter son utilisation.

2.4 IMPLÉMENTATION D'UN PROTOTYPE D'INTERFACE POUR L'OUTIL DYNAMIQUE

Dans le cas de réseaux Bayésiens importants, le choix des variables et la lecture des résultats directement sur l'outil HUGIN est fastidieuse (Cf. Figure 4.32). De ce fait, un prototype d'interface a été développé pour faciliter la tâche du commissionnaire et de la maîtrise d'ouvrage.

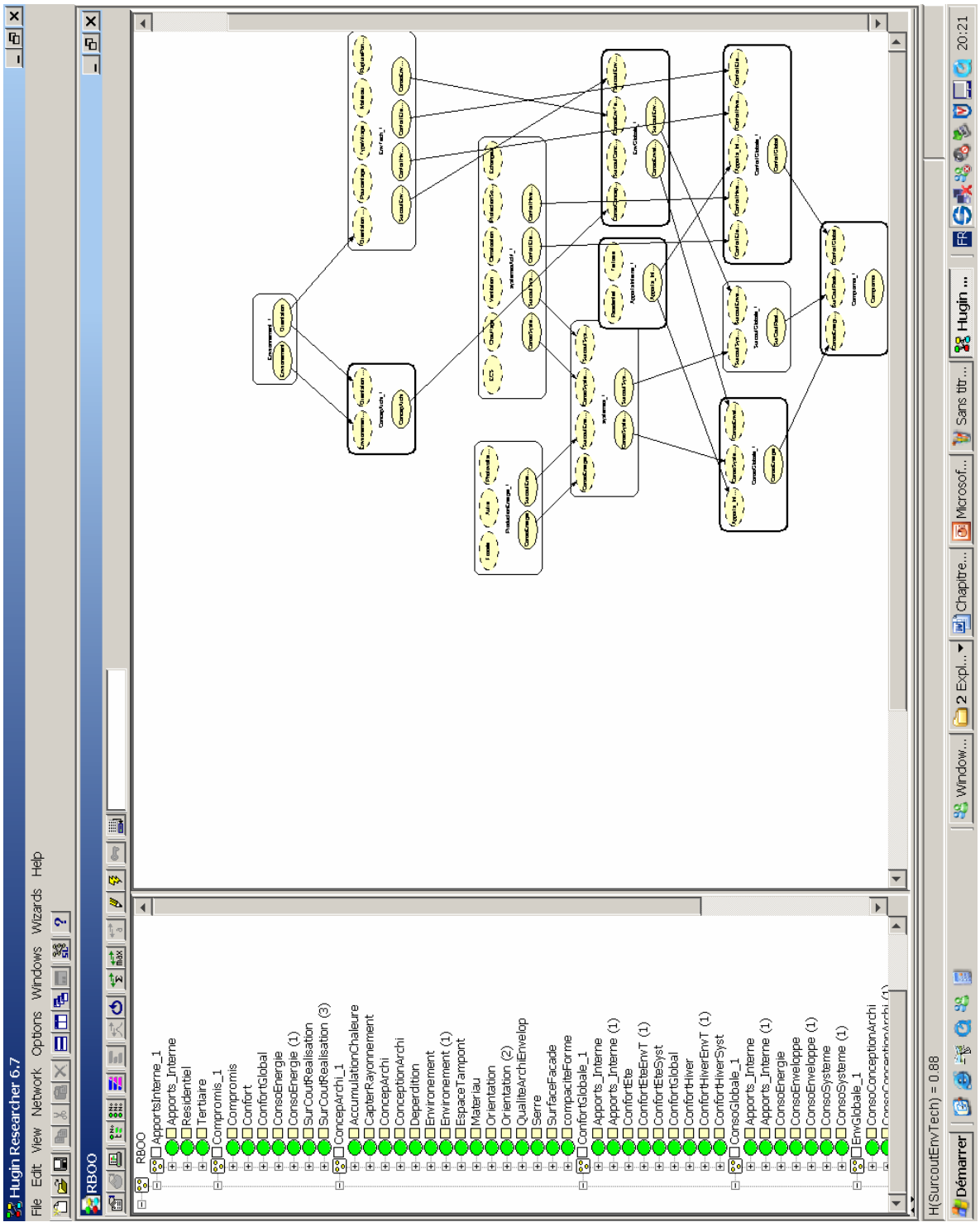


Figure 4.32 : Illustration de la lecture des résultats d'une évaluation sur l'outil Hugin dans le cas d'un réseau de grande taille

L'environnement Visuel Basic a été choisi pour implémenter cette interface, et pour à terme réaliser une interface commune avec celle de l'outil statique. Une API (*Application Programming Interface*) utilisée par Hugin, et un serveur Active x (Cf. Figure 4.33.) ont été utilisés pour piloter l'ensemble des fonctions, procédures, et propriétés du logiciel Hugin sous environnement Visual Basic [Hugin'2007].

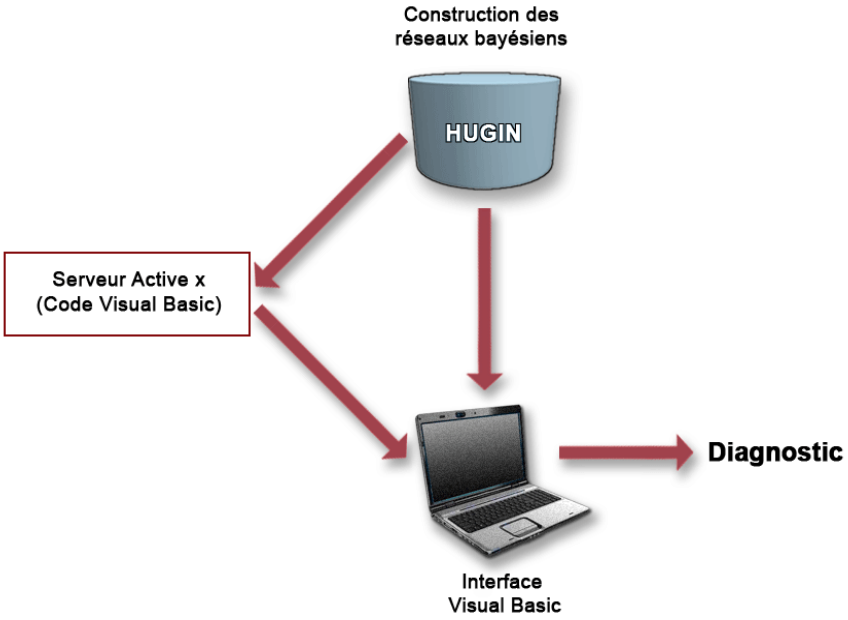


Figure 4.33 : Schématisation des outils nécessaires à l'implémentation de l'outil dynamique

L'interface implémentée permet de sélectionner les choix pour lesquels les informations sont connues parmi une liste de nœuds. Cette sélection peut être liée aux choix de la maîtrise d'ouvrage ou de la maîtrise d'œuvre ou des contraintes fixes du programme et de l'environnement qui vont permettre au commissionnaire de diagnostiquer l'impact sur les critères d'évaluation. Cette interface permet également de connaître l'impact des choix sur les nœuds intermédiaires, sur lesquels il serait souhaité d'observer les résultats, tel que la qualité de l'enveloppe ou des systèmes HVAC (Cf. Figure 4.34).

Ce diagnostic peut se faire à n'importe quel niveau du modèle (nœuds finaux ou intermédiaires), et dans les deux sens de la propagation de l'information : commissionnement et aide à la décision.

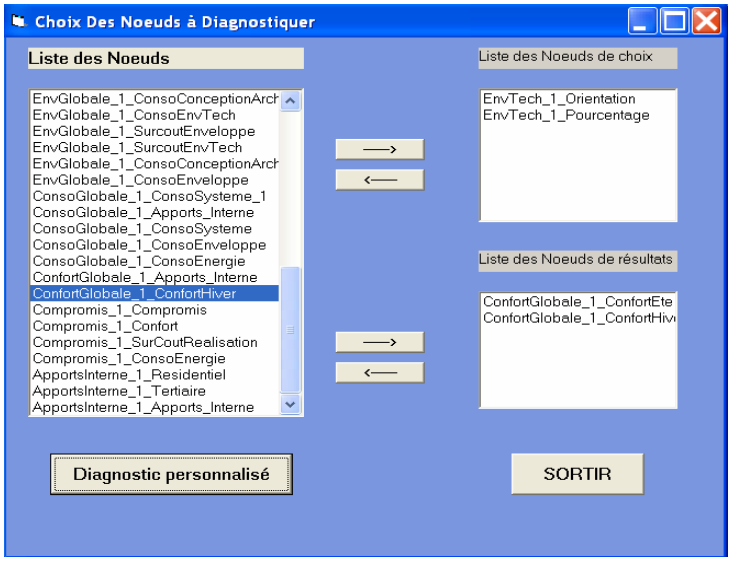


Figure 4.34 : Prototype d'interface : Choix des nœuds à diagnostiquer

Une fois le choix des nœuds d'entrées et de sortie déterminé, le diagnostic apparaît dans la fenêtre «Diagnostic personnalisé» représentée dans la Figure 4.35. Cette fenêtre affiche d'un côté les nœuds sur lesquels les choix sont fixés, et de l'autre les nœuds représentant les critères d'évaluation ou d'autres nœuds intermédiaires pour lesquels le résultat du diagnostic sera observé. Cette interface offre la possibilité d'afficher le pourcentage de chaque résultat. L'intérêt de cette option est qu'elle permet d'avoir une vision plus juste des résultats. Dans le cas présenté dans la Figure 4.35, le résultat qui s'affiche dans la fenêtre «Diagnostic personnalisé» est que la qualité énergétique de l'enveloppe est bonne, or dans la réalité la qualité énergétique de cette enveloppe varie de très peu entre bonne et très bonne.

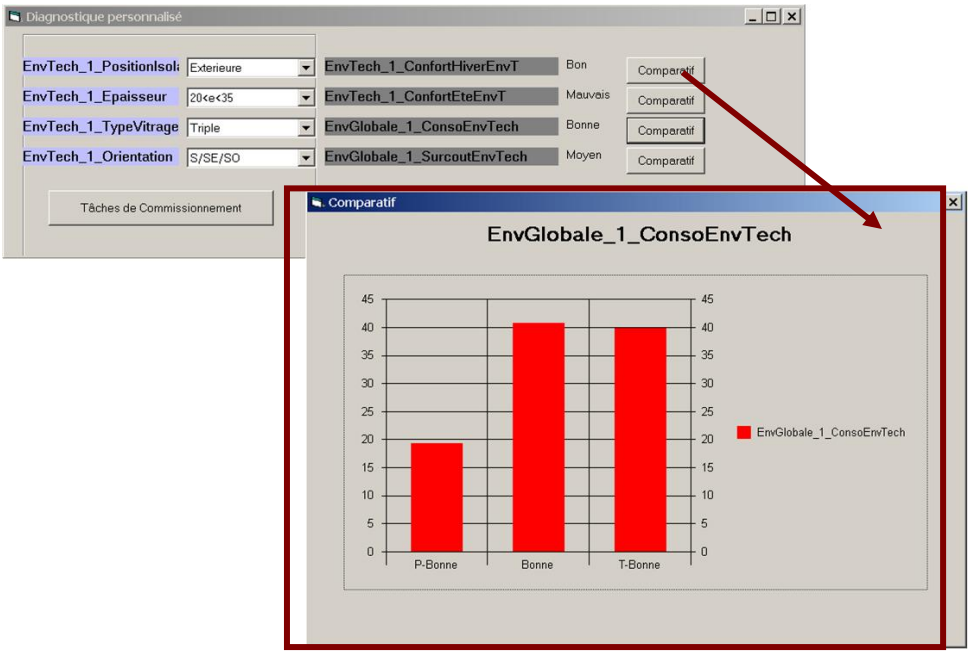


Figure 4.35 : Fenêtre représentant le résultat de l'inférence

Cette interface n'est qu'un prototype qui vise à faciliter l'accès aux réseaux Bayésiens. Elle représente une première phase qui reste à perfectionner. Une interface commune entre les deux outils a été prévue, mais elle n'est pas disponible à l'état actuel de ce travail.

3. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté l'implémentation de la boite à outils dynamiques dont l'objectif est de mettre à jour le plan de commissionnement initial. La première partie de ce chapitre a exposé différentes manières de réaliser des diagnostics et des vérifications des performances énergétiques d'un bâtiment. Elle a décrit par la suite les réseaux Bayésiens, l'environnement adopté dans la réalisation de l'outil dynamique, les étapes de son développement et les différents métiers du bâtiment qui peuvent l'exploiter tout au long de son cycle de vie.

La deuxième partie de ce chapitre a décrit l'implémentation des quatre versions de l'outil dynamique. L'implémentation de ces outils a varié suivant le domaine qu'ils commissionnent, l'importance de la connaissance disponible dans chaque domaine, leur flexibilité et le champ d'application de chacun (nombre de critères d'évaluation). Les choix introduits dans cet outil, se limitent à ceux des deux phases «programmation» et «esquisse» de l'activité de conception (Cf. § 1-1.4.1) qui ont le plus d'impacte sur la performance énergétique.

Ainsi, la première version de l'outil développé a un champ d'application restreint à une phase du processus et à une typologie de bâtiment dont les choix sont limités et leurs conséquences sur la performance énergétique connues. La deuxième version vise un champ d'application plus vaste, dont les combinaisons de choix sont trop nombreuses pour que leurs impacts soient tous connus et quantifiés. L'implémentation du ce réseau Bayésien a nécessité l'intégration de l'apprentissage - à partir d'une base de données de cas réels ou simulés- comme mode de renseignement des tables de probabilités. La troisième version intègre plusieurs critères d'évaluation. En effet, en plus de l'évaluation de la performance énergétique, elle permet d'évaluer le surcoût éventuel d'une construction par rapport à un bâtiment courant, le confort d'été et le confort d'hiver. Pour ce faire cet outil a fait appel à des Réseaux Bayésiens Orientés Objet. Ce réseau est composé d'un ensemble de classes reliées entre elles. Chacune de ces classes correspond à un réseau Bayésien qui permet d'évaluer un des critères d'évaluation. Cet outil, tout comme le deuxième utilise l'apprentissage pour renseigner ses tables de probabilités conditionnelles.

Ces trois outils connaissent une limite importante qui les rend difficilement extensibles à l'ensemble du cycle de vie du bâtiment et à l'ensemble de ses niveaux de détail. Cette limite est la taille des réseaux. En effet, plus un réseau Bayésien est grand moins ses résultats sont fiables. C'est pour cela qu'une quatrième version de l'outil dont la structure est plus flexible et plus adaptée à cette problématique à été développé sur la base des RBOO. Etant donné le manque d'outil pour faciliter le renseignement des tables de probabilités par apprentissage, celles-ci ont été alimentées à titre indicatif à dire d'expert. Une fois la recherche sur le plan de l'apprentissage des Réseaux Bayésiens Orientés Objet abouti [Langseth'2004], ce réseau pourrait être enrichi et affiné. En effet, l'avantage de ce type d'outil est qu'il permet la mise à jour régulière du réseau Bayésien que ce soit par rapport à sa structure, en ajoutant plus de choix, plus de critères d'évaluation ou de relation; ou en affinant ces tables de probabilité grâce à l'apprentissage en se basant sur des données empiriques qui s'appuient sur de nouvelles expériences.

Ces outils permettent de réaliser des diagnostics rapides par rapport à des choix. Ils évaluent les possibilités d'un projet d'atteindre les exigences (performances énergétique et autres) décrites par le maître d'ouvrage en fonction des contraintes existantes et des orientations du programme. Ils offrent également la possibilité de faire de l'aide à la décision, en orientant le maître d'ouvrage vers un changement d'objectifs, dans le cas ou ceux définis dans le programme ne peuvent être respectés et d'identifier leurs causes. Ils visent également à cibler avec plus de précision les systèmes sensibles qui nécessitent plus d'attention dans un projet. Toutes ces fonctions vont permettre d'assister le commissionnaire dans la mise à jour du plan de commissionnement initial en ajoutant ou éliminant des tâches de commissionnement, permettant ainsi de l'alléger, et de le rendre plus précis.

L'application, les avantages et les limites de ces outils sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5

EXPÉRIMENTATION DE LA BOITE À OUTILS

Ce chapitre décrit les possibilités d'application des outils développés dans cette thèse. La première partie présente l'expérimentation de l'outil statique dans le cadre d'un cas réel. La deuxième partie décrit les différentes applications possibles des quatre versions de l'outil dynamique (outil d'assistance à la mise à jour du plan de commissionnement initial) dans les domaines de commissionnement et d'aide à la décision, leurs avantages et leurs limites. Enfin, la troisième partie illustre d'une part, le fonctionnement de ces deux outils ensemble, ainsi que les apports de cette méthodologie dans un cas comme la réhabilitation de Fontenay Sous-Bois (Cf. § 2-1.2.1).

1. EXPERIMENTATION DE L'OUTIL STATIQUE

1.1 DESCRIPTION DU CADRE D'APPLICATION

Le projet sur lequel porte l'expérimentation est un projet de réalisation d'un bâtiment à usage de bureau d'environ 700m² utiles. Ce projet représente une extension du bâtiment B18 «résidence feu» au sein du CSTB, Champs Sur Marne. Il est destiné à accueillir une trentaine d'agents du CSTB. Il se développe sur deux étages, un rez-de-chaussée et un niveau de sous sol.

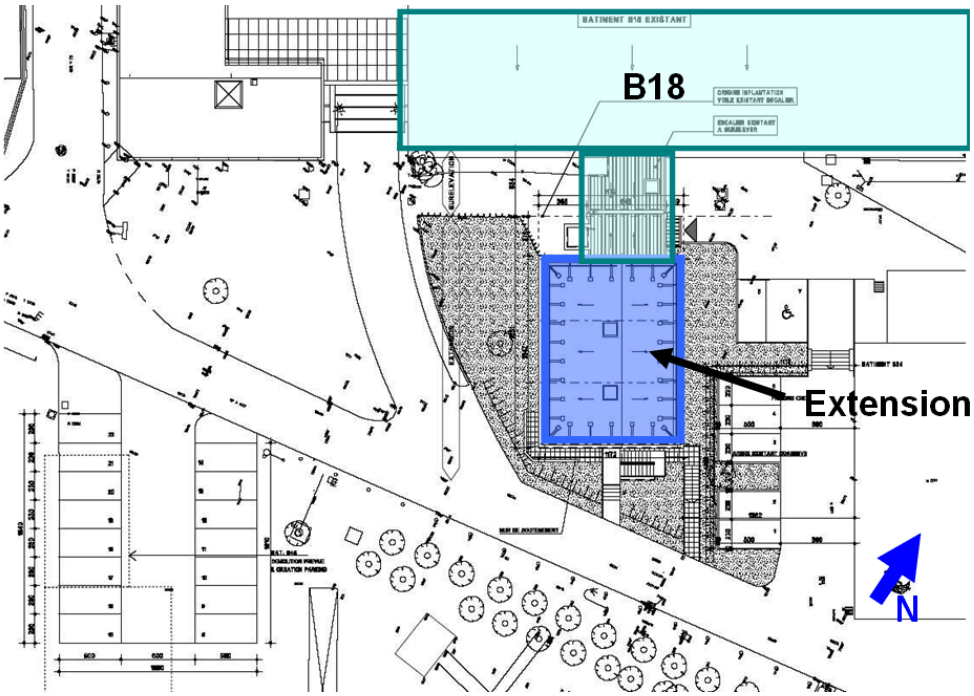


Figure 5.1 : Plan masse du projet B18

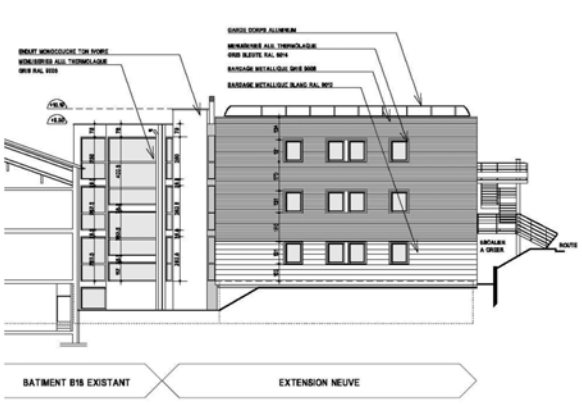


Figure 5.2 : Façade OUEST du projet B18

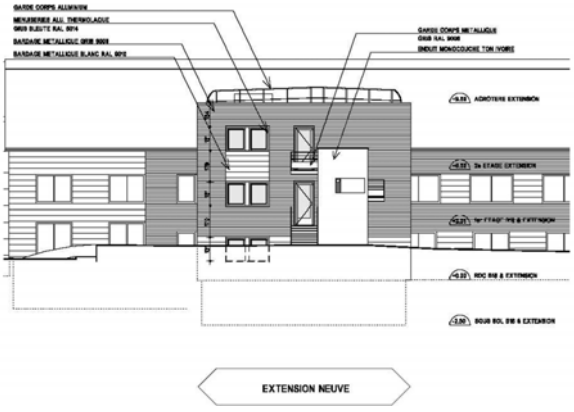


Figure 5.3 : Façade SUD-OUEST du projet B18

Le bâtiment projeté est disposé perpendiculairement au bâtiment B18 ; avec des façades orientées NORD, EST/SUD, OUEST (Cf. Figure 5.1, Figure 5.2 et Figure 5.3). Il se raccorde au bâtiment existant par la cage d'escalier principale du bâtiment B18, auquel est ajouté un étage pour les besoins du projet. Le parti architectural propose un volume principal parallélépipédique aux lignes horizontales. Pour des raisons fonctionnelles, les planchers du bâtiment B18 et ceux de l'extension sont alignés.

Ce projet se veut conforme à la Réglementation Thermique 2005, et intègre un ensemble de systèmes performants tels qu'un puits provençal, une ventilation double flux, des stores orientables, un système d'éclairage temporisé plus interrupteurs. Il respecte toutes les autres réglementations qui incombent au bâtiment sécurité, accessibilité aux handicapés etc.

Le CSTB représente dans le cadre de ce projet la maîtrise d'ouvrage. Il a fait appel pour la maîtrise d'œuvre à un atelier d'architecture, un économiste du bâtiment, un bureau d'étude thermique fluide et un bureau d'étude structure.

1.2 DESCRIPTION DE LA PROCEDURE D'EXPÉRIMENTATION DE L'OUTIL STATIQUE DANS LE CADRE DU PROJET D'EXTENTION DU B 18

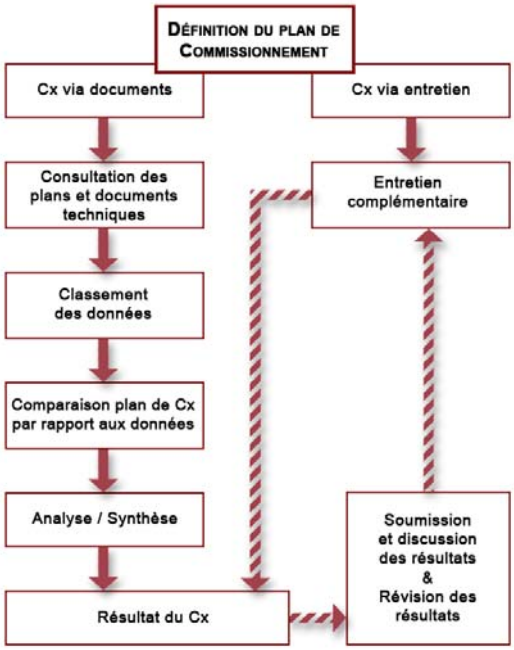


Figure 5.4 : Schématisation de la procédure d'application de l'outil statique

Le projet étant en phase «PROjet», l'expérimentation s'est faite en deux temps, une première phase dans laquelle le commissionnement a porté sur les phases amonts à la phase Projet sur la base de l'ensemble de la documentation disponible. La deuxième phase s'est faite au fur et à mesure que le projet avançait et qu'une phase était terminée. Une discussion avec le maître d'ouvrage s'est faite sur la base d'un rapport de synthèse (Cf. Figure 5.4).

Comme l'illustre la Figure 5.4, la première étape visait à étudier la documentation du projet phase par phase, en la confrontant au plan de commissionnement initial, pour recenser les manques dans les dossiers et pour voir si les informations traitées et apportées dans chaque dossier répondent aux exigences de la phase en question. Le commissionnement réalisé sur ce projet s'est fait à l'échelle globale.

Une analyse et une synthèse des résultats du commissionnement et leur répercutions sur les phases suivantes ont été ensuite collectées dans un rapport. Suite à cela, une entrevue avec le maître d'ouvrage (architecte en charge du suivi) a été organisée pour répondre aux questions liées aux tâches de commissionnement qui n'ont pas pu être traitées en utilisant la documentation.

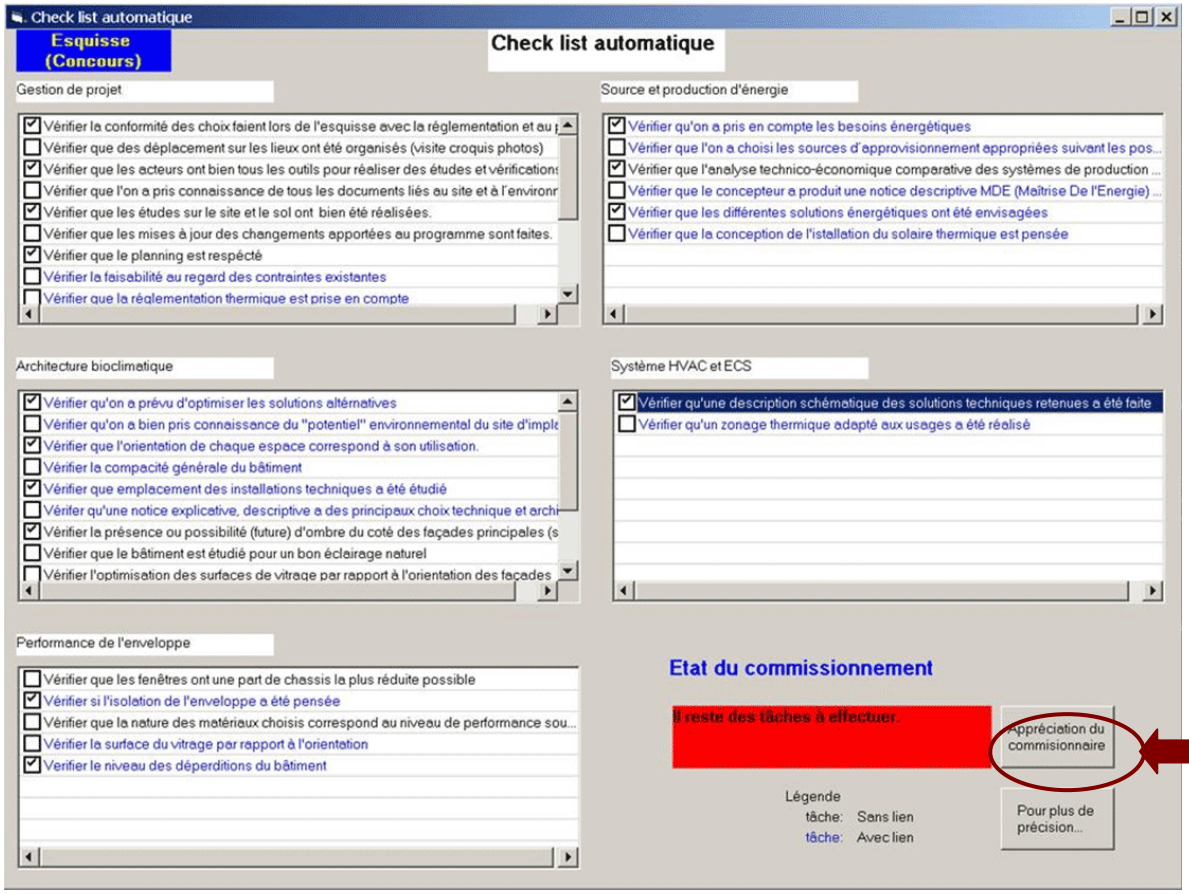


Figure 5.5 : Plan de commissionnement de l'étape Esquisse

La procédure utilisée pour mettre en place le rapport de commissionnement est la suivante. Après avoir réalisé l'ensemble de vérifications nécessaires de la phase esquisse par exemple, en se basant sur le plan de commissionnement présenté dans la Figure 5.5, le commissionnaire clique sur la touche «Appréciation du commissionnaire» (Cf. Figure 5.5) pour faire apparaître la fenêtre dans laquelle il va définir le niveau de satisfaction du commissionnement réalisé (bon, mauvais ou nécessitant des révisions) et noter des commentaires (Cf. Figure 5.6). Ces commentaires seront enregistrés dans le répertoire du projet. Ils seront précédés par l'étape à laquelle ils correspondent et le niveau de satisfaction que le commissionnaire aurait donné (Cf. Figure 5.7).

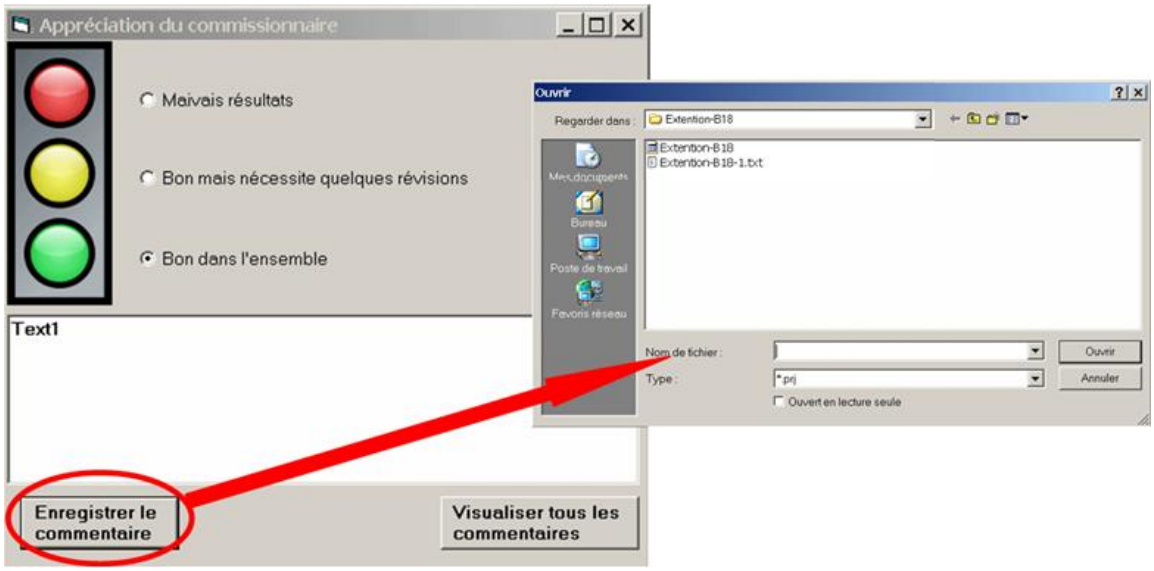


Figure 5.6 : Mise en place de l'appréciation du commissionnaire et ouverture du compte rendu du projet

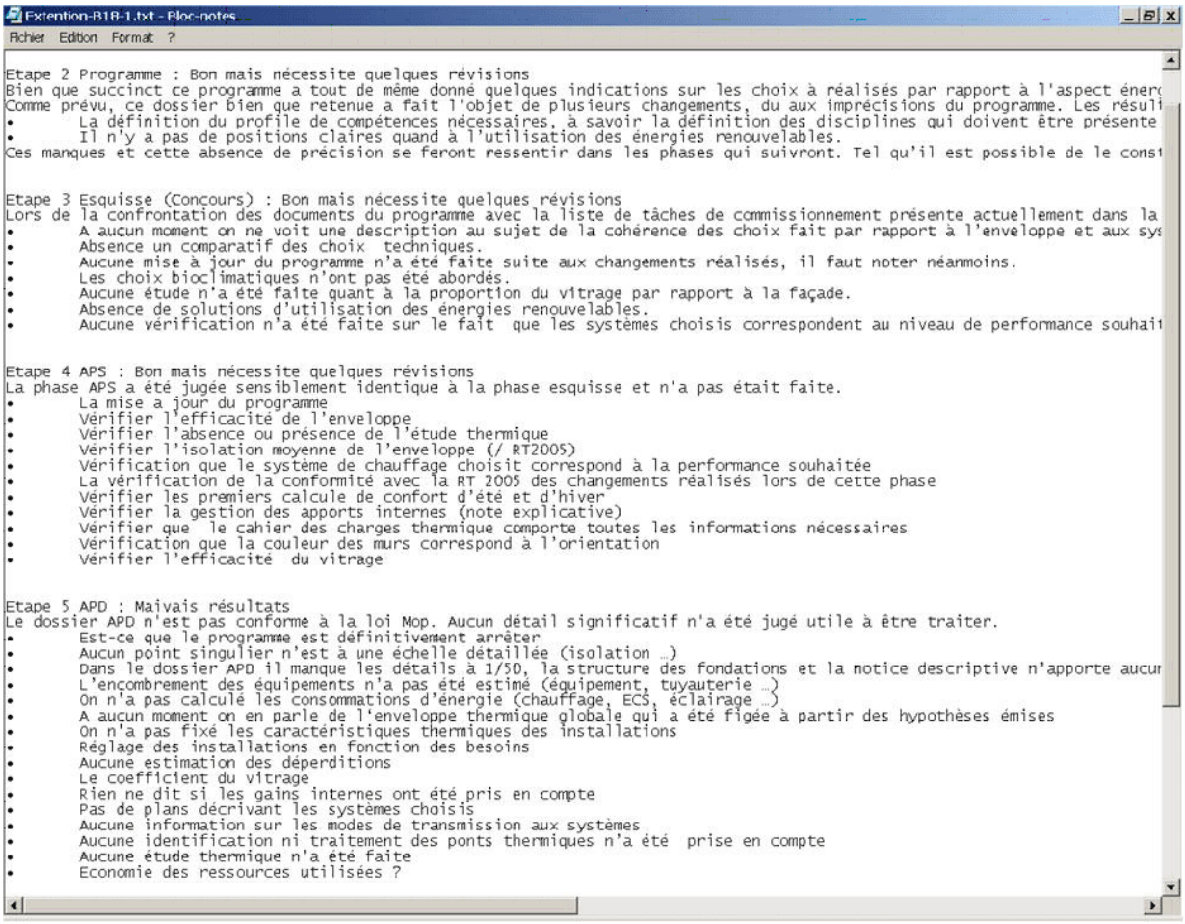


Figure 5.7 : Aperçu du compte rendu de commissionnement

1.3 SYNTHÈSE DE L'EXPÉRIMENTATION

Au cour de la réalisation de ce travail, de nombreux changements ont été apportés à ce projet. Parmi ces changements, deux des systèmes «Performants» prévus dans le programme on été écartés ; le puits provençal et la ventilation double flux. Ces changements, motivés par des restrictions budgétaires et des raisons techniques (une mise en œuvre trop lourde par rapport à l'apport d'un puits provençal pour ce cas, par exemple) se sont faits au détriment des exigences énergétiques.

Cette expérimentation met en évidence l'hypothèse émise dans le deuxième chapitre de cette thèse, à savoir les imprévus qui peuvent réduire considérablement les performances d'un bâtiment. Cet état de fait reflète l'intérêt d'un processus de commissionnement qui rappelle les pertes possibles de qualité. Dans un cas comme celui-ci, le plan de commissionnement aurait dû être mis à jour suivant les nouveaux objectifs. Pour des raisons de confidentialité, l'expérimentation c'est arrêtée à la phase d'exécution du processus de conception (Cf. 1-1.4.1).

2. LES APPLICATIONS DE L'OUTIL DYNAMIQUE

Cette section vise à décrire les modes d'application des quatre versions de l'outil dynamique développées dans cette recherche, leurs avantages et leurs limites. Etant donné l'inachèvement de l'interface, l'application et la lecture des résultats se fait directement sur l'outil Hugin.

2.1 APPLICATION DE LA VERSION 1 : EVALUATION DES MAISONS INDIVIDUELLES

La Figure 5.8 représente le réseau Bayésien développé pour l'évaluation de la thermique d'hiver des maisons individuelles par rapport à la RT2005 (Cf. § 4-2.1). Les fenêtres de contrôle qui y figurent permettent de formuler un choix[22] parmi plusieurs possibilités pour un nœud, et de visualiser l'incidence de ces choix sur les autres nœuds du réseau.

[22] Suite à la selection de l'état voulu pour chaque nœud qui se met à 100% et en rouge.

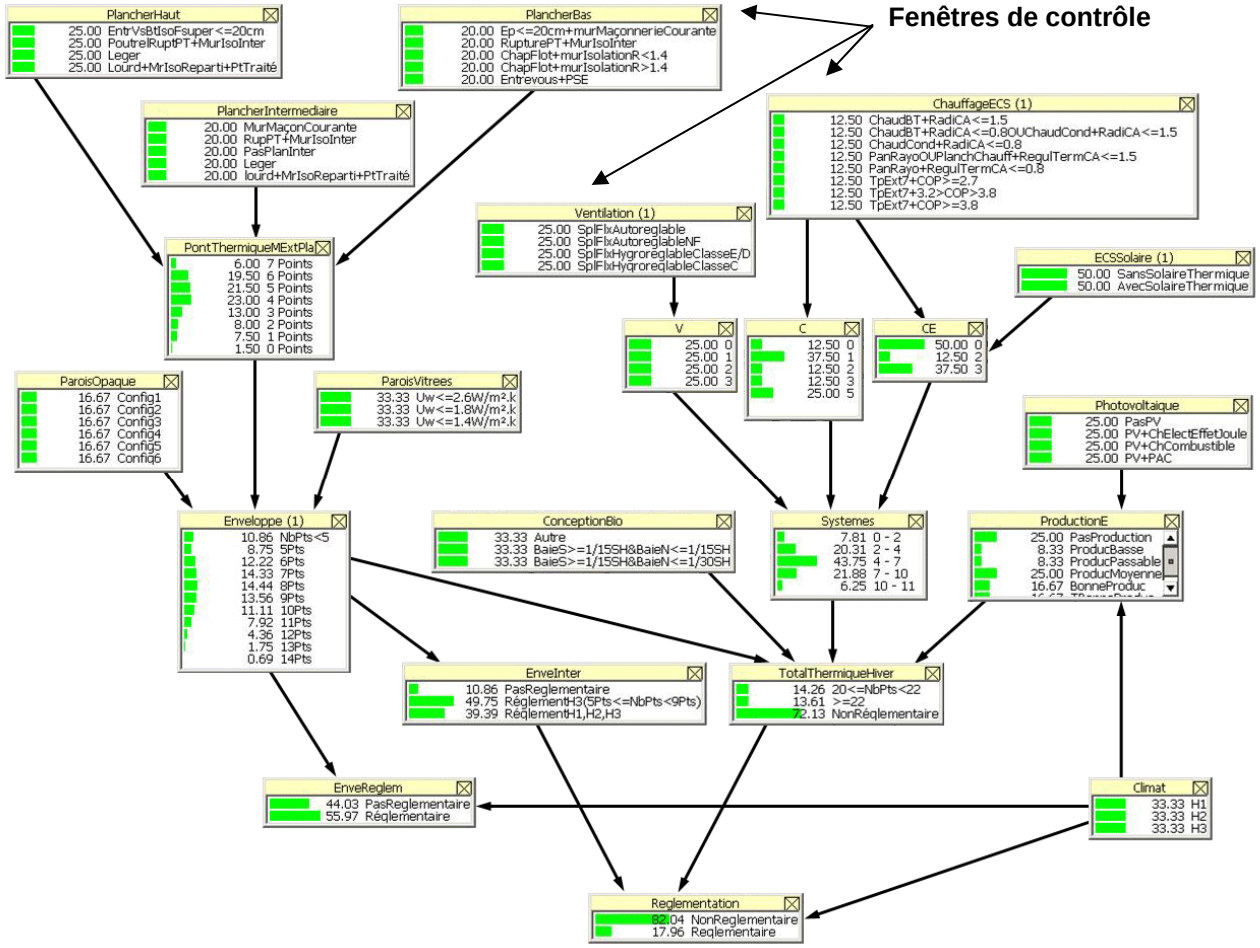
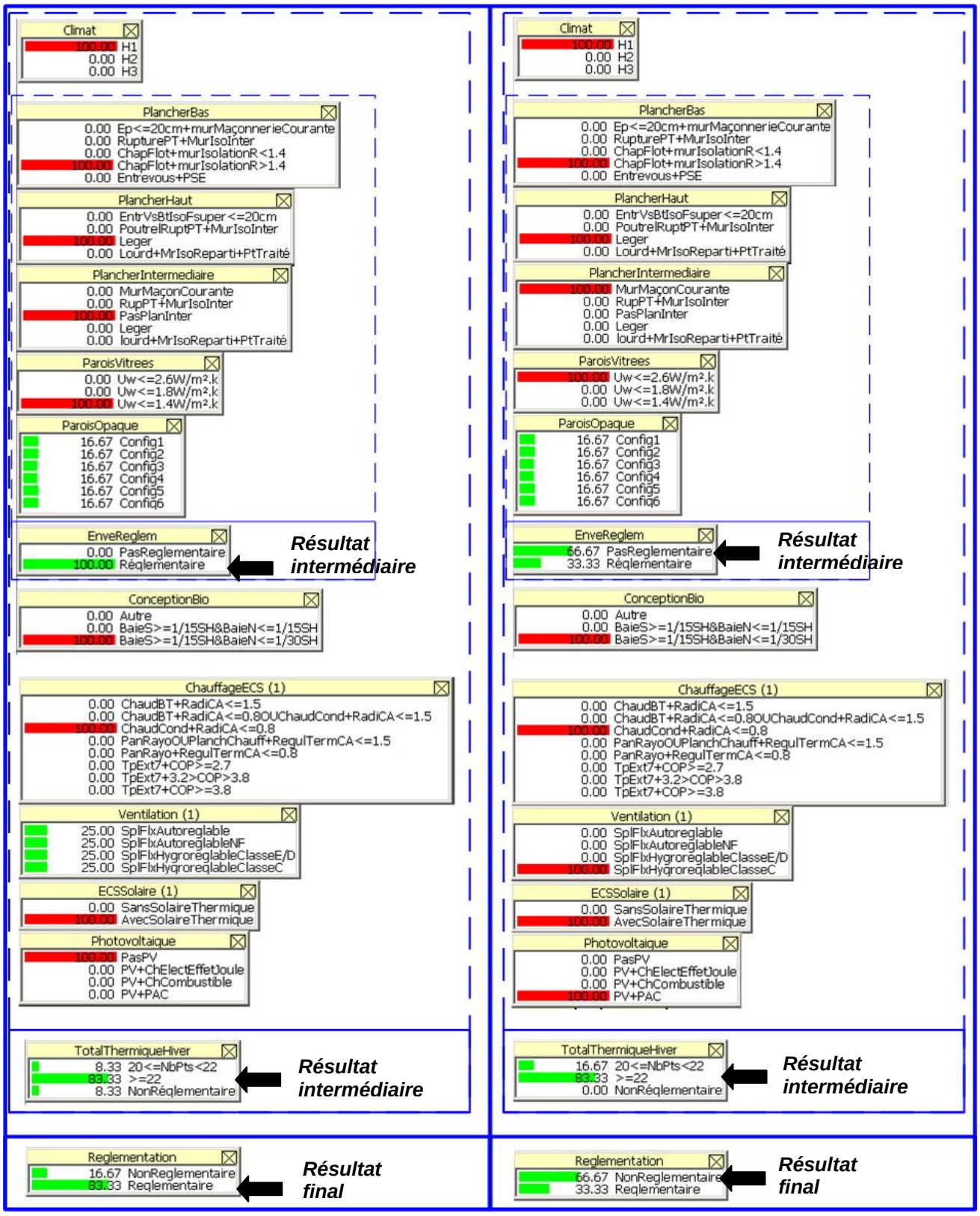


Figure 5.8 : Représentation du réseau Bayésien de la 1^{ére} version de l'outil dynamique : MI/RT2005 et de ses tables de contrôle

2.1.1 DESCRIPTION DES APPLICATIONS POSSIBLES DE L'OUTIL

Cet outil est étudié sur le cas d'une maison virtuelle à rez-de-chaussée et comble non accessible. Cette maison est située en zone climatique H1 et respecte la RT 2005. Il est considéré que seules les caractéristiques suivantes de cette maison sont connues (chacune de ces caractéristiques permet d'obtenir un nombre de points) :

- Surface baies Sud>= 1/15 SH & Surface baies Nord>= 1/30SH *(donne 2 points)*
- Pont thermique entre Mur extérieur et Plancher :
    - Pas de plancher intermédiaire *(donne 2 points)*
    - Plancher Haut léger *(donne 2 points)*
    - Plancher Bas : Chape flottante ou dallage désolidarisé du mur par un isolant de résistance thermique supérieure ou égale à 1.4m².K/W *(donne 3 Points)*
- Triple vitrage (1.4 W/m².K) *(donne 2 Points)*
- Chauffage : Chaudière à condensation + CA<=0.8 *(donne 5 Points)*
- ECS : Avec énergie Solaire *(donne 2 Points)*
- Pas d'installation solaire photovoltaïque *(0 Points)*



Colonne de gauche : Etude des probabilités de conformité à la RT2005 (9 entrées)

Colonne de droite : Test de fonctionnement du réseau

Figure 5.9 : Applications de la version 1 de l'outil dynamique

Le nombre de points accumulés pour cette maison d'après la méthodologie [ProjetV5'2007] est de 9 points pour l'enveloppe. Cette valeur, dont l'estimation probabiliste se retrouve dans le nœud intermédiaire «Enveloppe» du réseau Bayésien (Cf. Figure 5.8), répond à une première condition de conformité. Les systèmes et la conception architecturale permettent quant à eux de cumuler 9 autres points, ce qui donne un total de 18 points pour un seuil de 22 points à atteindre pour être conforme en zone H1 (Cf. § 4-2.1). Le total de points est représenté dans le nœud intermédiaire «TotalThermiqueHiver» (Cf. Figure 5.8).

Après propagation des données introduites dans le réseau, celui-ci indique que la probabilité d'être conforme à la RT 2005 est de 83% avec une conformité de 100% pour l'enveloppe (Cf. colonne de gauche de la Figure 5.9).

La vérification du bon fonctionnement et de la fiabilité de cet outil s'est faite par l'introduction de défauts, telle que la non-conformité de l'enveloppe. Pour se faire, quelques informations ont été changées ou éliminées de telle sorte à maintenir le total des points à 18, en réduisant le nombre de points de l'enveloppe à 5. De ce fait, il est possible d'observer les changements que cela implique sur la colonne de droite de la Figure 5.9. En effet, l'estimation du nœud intermédiaire «TotalThermiqueHiver» est toujours à 83%, pour 66% de chance pour que l'enveloppe ne soit pas réglementaire. Même en ayant le total requis pour être réglementaire, l'enveloppe ne l'étant plus, l'outil indique bien que cette maison ne répond pas à la réglementation au vu de toutes les conditions nécessaires.

Pour être sûr à 100% d'atteindre la conformité en respectant les contraintes présentes dans ce cas (contraintes présentées par des rectangles rouges), il convient d'entrer la valeur 100% pour l'attribut «Réglementaire» du nœud «Réglementation» (Cf. Figure 5.10), et de constater les variations parmi les nœuds qui n'avaient pas encore été renseignés (suggestions présentées par des rectangles verts). Pour connaître les choix les plus appropriés, il suffit d'observer les attributs au pourcentage le plus élevé de ces nœuds. Dans cet exemple, les deux nœuds en question sont la «Ventilation» et les «Parois Opaques». Donc pour être sûr à 100% d'être RT2005, il faut choisir pour la ventilation parmi les systèmes à simple flux de classe E/D ou C (avec 30%) ; et pour les parois opaques parmi les configurations de 3 à 6 (avec 20%).

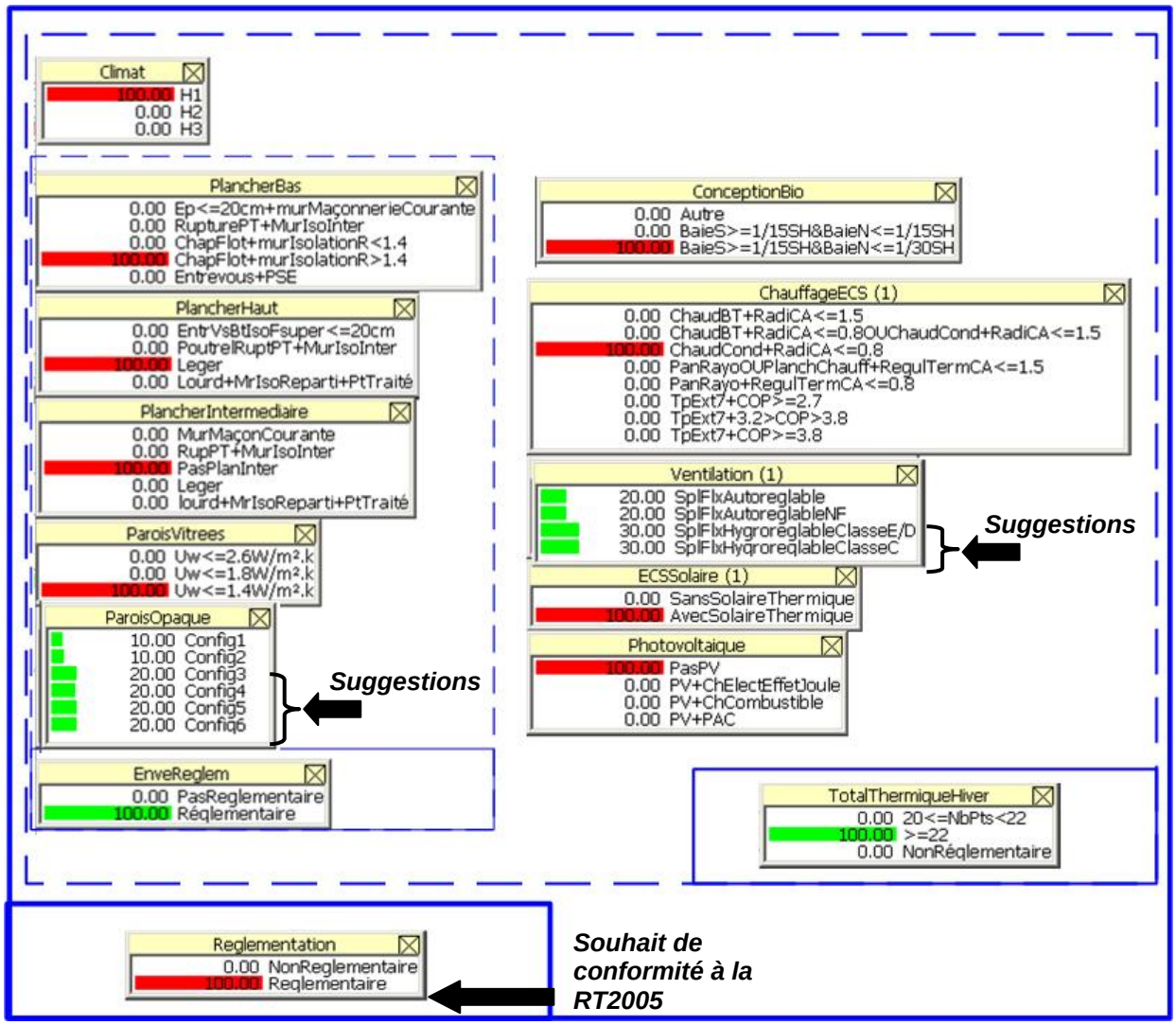
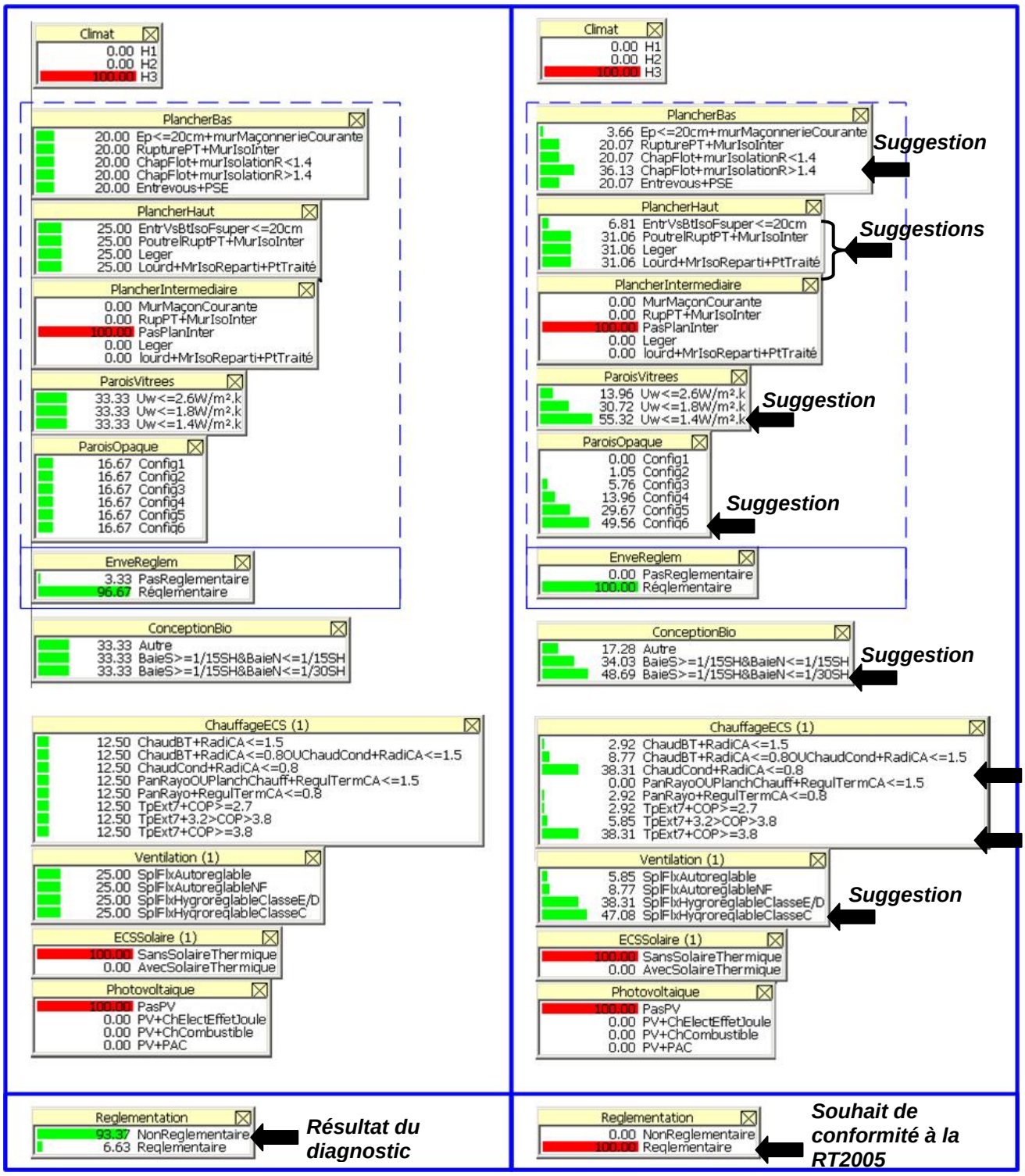


Figure 5.10 : Utilisation de version 1 dans le cadre de l'aide à la décision

2.1.2 COMPORTEMENT DE L'OUTIL EN PHASES AMONTS

Pour identifier le comportement de l'outil dans des phases très en amont d'un projet, tel qu'en programmation, où les connaissances de projets de maisons individuelles peuvent être très limitées, cet outil a été testé en utilisant le cas précédent mais en réduisant le nombre d'informations connues à : la connaissance de la zone climatique, le nombre de niveaux à prévoir, et un budget restreint qui ne permettrait pas l'utilisation de technologies énergétiques telles que l'ECS par panneaux solaire et la production d'énergie électrique par cellules photovoltaïques. Pour ces nœuds, les valeurs de l'exemple précédent ont donc été gardées.

L'introduction de ces informations dans l'outil (valeur des états misent à 100%) a donné un résultat de non-conformité à la RT2005, bien que ces mêmes informations introduites dans le cas précédent aboutissaient à un résultat de conformité (Cf. colonne gauche de la Figure 5.11). Ce résultat est dû au nombre réduit de données d'entrées, qui rend la concaténation des points offerts par chaque choix très inférieure au seuil exigé.

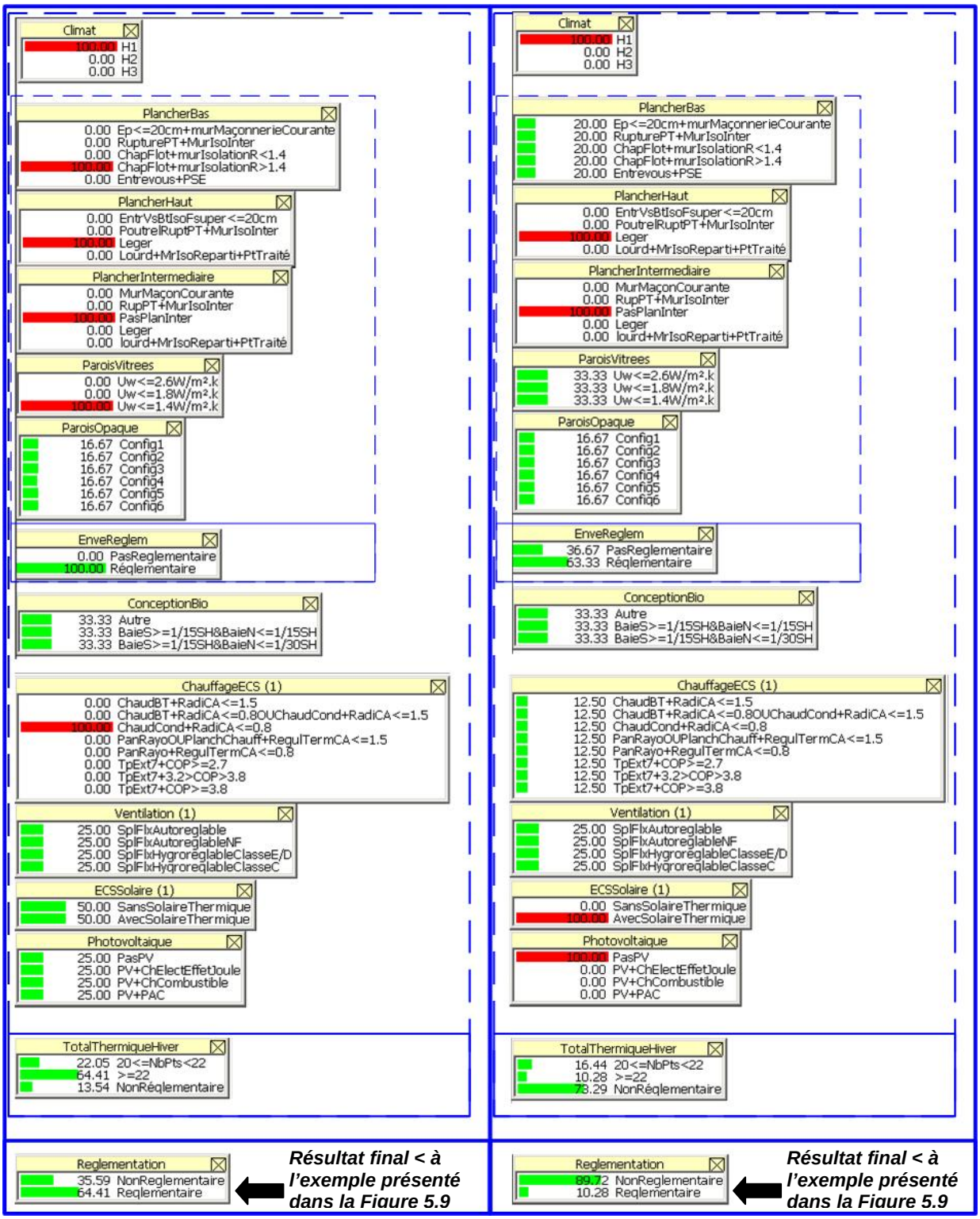


Colonne de gauche : Evaluation de la sensibilité du RB par rapport au nombre de nœuds.

Colonne de droite : Pertinence du RB dans l'aide à la décision en phase amont du processus de conception

Figure 5.11 : Présentation de l'utilisation de la version 1 de l'outil en phases amonts du processus

Etant donné les résultats présentés, cet outil n'est donc pas adapté au commissionnement des bâtiments dans des phases pour lesquelles les choix ne sont pas encore suffisamment précisés (Colonnes de gauche Figure 5.11 et Figure 5.12). Néanmoins, il reste utile à l'aide à la décision et cela dès les premières phases de conception (Cf. colonne droite de la Figure 5.11 et Figure 5.12).

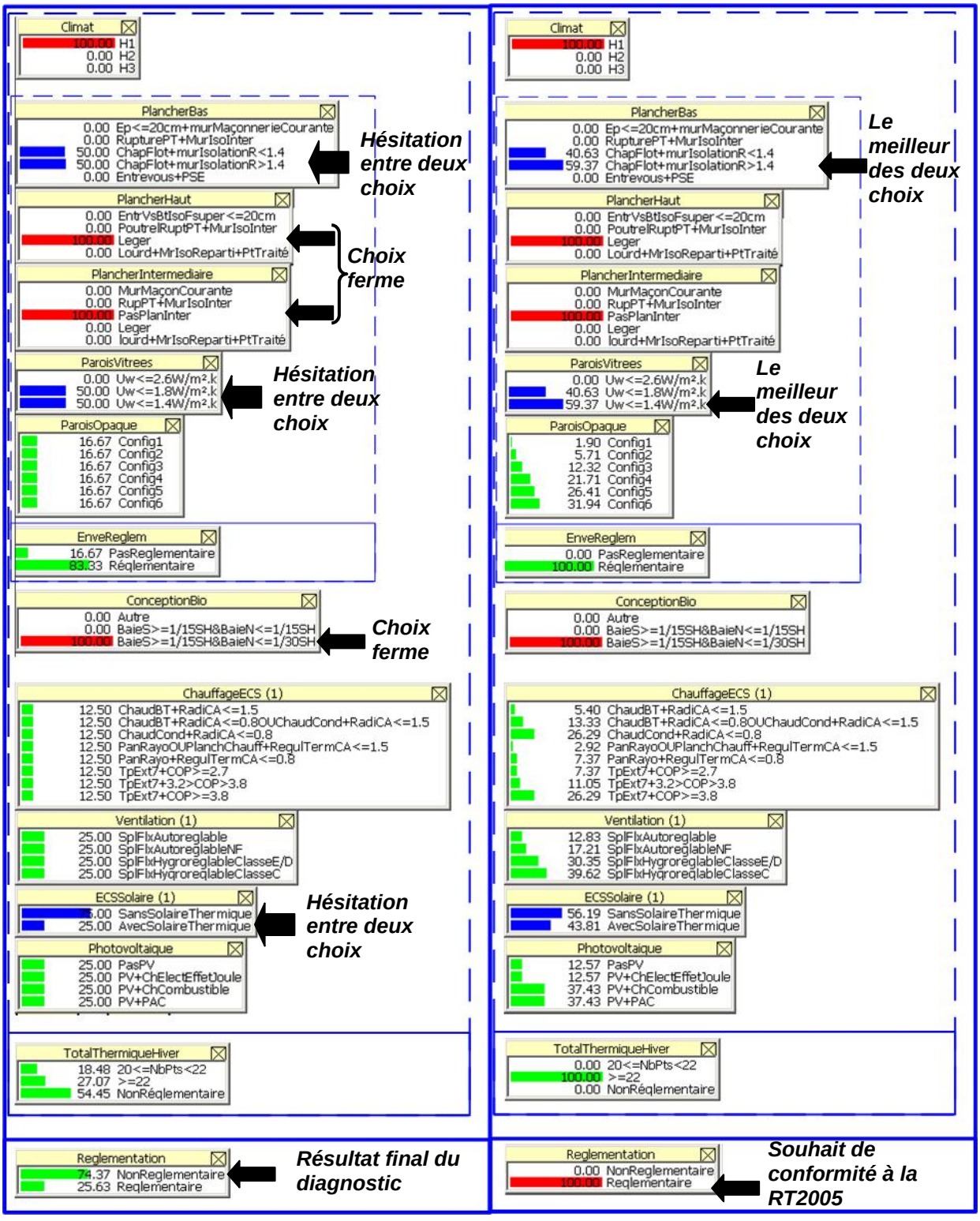


Colonne de gauche : Réalisation d'un diagnostic avec 6 entrées au lieux de 9

Colonne de droite : Réalisation d'un diagnostic avec 5 entrées au lieux de 9

Figure 5.12 : Etude de sensibilité du réseau Bayésien au nombre de noeuds

Cet outil offre également la possibilité d'intégrer des incertitudes qui peuvent survenir lors d'une prise de décision, ce qui permet au commissionnaire d'intégrer dans son évaluation des décisions non fixées telles que l'hésitation entre la pose d'un double vitrage avec couche de faible émissivité (Uw ≤ 1.8 W/m^2.K) ou d'un triple vitrage (Uw ≤ 1.4 W/m^2.K) (Cf. Figure 5.13).



Colonne de gauche : lors du commissionnement ***Colonne de droite : lors de l'aide à la décision***

Figure 5.13 : Possibilité d'intégrer des données incertaines dans la 1^{ére} version de l'outil

En effet, la colonne de gauche de la Figure 5.13 montre qu'au moment du commissionnement de cette maison, le maître d'œuvre n'avait pas encore pris de décision ferme au sujet du choix du plancher bas, du type de vitrage et du type d'eau chaude sanitaire (ECS). La valeur 50% (rectangle bleu) a été donnée quand le maître d'œuvre hésitait entre deux choix de manière identique (dans le cas du type de plancher bas et du type de vitrage), quant au cas où il pencherait plus vers un choix plutôt qu'un autre comme le cas de l'ECS, les pourcentages peuvent varier. Dans cet exemple, il est possible d'imaginer qu'étant donné un budget réduit, il y a peu de chances pour qu'il opte pour du solaire thermique, d'où les 25% pour le solaire thermique et 75% pour le cas contraire. La colonne de droite de la Figure 5.13 montre que dans le cas d'aide à la décision, cet outil agit sur les nœuds comportant des incertitudes contrairement à ceux pour lesquels les choix sont fixés à 100%.

2.1.3 SYNTHÈSE

Cet outil facilite et accélère le diagnostic (commissionnement) d'une maison par rapport à la méthodologie existante [ProjetV5'2007]. Il rend ce diagnostic automatique et interactif en le faisant évoluer instantanément. Il permet d'estimer les chances d'une maison de répondre à la réglementation même si les données sont incomplètes. Il permet également de capitaliser la connaissance acquise à travers la méthodologie pour faire de l'aide à la décision en temps réel. Il peut aussi prendre en compte des hésitations entre des solutions multiples pour un même problème (Cf. Figure 5.13).

Néanmoins, pour son bon fonctionnement, l'outil nécessite un minimum de données à compiler, moins le nombre de choix est connu, moins le résultat est fiable. C'est pourquoi il est difficilement exploitable pour le commissionnement des phases très en amont du processus de conception telle que la phase de programmation.

2.2 APPLICATIONS DE LA VERSION 2 : BASÉE SUR L'APPRENTISSAGE

La Figure 5.14 représente le réseau bayésien développé pour le commissionnement de bâtiments résidentiels et tertiaires par rapport à quatre niveaux de performance : RT2005, Performant, Très performant et Bepos (Cf. § 3-1.1.1).

Ce réseau se base sur l'apprentissage pour le renseignement de ses tables de probabilité. Son application vise à mettre en avant les particularités de ce type de solutions ainsi que les évolutions possibles.

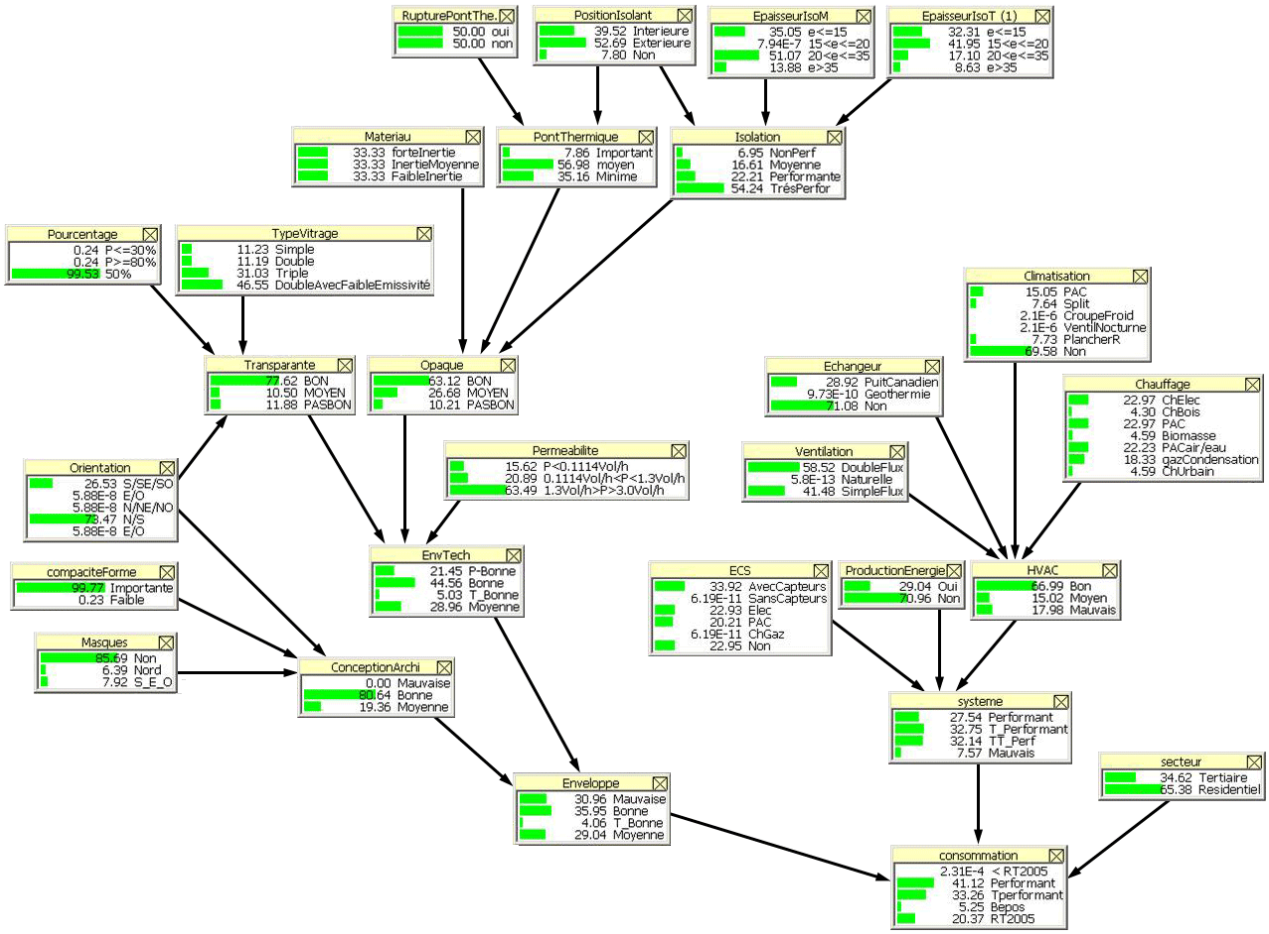


Figure 5.14: Représentation de la 2ème version de l'outil basée sur l'apprentissage

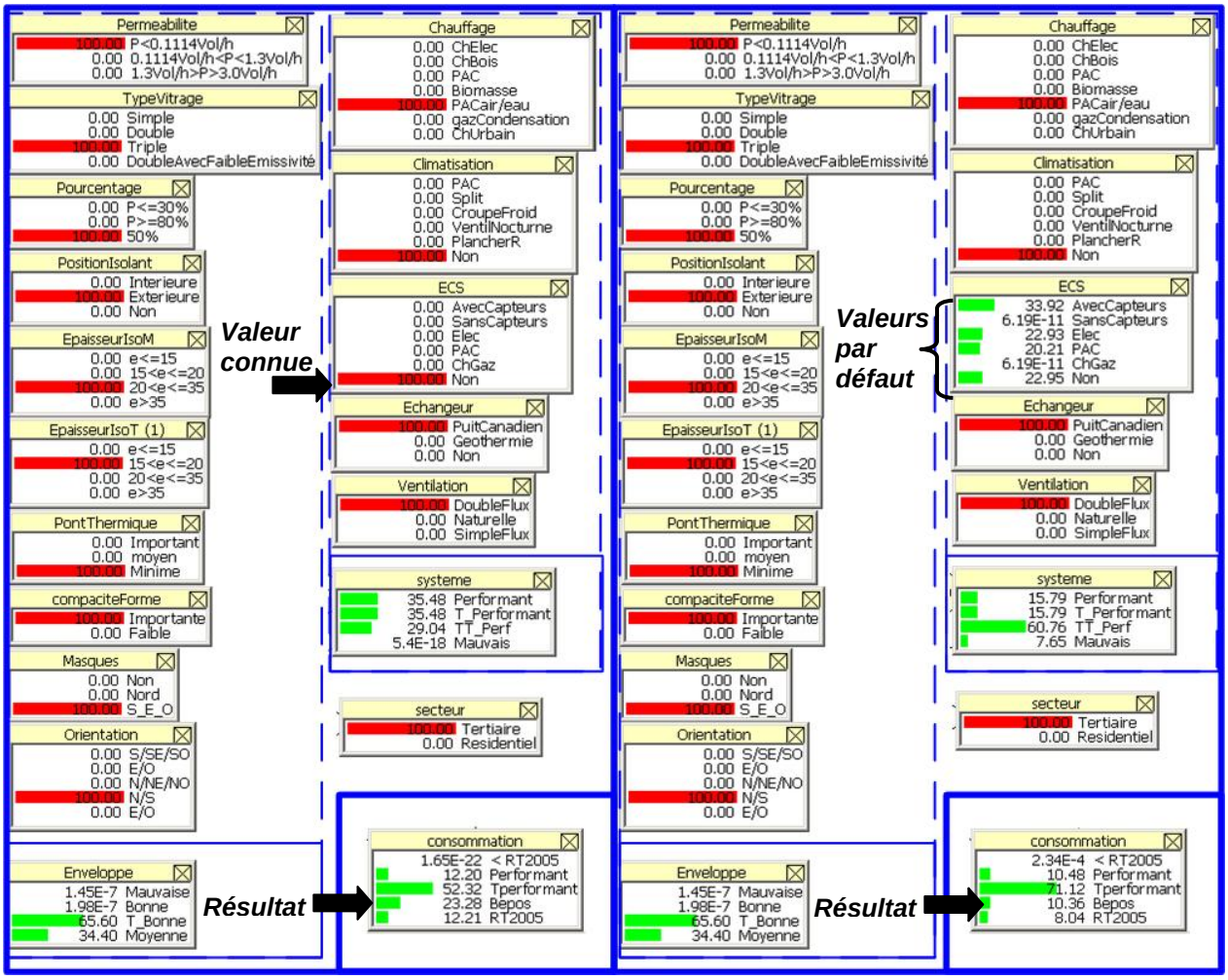
2.2.1 APPLICATIONS SUR UN BÂTIMENT TERTIAIRE TRÈS PERFORMANT (BEETHOVEN)

Le bâtiment Beethoven est un cas d'apprentissage fictif dont les résultats ont été estimés par simulation [Chlela'2008]. Cette application a pour objectif de tester la fiabilité du réseau Bayésien en évaluant un cas connu (qui a au préalable servi au renseignement des tables de probabilités). Cela permet de vérifier si le réseau, lors de l'évaluation de ce cas, restitue les mêmes résultats initialement obtenus ou pas.

Ce cas est un bâtiment à R+2 avec toiture isolée thermiquement. Il possède les caractéristiques suivantes :

- Consommation d'énergie : très performant
- Secteur : tertiaire
- Orientation : N/S
- Forme : compacité importante
- Masque : S-E-O
- Type vitrage : triple

- Pourcentage de vitrage : 50%
- Position Isolant : extérieur
- Climatisation : non
- Épaisseur de l'isolant des murs : 20<e<=35
- Épaisseur de l'isolant de la toiture : 15<e<=20
- Perméabilité : P<0.1114Vol/h
- Pont thermique : minime
- Production d'énergie renouvelable : Non
- Chauffage : PAC Air/Eau
- Ventilation : double flux
- Echangeur : Puits Canadien
- ECS : non



Colonne de gauche : Diagnostic réalisé avec l'ensemble des données connues de ce cas

Colonne de droite : Diagnostic réalisé avec l'ensemble des données connues de ce cas sauf la valeur de l'ECS

Figure 5.15 : Sensibilité par rapport au nombre de cas d'apprentissage

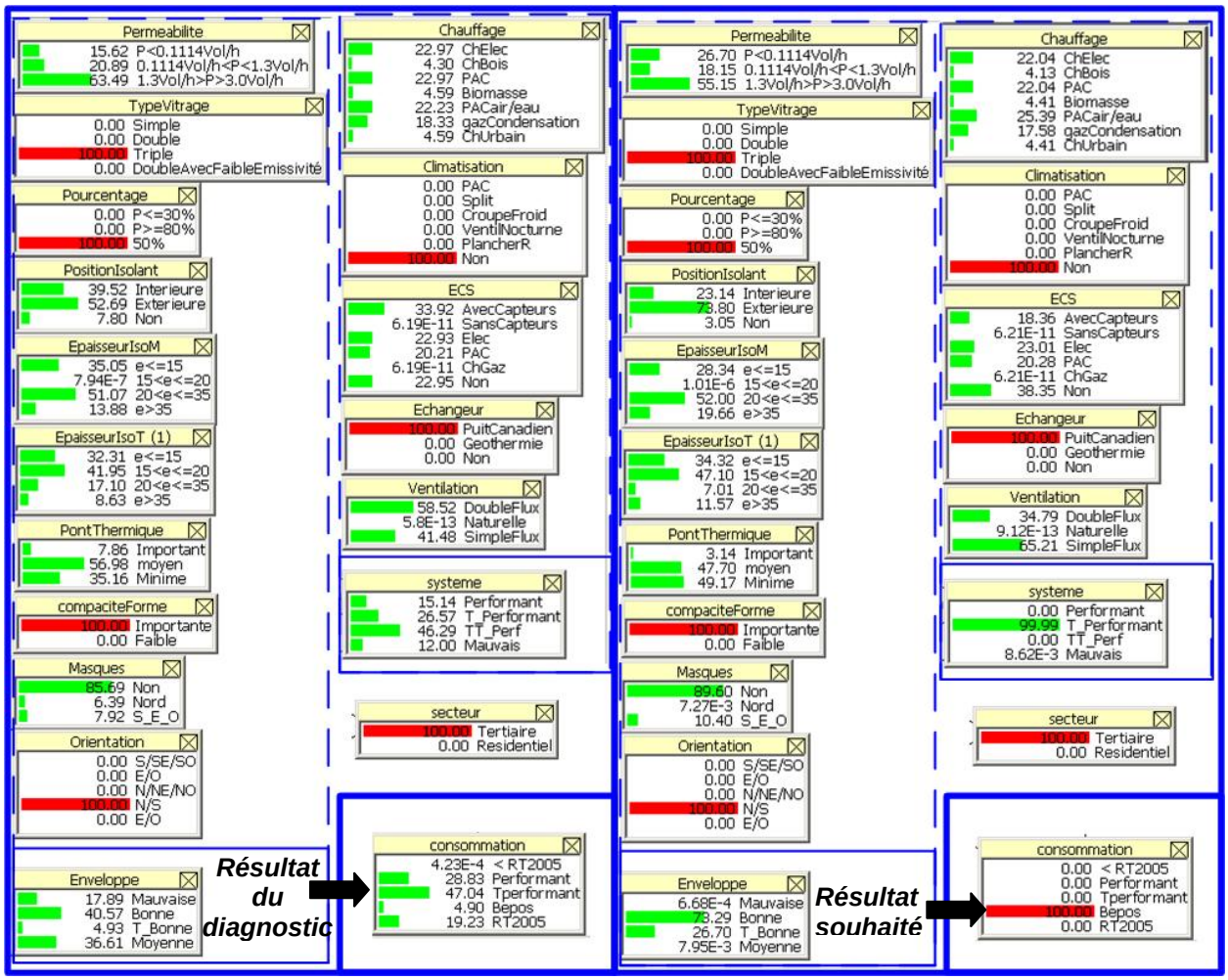
La Figure 5.15 présente les résultats de l'évaluation du cas Beethoven. La colonne de gauche montre le diagnostic basé sur l'ensemble des données connues de ce cas. Les résultats montrent une probabilité de 52% de chances d'atteinte des performances requises (Très performant) avec 65% de chances pour que l'enveloppe soit très performante et 35% de chances que les systèmes soient ou performants ou très performants.

Dans la colonne de droite la donnée ECS est considérée comme inconnue, ce qui a permis d'élever le pourcentage à 71 % la chance d'atteindre la performance (Très performant), avec 61% de chances pour que les systèmes soient «très très performants» (nœud : TTPerformant). Ces résultats peuvent paraître surprenants, mais ils sont justifiés par le fait que ce réseau se base dans l'évaluation de ce bâtiment, sur la connaissance acquise grâce à l'apprentissage. En effet, la base, de données utilisée ici possède plus de cas de bâtiments très performants avec Eau Chaude Sanitaires que sans. Cet exemple montre bien l'influence du nombre de cas d'apprentissage et leur variété sur la sensibilité du réseau.

Il est possible de noter également que la valeur «<RT2005» correspondant aux bâtiments non conforment à la RT2005 est inconnue. Cela vient du fait que la configuration intégrée ne correspond à aucun cas «<RT2005» présente dans la base de données d'apprentissage.

D'un autre coté, si le nombre de variables est réduit la sensibilité du réseau Bayésien s'en ressent également, mais de manière moindre que ce qui a été observé dans le cas de la première version de l'outil. En effet, la colonne gauche de la Figure 5.16, montre qu'en intégrant sept données d'entrées au lieu de quinze (Cf. colonne droite de la Figure 5.15), le résultat du diagnostic est passé de 71% à 47% en restant majoritaire, avec une enveloppe qui est passée de 66% «très bonne» à 5% et des systèmes qui sont passés de 61% à 46% «très très performant» (nœud : TTPerformant). Ce constat est aussi lié au nombre de cas d'apprentissage, car moins le nombre de données d'entrées est important plus le spectre des cas d'apprentissage concernés est large.

Tout comme la version précédente, cet outil offre la possibilité de faire de l'aide à la décision (Cf. colonne de droite de la Figure 5.16). En effet, pour que ce bâtiment soit Bepos étant donné les informations connues, il faudrait agir sur les nœuds non renseignés en optant pour les attributs dont le pourcentage est le plus élevé.



Colonne gauche : Sensibilité par rapport au nombre de variables introduites

Colonne de droite : Utilisation de la 2ème version de l'outil dans le cadre de l'aide à la décision

Figure 5.16 : Utilisation de la version 2 dans le cas de commissionnement et d'aide à la décision

2.2.2 SYNTHÈSE

Grâce à l'apprentissage, ce réseau donne des réponses plus fiables et plus réalistes lors des diagnostics de performance de bâtiments. Ces réponses se basent sur la fréquence d'utilisation de certains choix pour répondre à un objectif de performance énergétique. Il tient compte du bâtiment en tant que système global dont les combinaisons multiples de composants peuvent donner des résultats très variés. Ce réseau permet d'évaluer ces bâtiments par rapport à plusieurs niveaux de performances, ce qui est difficile à quantifier de manière précise par une méthodologie fixe étant donné le nombre important de combinaisons possibles.

Ce réseau est très sensible au nombre de cas d'apprentissage intégré. Il est donc nécessaire qu'au fur et à mesure que le commissionnaire rencontre des cas de bâtiments à faible consommation d'énergie, il enrichisse sa base de données en les intégrant de manière incrémentales. Cette procédure permettra de rendre l'outil plus précis et plus fiable.

La limite de ce réseau reste liée à sa taille, ce qui le rend inadapté pour des diagnostics multi critères et ou des évaluations très précises.

Vu le nombre réduit de cas disponibles il n'a pas été possible de créer une base de données homogène. En effet, la base de données utilisée pour l'apprentissage de ce réseau comporte à la fois des bâtiments résidentiels et tertiaires. Les solutions préconisées pour ces deux typologies de bâtiments étant différentes, il serait plus pertinent de créer des bases de données par typologies ce qui permettrait d'obtenir des outils plus précis et adaptés à chacune d'elles.

2.3 APPLICATIONS DE LA VERSION 3 : DIAGNOSTIC MULTICRITÉRES

Le Réseau Bayésien Orienté Objet développé pour le diagnostic des bâtiments par rapport à quatre critères d'évaluation : consommation d'énergétique, surcoût, confort d'été et confort d'hiver (Cf. § 4-2.3.1) est présenté dans la Figure 5.17.

La colonne de gauche de cette figure illustre la partie de l'outil dans laquelle les choix sont intégrés. Elle est organisée par classes (encadrées en violet), qui se décomposent en nœuds. Chaque nœud comporte plusieurs états. Après avoir intégré les choix faits dans la classe «Entrées», le réseau se charge de propager ces informations sur l'ensemble des classes pour finalement estimer leur impact sur les différents critères. Ce résultat est par la suite redirigé vers la classe «Résultats» pour en faciliter la lecture.

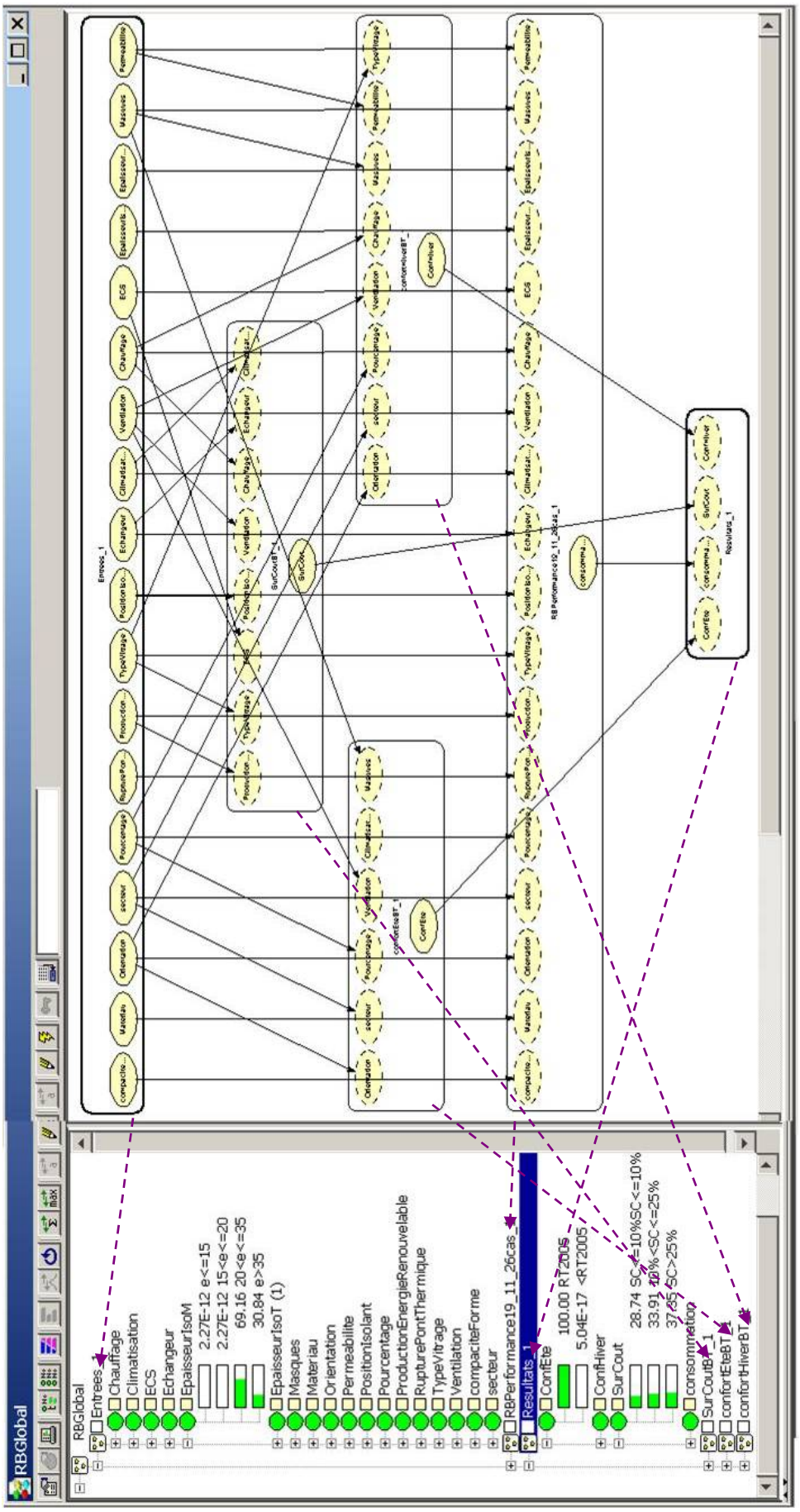


Figure 5.17 : Représentation du Réseau Bayésien Orienté Objet basé sur l'apprentissage

2.3.1 APPLICATIONS SUR UN DE BÂTIMENT RÉSIDENTIEL TRÉS PERFORMANT (PASSIVHAUS)

Le bâtiment dont cette application fait l'objet fait partie des cas d'apprentissage (utilisé pour le renseignement des tables de probabilités conditionnelles). C'est un bâtiment qui a été réalisé et dont les performances ont été vérifiées [Chlela'2006], ce qui lui a permis de bénéficier du label «Passivhaus». Cette application a pour objectif de montrer l'évaluation multicritères que peut apporter cet outil.

Ce bâtiment possède les caractéristiques suivantes :

- Secteur : Résidentiel
- Forme : compacité importante
- Consommation d'énergie Souhaitée : Très Performant
- Masque : Non
- Type vitrage : Triple vitrage
- Position Isolant : Extérieure
- Épaisseur de l'isolant des murs : 20<e<=35
- Production d'énergie renouvelable : Oui
- Chauffage : Biomasse
- Ventilation : Double Flux

La Figure 5.18 montre les entrées représentées par des rectangles rouges et dont le pourcentage est à 100%, et les sorties représentées par des rectangles verts. Comme cela est illustré dans la partie droite de cette figure (résultats encadrés en violet) ce bâtiment est conforme à la RT 2005 sur le plan du confort d'été et d'hiver. Sa réalisation va probablement engendrer un surcoût moyen qui varie de 10 à 25% par rapport à une construction «classique» et il a 54% de chance d'être très performant (avec une consommation inférieure ou égale à 15Kw/m².an) et 41% de chances d'être performant (avec une consommation inférieure ou égale à 50Kw/m².an) sur le plan de sa consommation énergétique. Ces résultats correspondent à l'état actuel du projet.

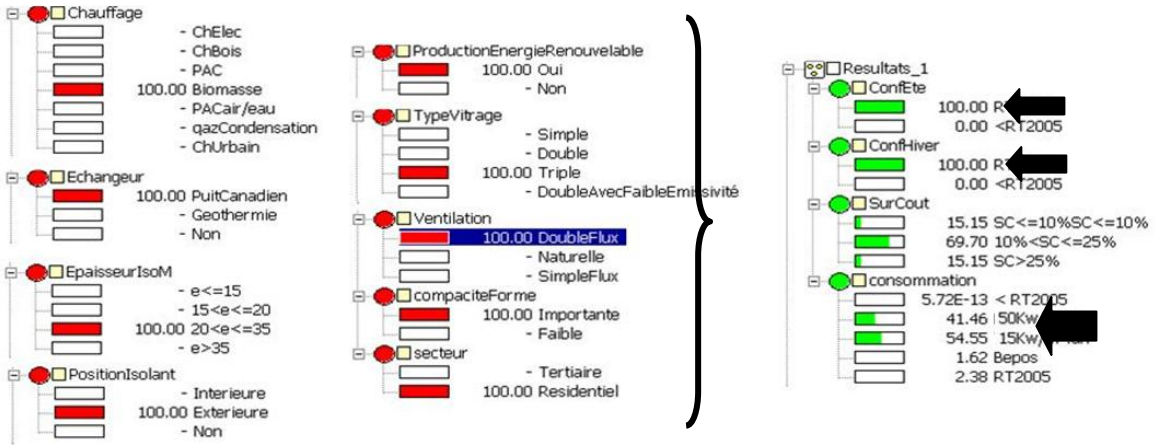


Figure 5.18 : Application de la 3eme version de l'outil

2.3.2 SYNTHÈSE

L'avantage de cette version de l'outil est l'évaluation multicritères du bâtiment. Elle permet au commissionnaire de voir l'impact des choix faits sur tous les éléments qui intéressent le maître d'ouvrage ainsi que de l'informer des risques d'incompatibilité entre les exigences, telles que l'exigence d'un bâtiment très performant avec un surcoût minimum.

La limite reste la taille des réseaux qui constituent les classes, ce qui rend difficile l'intégration de détails et son extension à d'autres phases du processus.

2.4 APPLICATION DE LA VERSION 4 : DIAGNOSTIC MULTICRITÉRES, FLEXIBLE

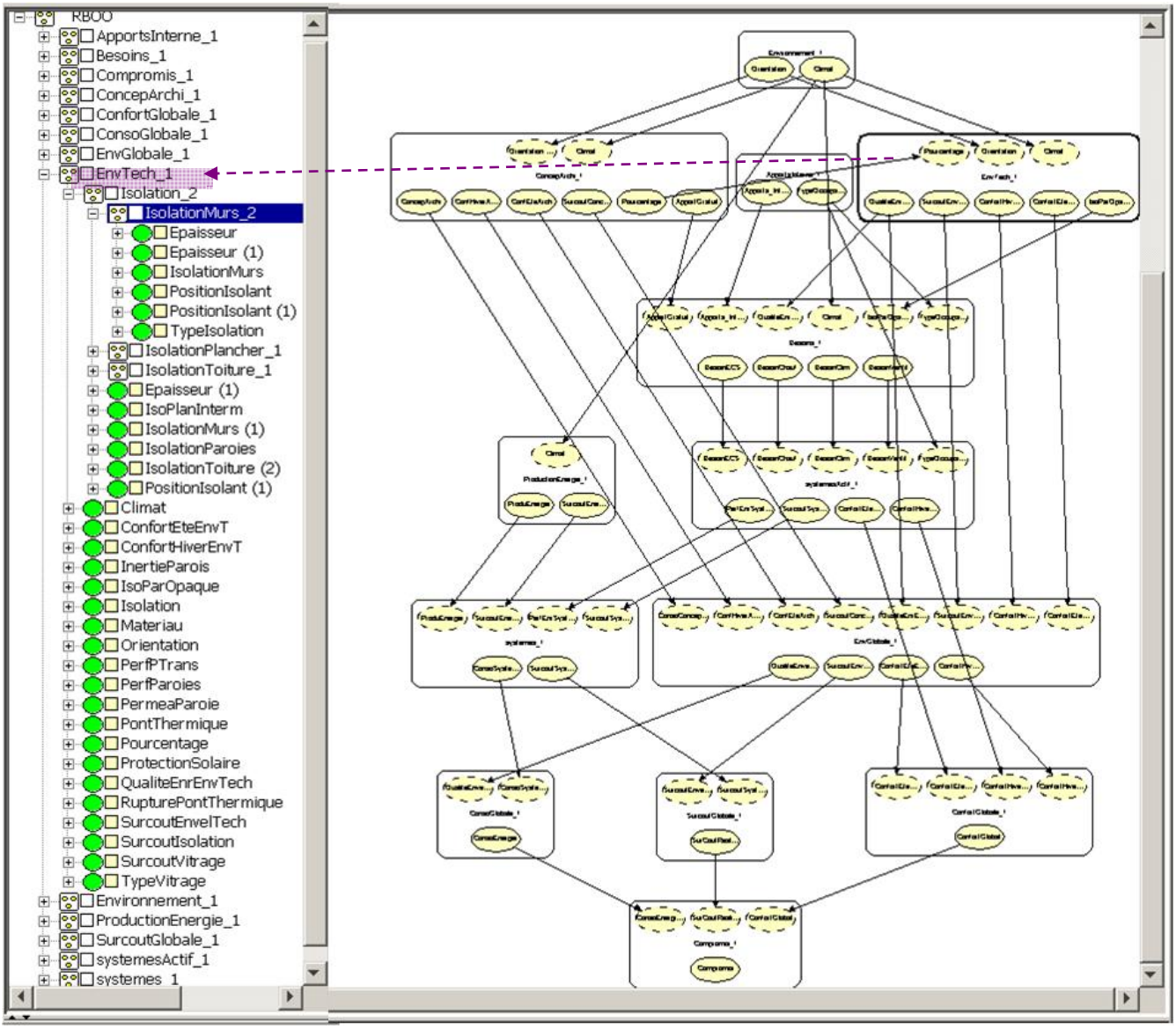


Figure 5.19 : Application du Réseau Bayésien Orienté Objet flexible

Le réseau présenté dans la Figure 5.19 illustre le réseau Bayésien orienté objet développé suivant une structure (classes et sous-classes) qui permet d'aller à un niveau de détails important. L'objectif de cette application est de montrer l'intérêt de cette version et ses limites.

2.4.1 APPLICATION DE LA VERSION 4 EN PHASE DE PROGRAMMATION

Dans cet exemple, l'objectif est d'identifier les possibilités d'atteindre les exigences du maître d'ouvrage à partir de données extraites d'un programme. Les exigences du maître d'ouvrage sont : un surcoût moyen, un bon confort d'été et d'hiver et une consommation énergétique performante, c'est-à-dire au plus 50 kWh/m².an.

Les données connues sur ce bâtiment sont les suivantes :

- Climat : en zone H1
- Secteur : Résidentiel
- Orientation : Nord
- Pourcentage de fenêtres dans la façade principale : >=80%
- Compacité de la forme : importante
- Position de l'isolant : intérieur
- Type de chauffage : électrique
- Présence de photovoltaïque : oui
- Type de ventilation : naturelle
- Type de vitrage : simple

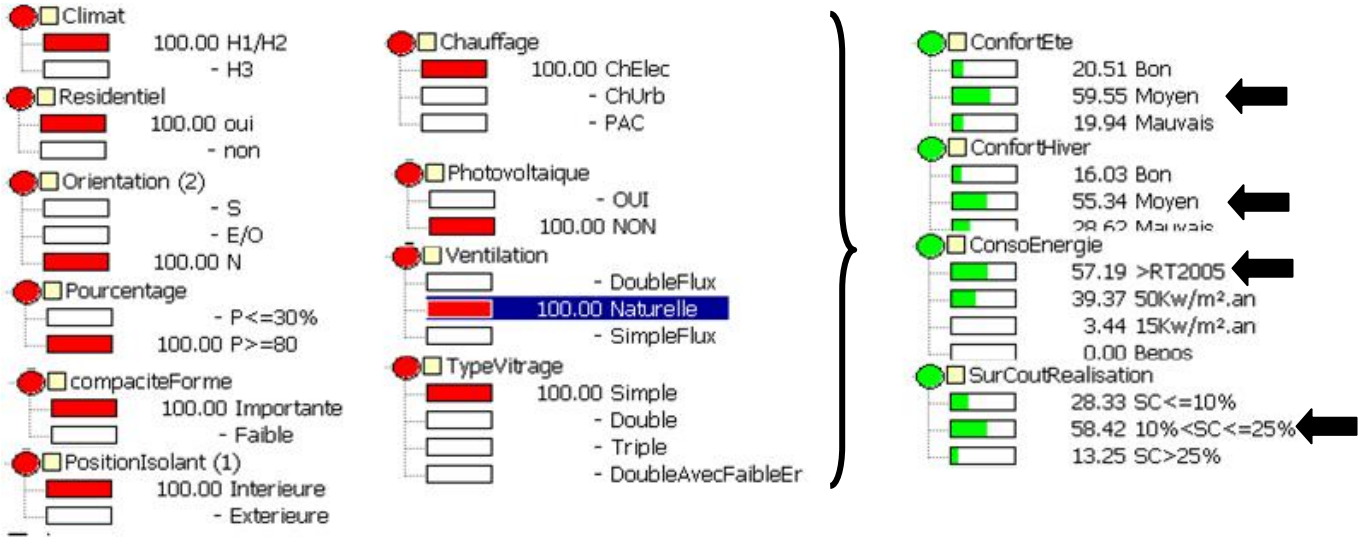


Figure 5.20 : Application de la 4eme version de l'outil

Le résultat de la propagation (Cf. Figure 5.20) montre qu'au vu des données présentes, ce bâtiment n'a que 39 % de chances d'être performant et 57 % d'être réglementaire, que le surcoût est moyen (58 % : 10%<SC<25%) tel que cela est souhaité, et que le confort d'été et d'hiver peuvent être moyens (60 % et 55%).

Ce résultat est donné à titre indicatif, car comme il a été spécifié dans le chapitre précédent, le renseignement des tables de probabilités conditionnelles a été fait à dire d'experts et ne tient pas compte de l'environnement dans lequel les composants sont intégrés (Cf. § 4-2.2).

2.4.2 SYNTHÈSE

Tout comme le précédent outil, celui-ci permet de réaliser un diagnostic multicritère. Il permet également d'intégrer des niveaux de détails importants en structurant l'outil en classes et sous classes, ce qui facilite son extension à différentes étapes du processus et l'intégration de niveaux de détails importants.

2.5 SYNTHÈSE ET CLASSIFICATION DES QUATRE VERSIONS DE L'OUTIL DYNAMIQUE

Le tableau 5 présente une classification des différentes versions de l'outil dynamique, leur domaine d'application, les phases et le type de bâtiments sur lesquels ils peuvent intervenir, le temps et la complexité de leur mise en œuvre etc.

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>V1 : RB[23] & expertise</th><th>V2 : RB & apprentissage</th><th>V3 : RBOO[24]</th><th>V4 : RBOO Flexible</th></tr>
<tr><td colspan="2">Domaines d'application</td><td colspan="4">Commissionnement et aide à la décision</td></tr>
<tr><td colspan="2">Phases</td><td>Phases avancées (une à la fois)</td><td colspan="2">Toutes les phases du processus (une à la fois)</td><td>Toutes les phases du processus</td></tr>
<tr><td colspan="2">Types de bâtiments</td><td>Bâtiments modulables, Industrialisables etc.</td><td colspan="3">Tous types de bâtiments</td></tr>
<tr><td colspan="2">Cibles du Cx</td><td>Un critère</td><td>Un critère avec différents niveaux</td><td colspan="2">Multicritères</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Durée de mise en œuvre du RB</td><td>Structure</td><td>Courte</td><td>Moyenne</td><td>Moyenne</td><td>Longue</td></tr>
<tr><td>Table de probabilités conditionnelles</td><td>Moyenne</td><td colspan="2">Bases de données conséquentes pour l'apprentissage</td><td>Remplissage à titre indicatif</td></tr>
</table>

Tableau 5 : Classification de l'outil

[23] RB : Réseau Bayésien

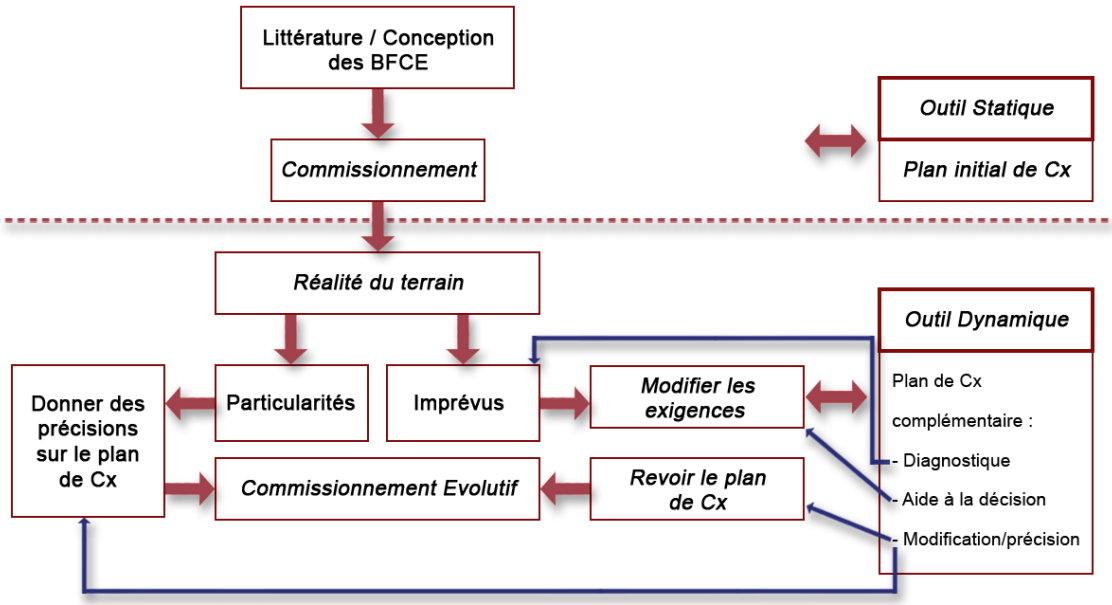
[24] RBOO : Réseau Bayésien Orienté Objet

Chacune de ces quatre versions trouve son application dans le commissionnement comme dans l'aide à la décision mais dans différentes phases du processus de conception. La structure des trois premiers (ceux basés sur les RB et expertise, RB et apprentissage et Réseau Bayésien Orienté Objet) leur permet d'intervenir sur une phase à la fois, et doit être adaptée à chaque changement de phase. La première «RB et expertise» a la particularité de nécessiter une connaissance suffisamment avancée du projet pour être utilisée contrairement aux autres. Le quatrième outil a un plus grand rayon d'action car sa structure permet de développer un Réseau Bayésien très important et ainsi d'intervenir sur toutes les phases de la conception, à des niveaux de détails très élevés en procédant à une évaluation multicritère.

La durée et la difficulté de mise en œuvre de ces réseaux varient suivant le niveau d'expertise du domaine à modéliser. Dans le cas du premier outil, la disponibilité d'une méthodologie exhaustive - les «solutions techniques» - a facilité la réalisation du réseau. Les autres réseaux ont nécessité une expertise plus poussée étant donné l'absence d'une structure prédéfinie. Le type de mise en place des bases de données de cas d'apprentissage est proportionnel aux nombres de cas et de nœuds (de choix et de critères d'évaluation).

3. COMPLÉMENTARITÉ DE L'OUTIL STATIQUE ET DYNAMIQUE

La mise à jour du plan de commissionnement initial (Cf. § 3-1) peut se faire de deux manières (Cf. Figure 5.21) : suite à des changements dans le programme dès que le projet est abordé et lors de son évolution suite à l'apparition d'imprévus.



BFCE : Bâtiment Faible Consommation d'Energie

Figure 5.21 : Schématisation de la complémentarité des deux outils d'assistance à la définition du plan de commissionnement

Lors de la mise en place du programme et des ambitions du maître d'ouvrage, l'outil statique va être utilisé afin de définir le plan de commissionnement initial et l'outil dynamique va permettre d'évaluer la faisabilité du projet étant donné les contraintes existantes de site et de réglementation par exemple. Si les probabilités de les atteindre sont faibles, le commissionnaire peut proposer au maître d'ouvrage de revoir ces exigences à la baisse par exemple, toujours en utilisant le même outil, qui permettra d'identifier les possibilités étant donné les contraintes présentes. Ces différentes opérations impliqueront une révision du plan de commissionnement initial.

D'un autre coté, l'outil dynamique peut être utilisé lors de l'apparition d'un imprévu en cours de conception ou de réalisation du bâtiment, tel qu'une restriction budgétaire, un changement dans la réglementation, un changement de terrain, l'apparition de contraintes non diagnostiquées, etc., dans ce cas il va permettre d'évaluer l'ampleur des dérives engendrées par ces nouvelles données. Et comme pour la phase programmation, cela peut impliquer un changement des objectifs, et donc un changement du plan de commissionnement initial.

Suivant les choix réalisés par la maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage, la mise en œuvre de certains domaines (ou systèmes) peuvent demander une plus grande attention à cause de leur technicité par exemple. L'outil dynamique, joue dans ce cas le rôle d'alerter le commissionnaire ou la maîtrise d'ouvrage sur ces parties du bâtiment à commissionner plus en détail. En effet, le commissionnement étant un service dont le coût d'investissement peut être élevé (bien qu'il reste rentable dans le long terme [Annexe47'2007]), cet outil va permettre d'orienter les commissionnaires vers les parties sensibles du projet et d'éviter des vérifications qui peuvent être moins pertinentes. Il est possible, ainsi, d'éliminer des parties du plan de commissionnement initial qui ne sont pas nécessaires. Ce qui représente une économie de temps et d'argent.

Pour intégrer cette dernière fonction à l'outil dynamique, le réseau Bayésien est relié à une base de données (Cf. Figure 5.22) comportant des tâches de commissionnements qui correspondent à des choix particuliers ou critiques, tels que :

- Choix d'une super isolation implique la :
    - Vérification de l'efficacité de la ventilation.
- Choix d'une isolation par l'extérieur implique la :
    - Vérification des retours de tableau des fenêtres.
- Choix d'une isolation par l'intérieur implique la :
    - Vérification de l'absence de ponts thermiques.
- Choix d'une surface de vitrage de 80% Sud implique la :
    - Vérification le confort d'été.
    - Vérification les coefficients de déperdition.
    - Vérification la présence d'éblouissement.

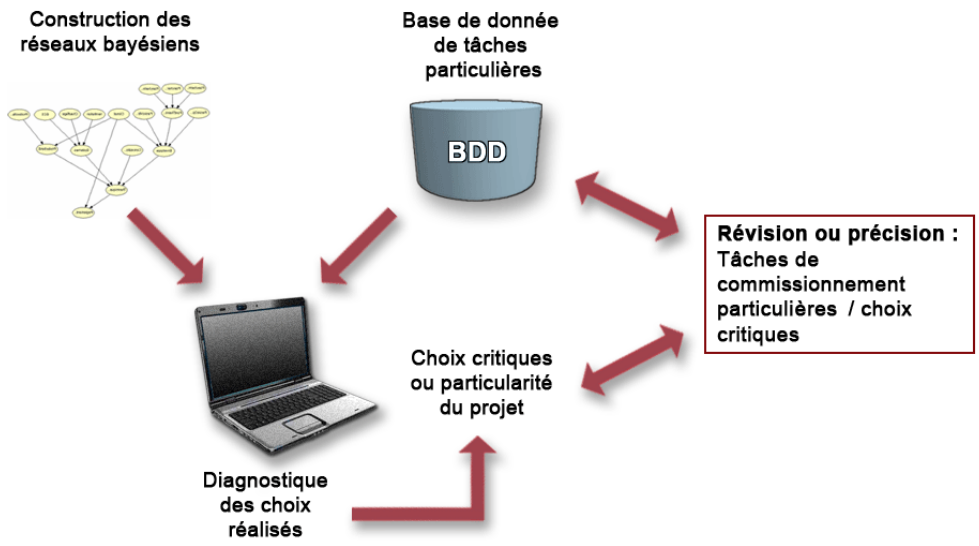


Figure 5.22 : Principe de mise à jour du plan de commissionnement initial

Une fois le diagnostic réalisé, cette fonction permet de comparer les choix faits, traduits dans le réseau Bayésien par la sélection d'un état d'un nœud (tel que l'attribut «isolation par l'intérieur» du nœud «Position de l'isolant»), avec une base de données ou sont classés tous les choix avec les vérifications qu'ils impliquent. Suite à cette comparaison, l'outil va émettre une alerte dans le cas où un ou plusieurs des choix faits nécessitent une vérification particulière (dans le cas de l'attribut «isolation par l'intérieur» l'alerte serait «Vérification de l'absence de ponts thermiques» par exemple).

Cette fonction intervient non seulement sur les nœuds finaux mais aussi sur les nœuds intermédiaires. Si suite à un ensemble de choix, le résultat de la propagation dans le réseau Bayésien est que le nœud «Isolation» est «très performante» ce qui implique une super isolation par l'extérieur par exemple, alors l'alerte «Vérification de l'efficacité de la ventilation» serait déclenchée (Cf. Figure 5.23).

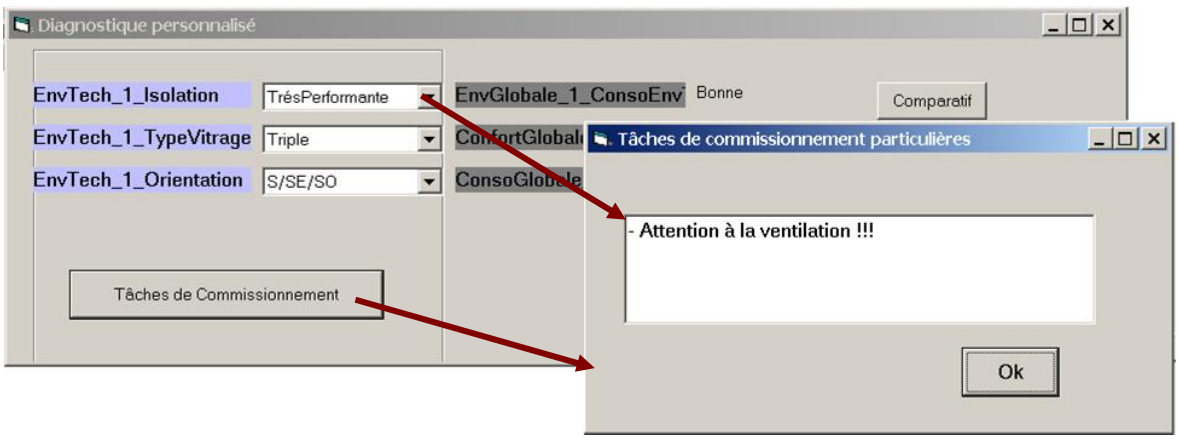


Figure 5.23 : Interface de l'outil dynamique avec une composante fonctionnelle de la liste des tâches particulières de commissionnement

L'interface illustrée dans la Figure 5.23 présente une alerte liée à un choix critique et qui va permettre au commissionnaire de mettre à jour son plan de commissionnement initial.

3.1 APPLICATION DE LA BOITE À OUTILS

La Figure 5.24 schématise l'utilisation de la boite à outils dans les phases programmation et esquisse.

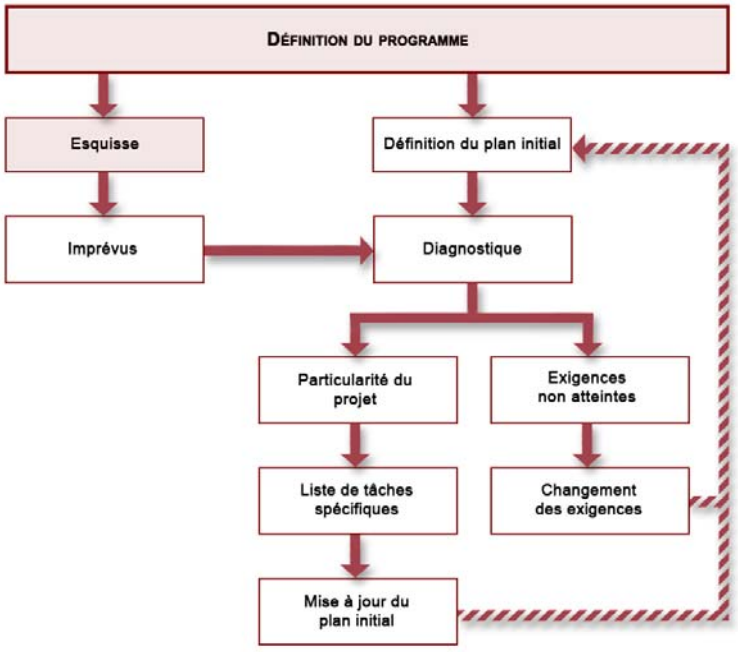


Figure 5.24 : Présentation de l'utilisation de la boite à outil dans les phases programmation et esquisse

Pour illustrer le changement d'exigences le cas appliqué au RBOO (Cf. § 5-2.3.1) est repris avec des exigences différentes : une consommation d'énergie «Bepos», un surcoût moyen, et un confort conforme à la RT2005.

Figure 5.25 : Diagnostic et faisabilité

La Figure 5.25 montre que les informations fournies dans le cadre de ce projet ont de fortes chances de respecter toutes les exigences sauf la consommation d'énergie qui oscille entre 15 et 50 kWh/m².an, avec plus de chance pour qu'il soit très performant (15 kWh/m².an).

Dans ce cas le commissionnaire peut proposer au maître d'ouvrage de changer ses exigences au niveau du surcoût qui devra être plus élevé, s'il veut garder la même performance énergétique (Cf. Figure 5.26). Sinon, il devra se contenter d'une performance en dessous de celle qu'il désirait au départ.

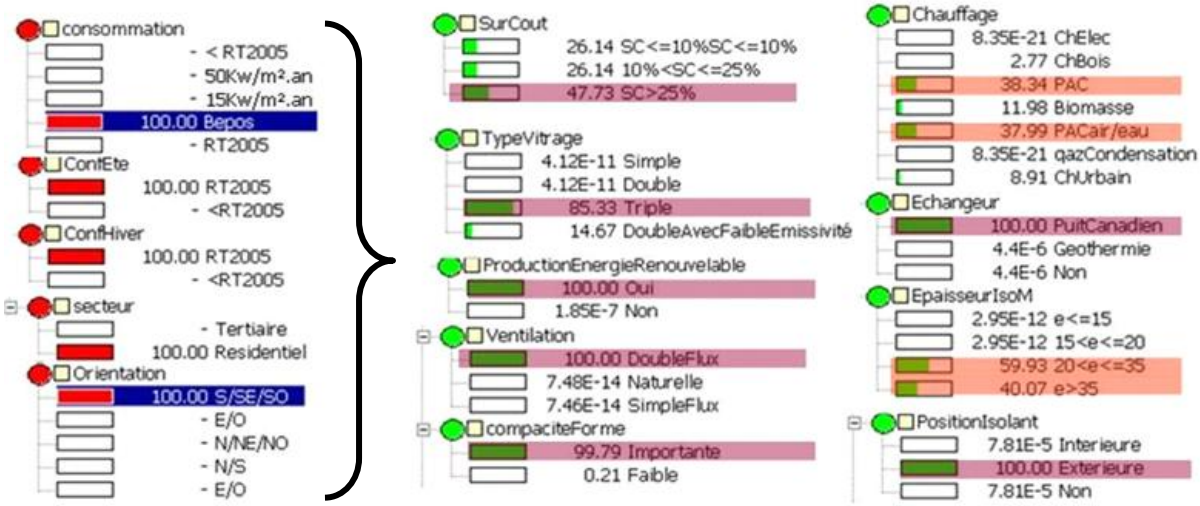


Figure 5.26 : Changement d'exigences

Un des points que le commissionnaire devra prendre en compte en priorité (dans le cas où le maître d'ouvrage décide de changer ses exigences) sera la ventilation, du fait que la dernière combinaison (Cf. Figure 5.26) propose une super-isolation par l'extérieur. Cette particularité en plus du changement d'exigences implique donc un changement dans le plan de commissionnement initial.

3.2 LES APPORTS DE CETTE BOITE À OUTILS DANS LE CAS D'UNE RÉHABILITATION

L'utilisation d'une boite à outils telle que celle-ci dans le cas du projet de réhabilitation de Fontenay sous Bois (Cf. § 2-1.2.1) aurait permis de mettre en avant certains manques et déceler les problèmes engendrés par les différents changements qu'a connu ce projet.

Les multiples problèmes rencontrés lors de la réalisation de ce projet sont dus en grande partie à l'absence de vérification en temps voulu de la conformité des décisions prises lors du chantier, aux différentes réglementations ; à la méconnaissance des techniques de mise en œuvre, des particularités et recommandations liées aux solutions innovantes utilisées, etc.

N'ayant pas les valeurs des consommations de ce bâtiment, au moment de cette thèse, il n'est pas possible de dire si la performance voulue est atteinte ou pas. Cependant, il faudra prêter attention aux résultats obtenus lors de l'exploitation de ce bâtiment.

Des études sur le terrain ont néanmoins démontré quelques problèmes liés au confort[25] d'été et d'hiver. En effet, les appartements n°2 et n°7 (respectivement en contact avec le sous-sol non chauffé et les combles) connaissent des sous chauffes pendant le mois de mars 2007 [Taurines'2007] (Cf. Figure 5.27). Les hypothèses suivantes ont été émises pour expliquer ce niveau anormalement élevé d'inconfort de l'appartement n°2 par exemple :

- défauts d'isolation (Cf. Figure 2.8 et Figure 2.9) et d'étanchéité à l'air au niveau du plancher bas qui est en contact direct avec une pièce non chauffée, et au niveau des murs et des fenêtres qui donnent sur l'extérieur,
- problèmes liés à l'usage de l'appartement.

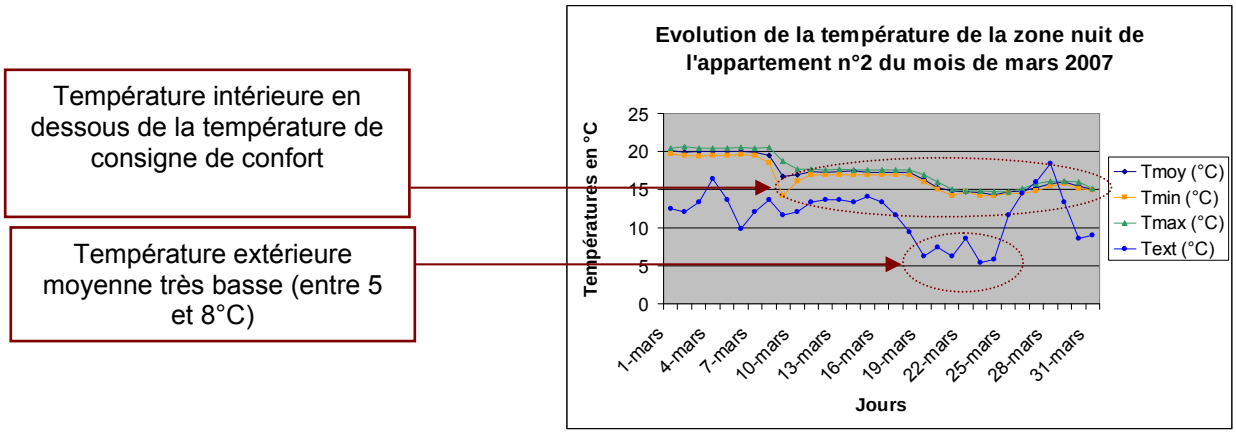


Figure 5.27 : Inconfort d'hiver [Taurines'2007]

D'après ces études, le bâtiment semble être confortable en été dans sa majorité, néanmoins, les appartements n°7 et n°8 (en contact avec les combles) connaissent des surchauffes pendant le mois de juillet 2007 [Taurines'2007] (Cf. Figure 5.28). Parmi les hypothèses qui ont été émises pour l'expliquer :

- défauts d'isolation (Cf. Figure 2.8 et Figure 2.9) et d'étanchéité à l'air au niveau du plancher haut qui est en contact direct avec les combles (phénomènes d'effets de serre),
- problèmes au niveau des matériaux à changement de phase,
- problème au niveau de la VMC double flux (problème d'efficacité de l'échangeur et fonctionnement de la récupération d'énergie, etc.).

[25] Température de confort variant entre 16° et 28°.

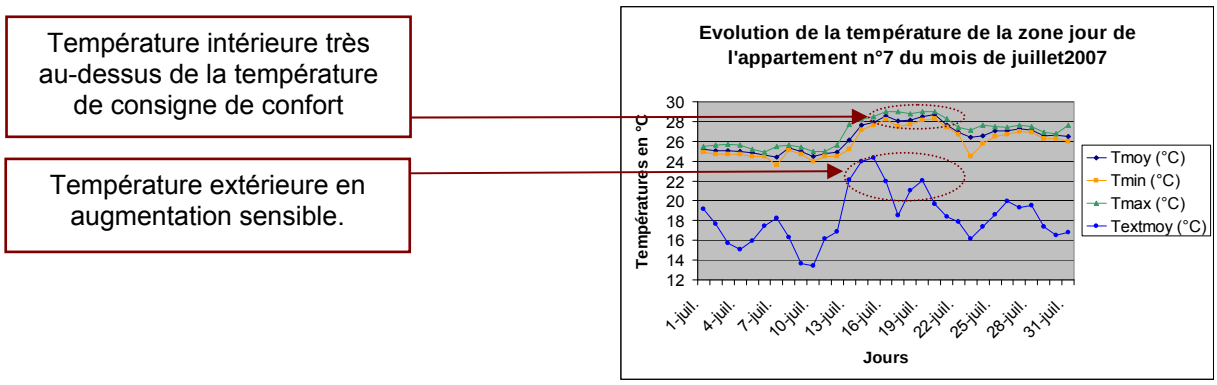


Figure 5.28 : Inconfort d'été [Taurines'2007]

Si une méthodologie telle que celle développée dans cette recherche avait été utilisée, il aurait été possible de déceler une grande partie des problèmes cités ci-dessus. L'évaluation en temps voulu aurait démontré leurs impacts sur la performance, et aurait favorisé la réalisation des exigences prévues.

4. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le mode de fonctionnement de la boite à outils d'assistance à la définition d'un plan de commissionnement adapté à un projet. Tout d'abord, une présentation de l'utilisation de l'outil statique sur un cas réel a été faite. Pour cela, le cas d'étude ainsi que la procédure de commissionnement ont été décrits.

Ensuite, plusieurs applications de chacune des quatre versions de l'outil dynamique ont été exposées, en donnant des indications sur les acteurs à qui elles s'adressent, leurs domaines d'application, les phases auxquels elles interviennent, leurs avantages ainsi que leurs limites.

Enfin, la complémentarité de ces deux outils a été mise en évidence, ainsi que leurs apports dans le cas de la réhabilitation de Fontenay Sous Bois.

Ce qui ressort de cette expérimentation est l'entrecroisement inévitable entre commissionnement et aide à la décision. Car, bien que l'objectif premier de cette thèse soit la vérification de la qualité effective d'un projet par rapport à des critères de choix, l'aide au choix vient se greffer naturellement, que ce soit pour proposer au maître d'ouvrage de changer ses exigences, si celles-ci ne sont pas réalisées par la configuration du projet, ou pour choisir les points sensibles nécessitant une attention particulière de la part du commissionnaire.

Suivant le besoin, il est possible d'adapter les différentes versions à des phases particulières du processus de conception, à un secteur particulier, à une échelle précise, à une typologie de bâtiment, ou à un type d'intervention.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La réalisation des objectifs d'économie d'énergie (bâtiment facteur 4 à l'horizon 2050) et de réduction des gaz à effet de serre passe par la réalisation de bâtiments à basse consommation d'énergie et le maintien de leur performance dans le temps. L'utilisation des avancées technologiques importantes dans la conception de ces bâtiments justifie de plus en plus le recours au commissionnement, gage de performances durables. Son coût d'investissement trouve une contrepartie en termes d'économie (coût global), de durée de vie, de qualité de la performance et de contribution au respect de l'environnement.

Le travail réalisé dans le cadre de cette recherche met en évidence deux points importants : 1) l'intérêt d'avoir un commissionnement structuré et évolutif qui s'adapte à la vie et aux particularités d'un projet de bâtiment pour atteindre les résultats souhaités, 2) l'intérêt d'utiliser un outil probabiliste basé sur les réseaux Bayésiens pour gérer l'évolutivité de ce processus de commissionnement.

La perte d'informations tout au long du cycle de vie du bâtiment et la non évaluation régulière des choix réalisés sont des difficultés majeures rencontrées dans la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie. Pour pallier cela, une proposition est faite dans cette recherche pour intégrer un processus de commissionnement très tôt dans la conception d'un bâtiment et jusqu'à sa déconstruction, afin de vérifier que le projet évolue selon les règles de l'art et respecte les exigences établies par le maître d'ouvrage.

L'intérêt d'un processus de commissionnement intégré au processus de conception a été validé par une enquête auprès des différents acteurs du processus de conception (architectes, bureaux d'étude, maître de l'ouvrage, assistant à maître de l'ouvrage …). Cet intérêt a été confirmé par l'étude et le suivi de cas réels de conception et de construction de bâtiments à faible consommation d'énergie. Etant donné que tout bâtiment est un cas particulier et que le processus de conception est un processus vivant et jalonné d'imprévus, un processus de commissionnement évolutif est nécessaire.

Afin de définir ce plan de commissionnement «évolutif», une boite à outils a été développée. Cette boite à outils est composée de deux outils, un outil dit «statique» qui permet de définir le plan de commissionnement initial et un outil dit «dynamique» destiné à adapter le plan de commissionnement initial aux particularités des bâtiments et aux imprévus rencontrés tout au long de son cycle de vie.

L'outil «statique» s'appuie sur une base de données de tâches de commissionnement structurées suivant les aspects caractérisant les bâtiments. Ces caractéristiques, qui servent à établir des plans de commissionnement génériques par phase du processus ou par domaine à commissionner sont : 1) la performance énergétique, 2) le niveau de commissionnement souhaité, 3) le domaine à commissionner, 4) le climat et 5) le parti architectural. Cet outil permet en fin de mission de rédiger un rapport de commissionnement, qui en tant qu'historique servira de base de discussions avec la maîtrise d'ouvrage. Seul, cet outil ne peut pas gérer toutes les particularités d'un projet et les imprévues qui jalonnent son processus. Pour pallier cela un deuxième outil «dynamique» a été développé.

Pour l'implémentation de l'outil «dynamique», le choix s'est porté sur des modèles probabilistes et plus particulièrement les réseaux bayésiens. En effet, ces réseaux rendent opérationnelle et quantitative une connaissance empirique décrite sous forme de graphiques causaux. Ils offrent la possibilité de faire des prédictions à partir d'informations incomplètes - caractéristique principale du processus de conception - et répondent ainsi aux limites de l'outil statique. Le commissionnaire peut ainsi réaliser en temps réel des diagnostics rapides de l'état du projet et émettre des alertes dans le cas où il y aurait des risques de dérives.

Son implémentation s'est faite en deux étapes : 1) une représentation qualitative du domaine à traiter, par le biais d'un graphique ; 2) une représentation quantitative par le renseignement des tables de probabilités conditionnelles qui permettent de quantifier l'impact des choix sur les critères d'évaluation. Cet outil se décline en quatre versions qui, suivant leur complexité, vont intervenir dans un domaine particulier, à un niveau de détail particulier, à une phase particulière ou s'étendre sur l'ensemble des phases du processus de conception.

La première version de l'outil dynamique se base dans le développement de son réseau sur une méthodologie valide pour des bâtiments «types», pour lesquels les choix sont limités et leurs conséquences sur les performances énergétiques quantifiées par des experts. Cet outil étant fortement sensible au nombre de données connues ne peut être utilisé que dans des phases avancées du processus de conception (à partir de l'Avant Projet Détaillé).

La seconde version de l'outil dynamique vise un champ plus large : 1) en évaluant un bâtiment par rapport à plusieurs niveaux de performances énergétiques ; 2) en prenant en charge des configurations[26] très variées dont l'impact sur la performance énergétique est difficilement quantifiable. Cet outil se base sur l'apprentissage à partir de cas réels ou simulés de bâtiments performants énergétiquement pour renseigner les tables de probabilités conditionnelles. Cette technique permet de quantifier les poids de manière automatique en fonction des cas intégrés.

[26] Configurations : Divers variantes de choix par rapport à la forme du bâtiment, à l'énergie , à l'enveloppe, et aux systèmes utilisés.

L'apprentissage pouvant se faire en plusieurs étapes, le commissionnaire a la possibilité d'affiner son outil en y intégrant régulièrement de nouveaux cas.

Une des limites des réseaux bayésiens est liée à leur taille. En effet, plus un réseau bayésien est grand, moins il est fiable. Il est donc difficile d'intégrer un trop grand nombre de variables ou de réaliser des diagnostics multicritères. D'où l'introduction des Réseaux Bayésiens Orientés Objets (RBOO). Cette solution consiste à décomposer les réseaux bayésiens en sous-réseaux dont chacun représente une classe. La structure des RBOO s'est faite de deux manières : 1) chacun des critères d'évaluation est diagnostiqué dans une classe, et est alimenté par une autre classe contenant les entrées (cas de la troisième version de l'outil) ; 2) chaque classe principale décrit à plusieurs niveaux de détails (avec des classes imbriquées) un des sous-systèmes du bâtiment (conception architecturale, enveloppe, systèmes, et production d'énergie.), c'est le cas de la dernière version de l'outil.

Bien qu'elle permet l'évaluation multicritères d'une conception, la structure de la troisième version de l'outil pose toujours le problème de la taille des sous-réseaux et ne permet pas de réaliser des évaluations trop détaillées.

Du fait de sa structure, la quatrième version de l'outil permet de faire des évaluations multicritères et de gérer les réseaux bayésiens de grande taille. Sa limite est liée au renseignement des tables de probabilités conditionnelles étant donné l'absence d'outils permettant d'intégrer l'apprentissage sur ce type de réseau.

Cet outil peut également être utilisé dans le cadre de l'aide à la décision. Cette possibilité est intéressante étant donné l'entrecroisement existant entre commissionnement et aide à la décision, qui vient se greffer à ce processus, que ce soit dans le cas de changement d'exigences[27], ou dans le cas de la définition de points sensibles nécessitant un commissionnement particulier.

La mise à jour du plan de commissionnement initial peut se faire dans deux cas : 1) en phase de programmation, ou entre deux phases, par un diagnostic de la compatibilité des choix réalisés, des contraintes existantes et celles du programme avec les exigences du maître d'ouvrage, qui devra les revoir en cas d'incompatibilité ; 2) en cours de conception, dans le cas d'imprévu, ou de changement d'acteurs, par une évaluation de l'impact des choix faits sur la performance énergétique. Si cet impact est négatif et qu'il ne peut être évité, cet outil va permettre d'identifier les points à améliorer et les parties du projet à commissionner de manière rigoureuse. Si cette amélioration n'est pas possible, il sera nécessaire de revoir les exigences à la baisse. Dans tous ces cas de figures la mise à jour du plan de commissionnement initial est nécessaire.

27 Suivant les modalités de leurs contrats, les responsables du commissionnement devront soit se contenter de vérifier si les performances sont atteintes ou pas, soit d'introduire le conseil, et suggérer le niveau d'exigences possible à atteindre étant donné les contraintes existantes.

Les prototypes présentés dans cette thèse ont été développés pour l'évaluation des constructions neuves. Ils peuvent, néanmoins, s'adapter au bâti existant et pour l'ensemble des secteurs du bâtiment. En effet, la flexibilité qu'offre cet outil le rend ajustable suivant les besoins. Il est ainsi possible de l'affiner grâce au retour d'expériences par l'intégration de nouvelles tâches de commissionnement dans l'outil statique et de nouveaux cas d'apprentissage (quand cela est possible), ou par l'apprentissage de la structure du réseau bayésien de l'outil dynamique.

Le potentiel de cette boite à outils a été abordé dans ses grandes lignes à travers cette thèse. Toutefois, elle devra connaître des évolutions et des transformations pour être plus opérationnelle. Etant donné le temps imparti à ce travail, cette boite à outils n'a pas pu être expérimentée dans sa globalité dans un cas réel. Bien que sa capacité à être transposée à des projets soit satisfaisante d'un point de vue théorique, sa robustesse reste encore à démontrer.

Il serait intéressant d'améliorer la dernière version de l'outil dynamique pour réaliser des évaluations dans des phases plus avancées telles que l'Avant Projet Détaillé (pour lequel les données physiques sont estimées voire arrêtées). Il sera possible de modéliser, dans ces phases, les simulations, longues et onéreuses, avec des réseaux bayésien. Ce qui permettra de réaliser des diagnostics en temps réel et d'estimer rapidement les résultats d'un changement. Il sera par exemple possible d'intégrer dans se cadre, la comparaison à un calcul de référence pour faire des vérifications par rapport à la réglementation.

Il est prévu d'adapter ce travail au processus de conception de parties plus techniques du bâtiment tel que la Gestion Technique du Bâtiment (GTB), et d'automatiser l'utilisation de cet outil en le reliant à une base de données standardisée du projet (type IFC).

A un autre niveau, cette approche multicritères pourrait intégrer d'autres composantes environnementales telles que la notion de cycle de vie, de mesure des émissions CO_2, ou de qualité de l'air. Dans un autre registre, elle pourrait être utilisée dans la recherche de solutions technico-économiques, ou s'adapter aux besoins de bureaux d'études.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AA'192] Revue : Architecture d'Aujourd'hui n°192 : «Quelle architecture», 1977.

[AA'209] Revue : Architecture d'Aujourd'hui n°209 : «Solaire passif ou actif», 1980.

[Adam'2005] Ch. Adam, P. André, C. Aparecida Silva, C.Cuevas, J. Hannay, P. Lacôte, J. Lebrun, «Guide pratique du commissionnement des installations de génie climatique», Liège, Belgique, mars 2005

[ADEME'2002] ADEME, «Qualité environnementale des bâtiments» Mai 2002.

[ADEME'2007a] http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/isolation_thermique/rub4.htm

[ADEME'2007b] *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*. Site Web :

http://www.ademe.fr.

[Adolphe'1991] L. Adolphe, «L'Aide à la décision technique dans la conception architecturale», Thèse de Doctorat en Énergétique, École des Mines de Paris (Paris-F), mai 1991.

[Akin'2003] O. Akin, M.T. Turkalsan-Bulbul; S. Brown, E. Kim; J.H. Garrett Jr; B. Akinci; H. Wang; "Comparison of ASHRAE guidelines with Building Commissioning Practice". National Conference on Building Commissioning, Mai 8-10, 2003.

[Akin'2004] O. Akin, M.T. Turkalsan-Bulbul, I. Gursel, J.H. Garrett Jr, B. Akinci, H. Wang; "Embedded Commissioning for Building Design". Conference ICEBO. Paris. Octobre 2004.

[Annexe'40'2004] Rapport final de l'Annex 40 de l'Alience Internationale de l'Energie (AIE), "Commissioning tools for improved energy performance. 2004.

[Annexe40'2007a] Annex 40, http://www.commissioning-hvac.org, consulté en 2007

[Annexe40'2007b] Annex 40, http://www.commissioning-hvac.org/newannex.aspx, consulté en 2007.

[Annexe47'2007] Annex47, http://cetc-varennes.nrcan.gc.ca/fr/b_b/bi_ib/annex47/index.html , consulté en 2007.

[Archi'2007] http://www.archi.fr/URCAUE-IDF/, consulter en 2006/2007

[ARIAM'2007] http://194.199.196.73/recher/ariam-larea/index.php, consulter en 2006/2007

[Armand'2000] J. Armand, Y. Raffestin, H. Debaveye, P. Haxaire, «150 Séquences pour mener une opération de construction». Collection méthodes, 3eme édition Le Moniteur, Novembre 2000.

[Arrêté'2006] Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement. «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», septembre 2006.

[Arrêté'2007] Journal Officiel de la République Française : Arrêté du 8 mai 2007 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label «haute performance énergétique». Texte 35 sur 311. NOR : SOCU0750649A.

[ASHRAE'96] ASHRAE, (Américan Society of heating, Refrigerating, & Air-Conditioning Engineers), "The HVAC Commissioning Process", Inc, GA, 1996.

[Baker'2000] N. Baker, K. Streemers , «Energy and Environment in Architecture, A Technical Design Guide». Edition par E & FN Spon. Première publication 2000.

[BASF'2007] http://www.basf.fr/, consulter en 2006/2007

[Baumann'2005] O. Baumann. "Cost-Effective Commissioning for Advanced and Low Energy Buildings" Subtask A – General and Automated Utilization of Design Data and Information in Commissioning. New Annex Planning Workshop, Munich, March 16/17, 2005.

[BREEM'2006] Réferentiel BREEAM Schools, éditeur : BRE (Building Research Establishment) LTD, department for education and skills, Mars 2006.

[BREEM'2007] http://www.breeam.org/, consulter en 2006/2007

[Castro'2003] N.S. Castro, M.A. Galler, Bushby, S.T. "Using the virtual cybernetic building tested and FDD test shell for FDD tool development." Proceedings de la Conference National "Building Commissioning", California, May 20-22 2003.

[CASBEE'2007] http://www.ibec.or.jp/CASBEE/, consulté en Juin 2007

[Cegibât'2007] http://www.cegibat.fr/cegibat/, consulté en Juin 2007.

[Certivéa'2006] Certivéa, Groupe CSTB «Référentiel technique de certification», Bâtiments tertiaires-Démarche HQE, Août 2006.

[CHPS'2006] "Best Practices Manual, Volum V", "Commissioning, High Performance Schools, Best Practices Manual", Edition 2006, www.chps.net.

[CEN -98] CEN (Comité Européen de Normalisation), prEN 832 Performance énergétique des bâtiments - Calcul des besoins d'énergie de chauffage - Bâtiments résidentiels, 52 p., 1998.

[Chlela'2006] F. Chlela, E. Fleury, C. François, D. Quenard, M. Weckstein, «Bâtiments à faible consommation»: << Facteur 4 >>, Tome 1 : «Approche exemplaire des projets et des acteurs», réalisé au Département Développement Durable, CSTB. 2006.

[Chlela'2008] F. Chlela, thèse de doctorat «Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie». L'Université de La Rochelle, UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur. Février 2008

[Cowell'1992] R. G. Cowell, A. P. Dawid. "Fast retraction of evidence in a probabilistic expert system. Statistics and Computing". 1992.

[Courgey'2006] S. Courgey, J-P. Oliva, «la conception bioclimatique des maisons confortables et économes», Edition terre vivante, 1ere édition 2006

[COSTIC2002] COSTIC Document (mise au point, commissionnement) – réunion 24 Mai 2002

[CRAW-98] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, C.O. Pedersen, R.J. Liesen, D.E. Fischer, R.K. Strand, R.D. Taylor, F.C. Winkelman, W.F. Buhl, A.E. Erden, Y.J. Huang, "Developing a New-Generation Building Simulation Tool in the United States". Thermal Performance of The Exterior Envelopes of Buildings VII Conference, Clearwater Beach, USA. Décembre 1998.

[Cx'1999] Portland Energy Conservation, INC, and Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, «A Practical Guide for Commissioning Existing building» Avril 1999.

[Farnsworth'2003] Farnsworth Group, "Adopting the Commissioning Process for the Successful Procurement of Schools " 2003. www.documents.dgs.ca.gov/dsa/pubs/CommissioningProcessGuide.pdf consulté en 2006.

[Fraefel'2007] R. Fraefel, «La maison d'habitation MINERGIE® : Aide à la planification destinée au professionnels u bâtiment» http://www.minergie.ch/fr/. Consulter en 2005/2007

[Diab'2000] Youssef DIAB «Génie Urbain et Environnement : quelques pistes de recherche». Habilitation à Diriger des Recherches soutenue le 14 decembre 2000, Université de Savoie. 234 pp.

[Décret'2006] Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement. «Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions».

[Duffaure'2007] I. Duffaure-Gallais, «Passivhaus, Deux maisons françaises conformes au label allemand». Le Moniteur du 20 Avril 2007.

[Eastman'1999] C. Eastman, "Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction", CRC Press, Boca Raton FL, 1999.

[Effinergie'2007] http://www.effinergie.org/fr/, consulté en 2007.

[Energy'2007] Building commissioning guidelines, A Source Book on Building Systems Performance, www.energydesignresources.com, consulté en 2007.

[EnSan'2007] http://www.ensan.de/ Consulter en 2007, consulté en 2007.

[EPBD'2002] http://www.buildingsplatform.org/, EPBD Buildings Platform, consulté en 2007.

[Gartia'2002] E. Gartia, A.De Herde «Design of low energy office buildings», architecture et climat, Université Catolique de Louvain, 20 août 2002.

[Garde'2006] F. Garde, A. Bastide, D. Bentaleb, A. Fakra, E. Pothin, N. Ferjani, «Rèalisation d'un bâtiment à energie positive à l'Ile de La Reunion. Présentation d'une nouvelle approche de la conception en phase étude», Esim 2006 Conference, Toronto, Canada. Mai 2006

[Garde'2005] F. Garde, M. David, L. Adelard, E. Ottenwelter, "Elaboration of thermal standards for French tropical Islands: presentation of yhe PERENE project.", conference Clima 2005, Naples, Italia.

[GBC'2007] GBC 2005, «An overview of the GBC Method and GBCTool», Mai 2005, http://www.usgbc.org/.

[GBC'2007] http://www.usgbc.org/, consulté en 2007.

[GreenBuilding'2007] http://greenbuilding.ca/, consulté en 2007.

[Grenelle'2007] http://www.legrenelleenvironnement.fr/ Le grenelle de l'environnement, Site Web, consulté en 2007.

[GroupeReflet'2006] http://www.commissionnement.org/, consulté en 2006

[Hanser'2003] D. Hanser. «Proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, application au domaine du bâtiment», thèse de doctorat, Institut Nationale Polythechnique de Lorraine, soutenu en Octobre 2003

[Hauglustaine'2001-a] J-M. Hauglustaine. «Méthode de conception optimisée de l'enveloppe de bâtiment, aux stades préliminaires du projet architecturale». Thèses de Doctorat. Laboratoir LEMA, Université de Liége, Faculté des Sciences Appliquées, juillet 2001.

[Hauglustaine'2001-b] J-M. Hauglustaine; S. Azar "INTERACTIVE TOOL AIDING TO OPTIMISE THE BUILDING ENVELOPE DURING THE SKETCH DESIGN" LEMA – University of Liege. Seventh international IBPSA Conference. Rio de Janeiro Brazil. August 2001.

[Hauglustaine'2000-c] J-M. Hauglustaine; S. Azar. "Multicriteria and multiple actors aspects of an interactive tool aiding to sketch the building envelope during the first stages of the architectural design". 52 meeting of the European working group. Vilnius, 2000.

[HelpHugin'2007] A Tutorial on Learning With Bayesian Networks, David Heckerman.

[Hendrickx'2003] P. Hendrickx et J. Perret «Gestion technique de l'immobilier d'entreprise, Guide pratique», édition EYROLLES février 2003.

[HQE'2007] http://www.assohqe.org/, consulté en 2007

[Husaunndee'2006] A. Husaunndee, «COMPARAISON INTERNATIONALE BATIMENT ET ENERGIE». Rapport intermédiaire, chapitre 2-« Programmes d'opération performantes », partie 2.1 « Recensement », édité dans le cadre du Prébat (Programme de Recherche et d'Expérimentation dans le cadre de l'Energie dans le Bâtiment), décembre 2006.

[Hugin'2007] http://www.hugingroup.com/ consulter en 2007.

[IDEF2005] http://www.idef.com, consulté en Mai 2005

[IEA '1989] International Energy Agency : solar heating and cooling program, « Passive and Hybrid Solar Lowe energy buildings. Design context ». Design information booklet N° 2, Juillet 1989.

[IFC2005] http://www.ifc.cfwb.be/, consulté en Mai 2005

[Ingrand'1986] F. Ingrand & J. Virbel, «Conception avec contraintes culturelles» in les journées de l'Itelligence Atificielle, Editions Cepadues, 1986.

[Jandon'2005] M. Jandon. «Mise en main des installations de GTB» Prise en compte du Cx dans les pays participants aux travaux de l'annexe 40. 2005.

[Jandon'2006] M. Jandon, B. Berthineau, N. Hannachi, M. Taurines, «Description du Concept «Génération E».Demeure des carrières à Fontenay sous Bois, Rapport intermédiaire n°1», CSTB 2006.

[Krarti'2003] Moncef Krarti, "An Overview of Artificial Intelligence-Based Methods for Building Energy Systems", Journal of Solar Energy Engineering – August 2003 - Volume 125, Issue 3, pp. 331-342 , Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 90309-0428

[Kreider'96] Jan F. Kreider, Peter S. Curtiss "Small Scale, On-Line Diagnostics for an HVAC System", Client: ASHRAE Date: April 1995 - July 1996

[Korb'2004] K.B. Korb, A.E. "Nicholson, Bayesian Artificial Intelligence". Edition Chapman & Hall/CRC, 2004.

[Langseth'2004] H. Langseth, O. Bangsø. "Parameter Learning in Object-Oriented Bayesian Networks". Revue : Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. Edition Springer Netherlands, Volume 32, pages 221-243. Août 2001.

[Lauritzen'1995] S.L. Lauritzen. "The EM algorithm for graphical association models with missing data". Computational Statistics & Data Analysis, 1995.

[Lebahar'1989] J-C. Lebahar, «l'analyse cognitive du travil de conception en architecture», les cahiers de la recherche architecturale N° 23, Informatique et Architecture, ED. Parenthèses, 1989.

[Ledizes'1986] J-M. Ledizes, D. Jaeger, «Contribution aux méthodes de conception comment concilier créativité et automatisation», l'Economique et l'Intelligence artificielle, 1ere Conférence internationale, Aix en Provence, Septembre 1986.

[LEED-NC'2005] LEED for New Construction Version2.2, Octobre 2005, http://www.leedbuilding.org/

[LEED'2007] http://www.leedbuilding.org/, consulté en 2007

[Legifrance'2007] http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnCode?code=CCONSTRL.rcv, consulté en 2007

[LeMoniteur'2005] http://www.lemoniteur-expert.com/zoom/MON5322.pdf, consulté en Mai 2006

[Liérbard'2005] A. Liérbard, A. De Herde, «Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques», «Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable», Edition Le moniteur. 2005.

[MaletteRT2005] CSTB. «Manuel outil pédagogique THCE 2005» Version 1.1. Ref : DESE/PEB – 07095R.

[MarchésPub'2006] Décret n° 2006-975 du 1er août 2006 portant code des marchés publics

[MDE'2005] F. Garde «Maîtrise de l'énergie dans les projets de bâtiment de l'université de la Réunion», «Note à intégrer dans les pré-programmes et programmes de construction de l'Université de la Réunion», Novembre 2005

[Midler'1996] C. Midler, «l'auto qui n'existait pas, management de projet et transformation de l'entreprise», Inter-éditions, Paris,1993.

[Minergie'2007] Minergie®, http://www.minergie.ch/fr/. Consulter en 2005/2007

[MOP'2000] Loi Mop. Revue «D'Architectures» n° hors série. Edition : Société d'Edition Architecturale (SEA). Decembre 2000.

[MOP'2005], http://www.localjuris.com.fr/Sources/legis/Lois/MOPmodif.htm, consulté en 2005.

[Moro'2000] M. Moro. Programmation des bâtiments "méthodologie et cas pratiques". Édition Eyrolles, 2000.

[Naïm'2004] P. Naïm, P-H. Wuillemin, P. Leray, O. Pourret, A. Becker, "Réseaux bayésiens " edition EYROLLES, 2eme Edition. 2004.

[Neil'2000] M. Neil, N. Fenton, L. Nielson. "Building large-scale Bayesian networks", he Knowledge Engineering Review archive, Volume 15, Issue 3, September 2000.

[Nakahara'2004] N. Nakahara, K. Kamitani, H. Onojima," Defining Commissioning Process/Tools using Model Quality Control Matrix ", National Conference on Building Commissioning, Mai 18-20, 2004.

[Naticchia'2006] B. Naticchiaa, A. Fernandez-Gonzalezb, and A. Carbonaria. "Bayesian Network model for the design of roofpond equipped buildings" , Department of Architecture, Construction and Structures, Faculty of Engineering, Polytechnic University of Marche, via Delle Brecce Bianche 60131 Ancona, Italy, Natural Energies Advanced Technologies Laboratory, University of Nevada Las Vegas, 4505 Maryland Parkway, NV 89154, Las Vegas, USA, September 2006.

[Odmir4'2007] Fondation Bâtiment Energie, "Outil d'aide à la Décision pour des Maisons Individuelles Réhabilitées facteur 4", Rapport d'avancement n°1, Ref : 07-007R.

[Passiv'2006] http://www.passiv.de/, consulté en 2006

[PEREIRA'2004] E.B. PEREIRA DE CASTRO, «Méthode d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritères et sur des données simulées des comportements des bâtiments» institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon et l'université Fédérale de Rio De Janéro. Thèse soutenue en 2005.

[PlanClimat'2004] Plan Climat 2004, «Face au changement climatique agissons ensemble» ministère de l'écologie et du développement. http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/plan_climat.pdf, consulté en 2007

[PlanClimat' 2004-2] http://www.rac-f.org/article.php3?id_article=506, consulté en 2007

[Piette'2001] M.A. Piette, S. Kinney, P. Haves, «Analysis of an information management and diagnostic system to improve building operations», Energy and Buildings. 2001.

[POEL-2000] B. Poel, "Energy Simulation Models and Practice", l'International Building Physics Conference "Tools for design and engineering of buildings". Eindhoven (Pays-Bas) en septembre 2000.

[Raymond'2002] J. Raymond, N. Larsson, "Green Building Challenge 2002, GTBTool User Manual", Fevrier 2002, International Initiative for a sustainable Built Environment.

[Roy'1985] B. Roy, «Méthodologie Multicritères d'aide à la décision (pour choisir, trier, ranger)», Economicae, 1985.

[Reilly'1975] J-C. Reilly, Jr. Ships of the Uneted States Navy; "Chistening, Launching and Commissioning", deuxième Edition. Division histoire naval, department de la Navy, Washington, DC, 1975.

[Ricaud'2007] A.Ricaud, «La Maison ZEN» cynthelia expertise et conseil, Dossier de présentation. 28 08 2007.

[Rivard'1995] H.Rivard, C.Bédard, P.Fazio, K.H.Ha, "Functional Analysis of the Preliminary Building Envelope Design Process, Building and Environment", Vol. 30, n°3. 1995.

[Rossi'2003] T.M. Rossi, J.D. Douglas, M.V.A. Bianchi, "Evaluating and documenting the performance of unitary HVAC equipment with the Honeywell HVAC service assistant," Proceedings of National Conference on Building Commissioning, California, Mai 2003.

[RT'2005] Guide réglementaire : réglementation thermique 2005, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

[Quintrand'1985] P. Quintrand & AL., «La CAO en Architecture», Edition Hermés, 1985.

[Sauce'2003] G. Sauce. "La gestion de patrimonial". Laboratoire Locie, Chambéry university. Octobre 2003.

[Shaviv'1998] E. Shaviv, "Computer aided Energy Conscious Building Deseign", Faculty of Architecture and Town Planning, Technion- Israel Institut of Technology. RenewableEnergy,1998.

[Sidler'2000] O. Sidler, «Logement à faibles besoins en énergie, guide de recommandations et aide à la conception», (ADEM/Conseil général de Savoie). Mars 2000.

[SIMBAD'2001] SIMBAD (2001). *SIMBAD Building and HVAC toolbox*, Version 3.1.0 (2001). CSTB, France.

[Siret'2007] F. Siret, «Des labels pour les bâtiments basse énergie». Le Moniteur du 20 Avril 2007.

[Sprites'2000] P. Spirtes, C. Glymour & R. Scheines. "Causation, Prediction, and Search. MIT Press, Adaptive Computation and Machine Learning". Deuxième edition. 2000.

[Taurines'2007] M. Taurines, M. Jandon «Suivi Energétique du Bâtiment «Génération E». Demeure des carrières à Fontenay sous Bois», Rapport intermédiaire, Période Février 2007-Octobre 2007

[Thomas'1999] R. Thomas M. Fodham & Parteners «Environmental Design, An introduction for architects and engineers». Editer par E & FN Spon. Deuxième edition 1999.

[Thomsen'2004] K.E. Thomsen, J.M. Schultz b, B. Poel. "Measured performance of 12 demonstration projects—IEA Task 13 "advanced solar low energy buildings", Revue: energy and buildings. IEA maison ZEB, Janvier 2004.

[Thormark'2001] C. Thormark, "A low energy building in a life cycle-its embodied energy, energy need for operation and recycling potential », department of building science, Lund Institute of Technology (Suède). Building and Environment, 2001.

[TRNSYS'2005] TRNSYS 16 (2005). *A Transient System Simulation Program,* Solar Energy Laboratory,University of Wisconsin Madison, USA.

[Turkaslan'2006] M-T. Turkaslan-Bulbul, Omer Akin, «Computational Support for Building Evaluation : Embedded Commissioning Model», Ecole d'architecture, Carnegie Melon University, ScienceDirect, 2006.

[Vaezi'2002] H. Vaezi Nedjad, M.Jandon, B. Salandre. Performances énergétiques – Ministère de l'équipement, Guide d'entretien, DDE 44

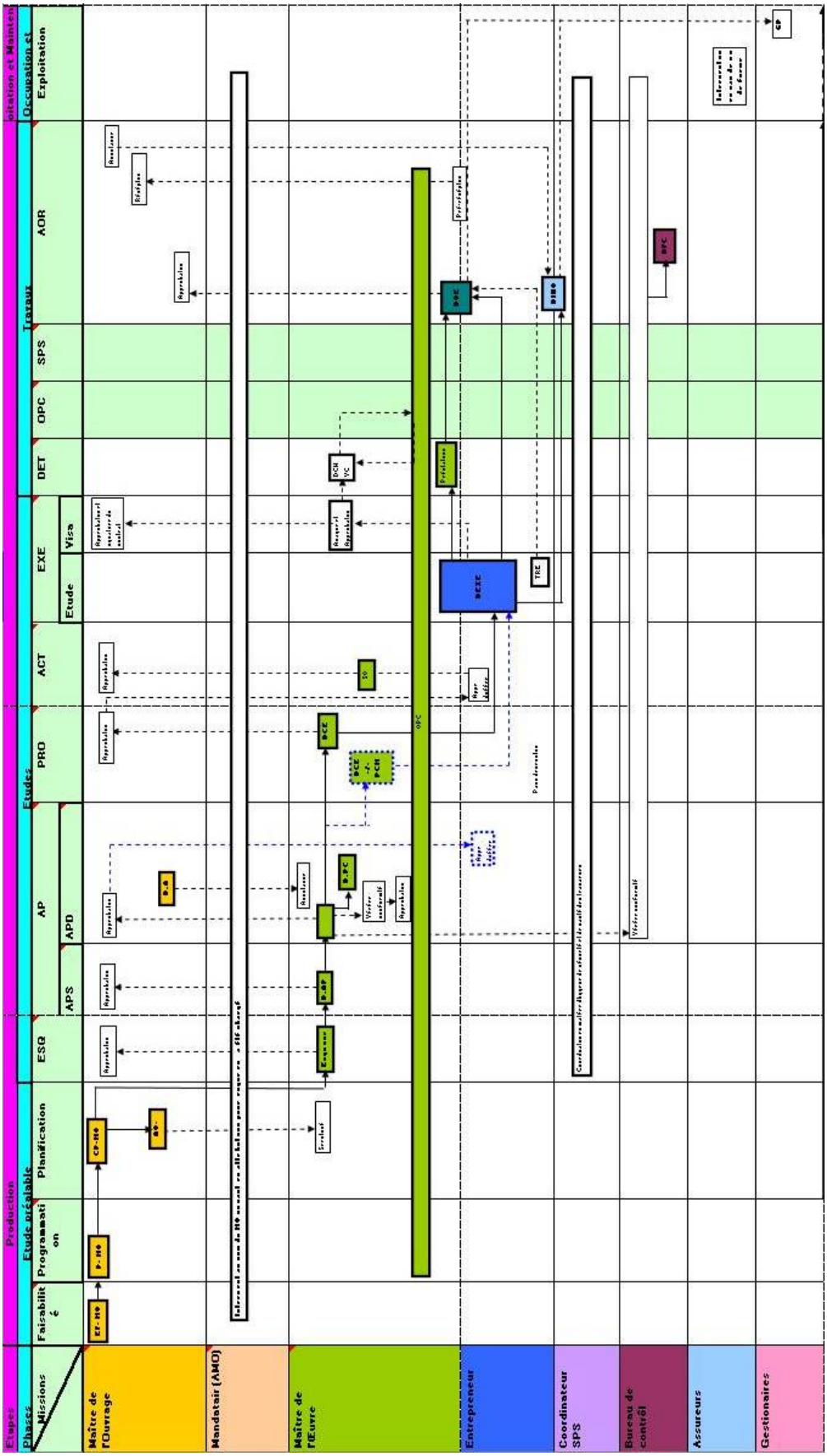
[Visier'2004] J-C Visier "Des outils pour le commissionnement des installations de genie climatique. L'approche de l'annexe 40 » Annexe 40, ICEBO 2004, Paris octobre 2004.

[Visier'2005] J-C Visier, H. Yoshida. "Commissioning tools: a way to manage growing complexity of energy systems in buildings". "Action for Sustainability", the 2005 World Sustainable Building Conference in Tokyo (SB 05 TOKYO). Tokyo 27-29 September 2005.

[Wright'1979] D. Wright, "Soleil Nature Architecture", Edition Parenthèses. Première edition at Roquevaire1979.

ANNEXES

ANNEXE1 : LE PROCESSUS DE CONCEPTION D'APRÈS LA LOI MOP



Représentation du processus de conception avec un processus de commissionnement intégré

ANNEXE 2 : ENQUÊTE

Questionnaire aux différents acteurs du bâtiment au sujet de l'impact du commissionnement tout au long du processus de réalisation sur la qualité d'un bâtiment à faible consommation d'énergie.

Sommaire

INTRODUCTION

SOMMAIRE

ACTEURS

SECTEUR D'ACTIVITÉ

QUESTIONNAIRE

Identité de l'acteur
Recensement du point de vue général des acteurs
Informations liées au projet et ses consommations
Définition des besoins en méthodes et outils de Commissionnement
Difficultés rencontrées lors des évaluations
Contraintes
Suggestions

Introduction

Les bâtiments à faible consommation d'énergie connaissent actuellement un grand intérêt. Notamment dans le domaine de la recherche ou de nombreuses solutions sont explorées pour répondre à cette demande. Le processus de commissionnement étant un processus de qualité, il représente un des moyens qui vont nous permettre d'arriver de manière optimale et sûre aux performances souhaitées.

Le CSTB est l'un des participants de la prochaine Annexe de l'AIE qui abordera principalement l'aspect financier et technologique du commissionnement dans le cadre du bâtiment à faible consommation d'énergie. Ce questionnaire se veut une amorce à cette étude. Il vise à apporter des informations (besoins, difficultés) fournies par les différents acteurs du bâtiment qui interviennent dans la conception et exploitation de ce genre de projet.

Un certain nombre de travaux ont déjà été réalisés au sein du CSTB tels que la réglementation thermique pour les constructions neuves (RT2000). Cette réglementation vise à réduire les consommations d'énergie de 20% dans les logements et 40% dans le tertiaire, et à limiter l'inconfort d'été dans les locaux non climatisés. Elle s'exprime en performance à atteindre et fournie le label "haute performance énergétique -HPE-" ou le label 'très haute performance énergétique -THPE-.

Il est souhaitable de compléter ces travaux par une démarche qui permettra de mettre au point des procédures permettant d'assurer une conception appropriée et optimale de ce type de bâtiments. Ainsi que de leur gestion future.

L'objectif de ce questionnaire est d'appuyer la nécessité d'introduire le Commissionnement dans la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie ainsi que de définir le meilleur moyen, qu'il soit matériel, organisationnel ou financier pour cette intégration.

La 1ère étape consiste à interroger les principaux acteurs du secteur du bâtiment afin de connaître leur avis sur la question, puis de recenser les outils et les méthodes utilisées actuellement en France pour réaliser ces tâches. La 2ème étape consiste à cerner les difficultés rencontrées et leurs besoins en terme d'outils et de méthodologie, puis une analyse des contraintes existantes.

Acteurs

Maître d'ouvrage
Maître d'œuvre
Bureau d'étude
Installateur d'équipements
Constructeur de GTB
Contrôleurs techniques
Organisme de qualification
Exploitant

Secteur d'activité

Les bâtiments considérés par cette étude sont les bâtiments tertiaires neuf et existants pour rénovation ou réutilisation.

Questionnaire

Identité de l'acteur

Nom :
Prénom :
Fonction :
Coordonnées :
Domaine d'activité :
Secteur d'activité :
Type de projets traités :

1. De votre point de vu qu'est ce que le commissionnement ?

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

2. Recensement du point de vue général des acteurs

Est-ce que le commissionnement fait partie intégrante de votre intervention dans le cadre de la conception d'un projet courant ?

Etape	Elaboration	Cx	Tâches	Contraintes
Planning / programmation				
Esquisse / AP				
AOC				
EXE				
Travaux				
Exploitation				
Autres				

Avez-vous contribué à des projets de bâtiments à Faible Consommation d'énergie ?

- OUI
    - Dans quel cadre :
        - Habitat
        - Tertiaire
- NON

Avez-vous ciblé un bâtiment à faible consommation d'énergie ?

……
……

A quel moment ?

……
……

Pourquoi ?

……
……
……
……

Quels sont les choix que vous avez faits ?

……
……
……
……
……
……
……

Quelles sont à votre avis les décisions les plus importantes à prendre dans ce genre de projets pour atteindre les performances voulues? Et à quel moment doivent-elles être prises ?

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Quelles sont les différences majeures entre la conception de ce type de Bâtiments par rapport aux bâtiments courant ?

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Quels ont été les problèmes que vous avez rencontrés?

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Comment pensez vous que le commissionnement va aider dans l'optimisation de la conception du bâtiment à faible consommation d'énergie ou d'une réhabilitation d'un bâtiment en vue d'en faire un bâtiment de ce type?

……
……
……
……
……
……
……
……
……

……
……
……
……
……
……
……

3- Informations liées au projet et ses performances énergétiques

Comment prenez vous en charge la question des consommations d'énergie au cours du processus de conception ? Et a quel moment ?

Domaines	**Oui/non**	**Commentaires**
Planning / programmation		
Esquisse / AP		
AOC		
EXE		
Travaux		
Exploitation		
Autres		

Quelles solutions préconisez-vous en cas de dépassement de budget ?

- Rechercher une solution différente
- Abandon des choix pris au départ et qui induisent le dépassement de budget
- Faire des compromis entres différents corps d'états

    - Oui
        - lesquels ?

…… ……
……
……
……

    - Non

- Autres

……
……
……
……

Quel est le temps de retour par rapport à l'investissement ?

……
……

Comment considérez-vous le rapport coût / bénéfice ?

……
……
……
……

Quelles sont les omissions et les erreurs fréquemment commises lors de la conception d'un bâtiment et qui influe fortement sur la charge d'exploitation ?

……..
……
……
……
……
……
……
……
……
……

A quoi sont dues ces erreurs ?

- Manque de temps
- Manque d'argent
- Autres

……
……

Quelles solutions préconisez-vous ?

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Prévoyez-vous une gestion énergétique de votre Bâtiment lors de sa conception ?

- *Si oui,* pourquoi ?

……
……

- *Si non*, pourquoi ?

……
……

Pensez-vous que les occupants et les exploitants prennent actuellement conscience de l'importance de cette action ?

- *Si oui,* avez-vous eu une démarche auprès d'eux pour leur expliquer ? Comment ?

……...
……
……

- *Si non*, pourquoi ?

……..
……
……

Quelle appréciation du confort l'utilisateur donne-t-il ? Et quel est son degré de satisfaction ?

……...
……
……..
……
……...
……
……..
……
……...
……
……

Etes-vous arrivé aux performances énergétiques prévues lors une de vos interventions ?

- Oui
  - Dans quel cadre (projet) ?

……...
……...
……..…
……
……..
……

- Non
  - Pourquoi ? qu'est ce qui a manqué ?

……..……
……
……...
……
……...
……

.

Quels sont les arguments qui parlent en faveur ou contre la conception de bâtiment à faible consommation d'énergie ?

- **Arguments positifs**
  - Confort

……...
…… ..
…… ..

  - Ecologie

……...……
……...
……

  - Economie

……...……
……
……

  - Autres

……...……
……
……..
……
……...
……

- **Arguments négatifs**

……...
……
……...
……
……...
……
……..
……
……...
……
……...……
……
……...
……
……...
……
……..…
……..……

4. Définition des besoins en méthodes et outils de Commissionnement

Quels sont les outils qui vous paraissent les plus appropriés dans le cadre du commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, à quel moment les utilisez-vous, quelles sont les informations dont vous avez besoin et que vous manque t il en général ?

Etape	Outils	Contraintes	Informations	Manques
Planning / programmation				
Esquisse / AP				
AOC				
EXE				
Travaux				
75				
Exploitation				
Autres				

Doivent-ils être différents de ceux utilisés dans le cadre du commissionnement des bâtiments courants ?

- *Si oui,* pourquoi ?

………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….

- *Si non*, pourquoi ?

………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….

Quels outils inexistants vous paraissent importants de développer ?

……………………………………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….
………
…………………………………………………………………………….

5. Difficultés rencontrées lors des évaluations

Pourriez vous énoncer les principaux problèmes auxquels vous êtes ou pourriez être confronté lors d'une évaluation ? Et quelles seraient les causes à votre avis ?

Type de problèmes	**OUI/NON**	**Pourquoi ?**
Manque d'informations		
Format des informations		
Incompatibilité des outils avec les informations récupérées		
Autres		

Contraintes

Quelles sont les contraintes que vous pourriez rencontrer dans le cadre du commissionnement d'un bâtiment à faible consommation d'énergie ?

- Techniques

……
……

- Organisationnelles

……
……

- Réglementaires

……
……

- Economiques

……
……

- Sociale

……
……

- Juridiques

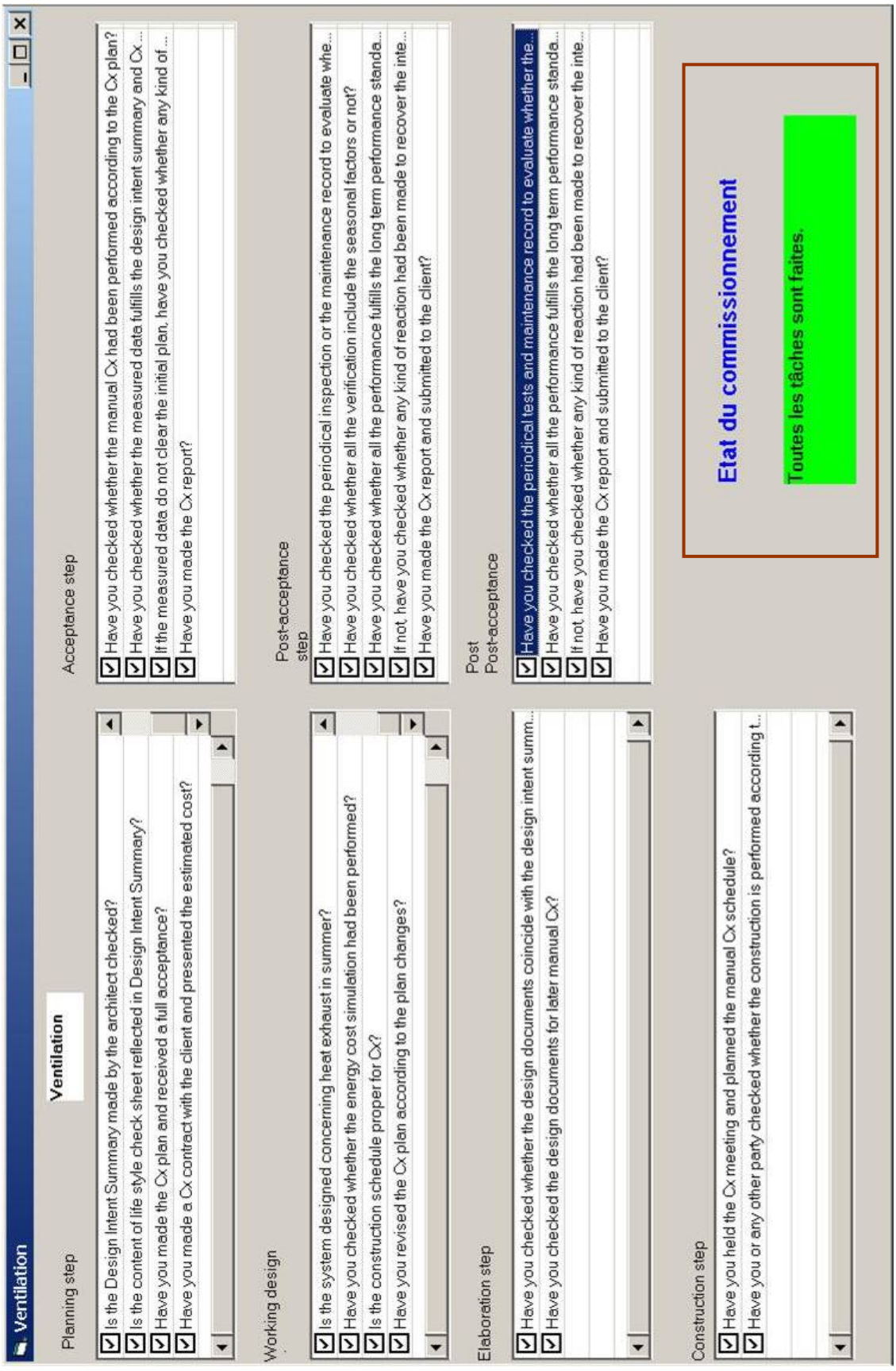
……
……

Suggestions

Quels sont vos remarques ou observations supplémentaires ?

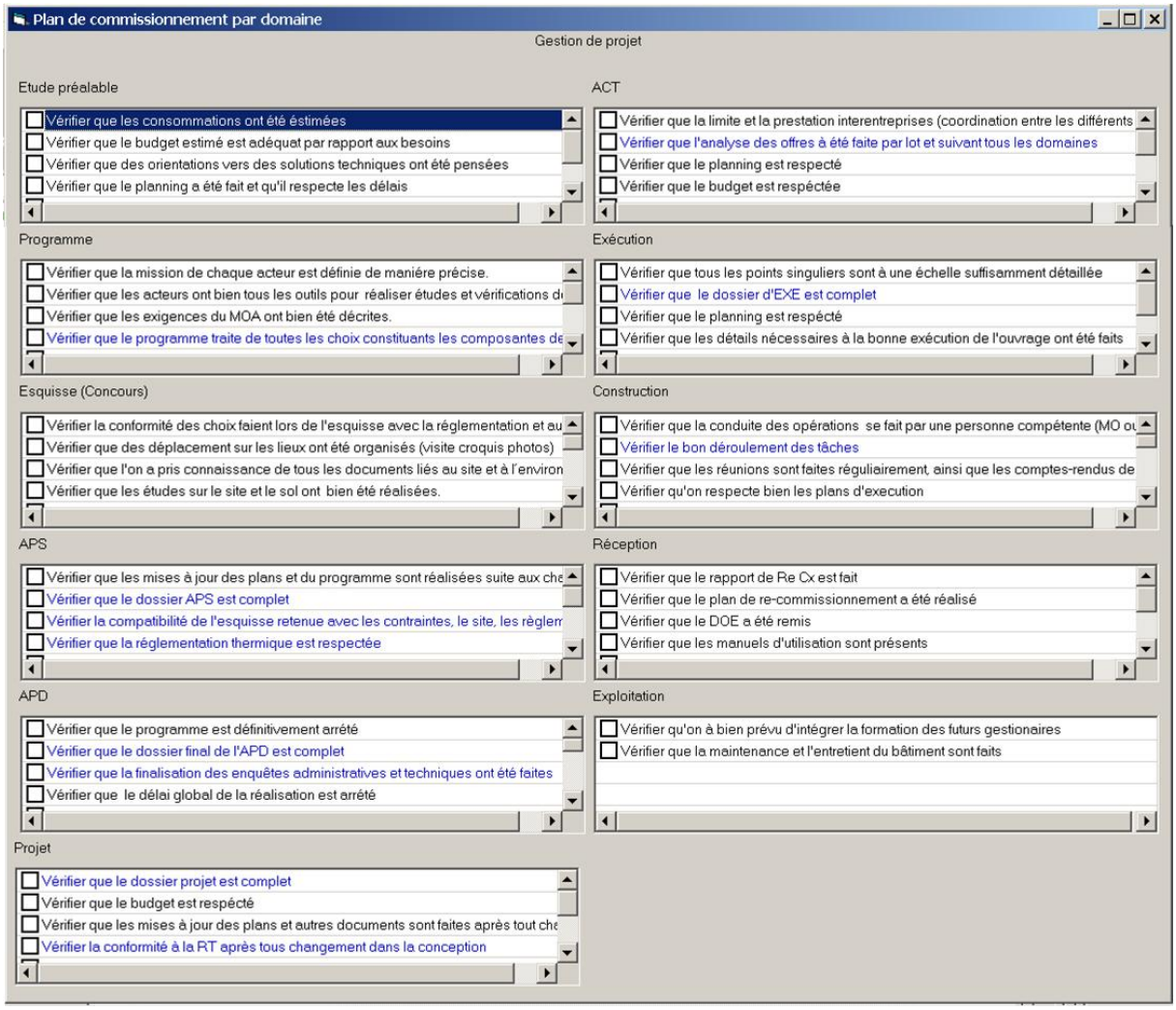
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

ANNEXE 3 : Plan de commissionnement «Ventilation»



Représentation du plan de commissionnement des systèmes de ventilation [Annexe40'2004]

ANNEXE 4 : Plan de commissionnement par domaine



Représentation du plan de commissionnement pour le domaine gestion de projet

ANNEXE 5 : Table de probabilités conditionnelles

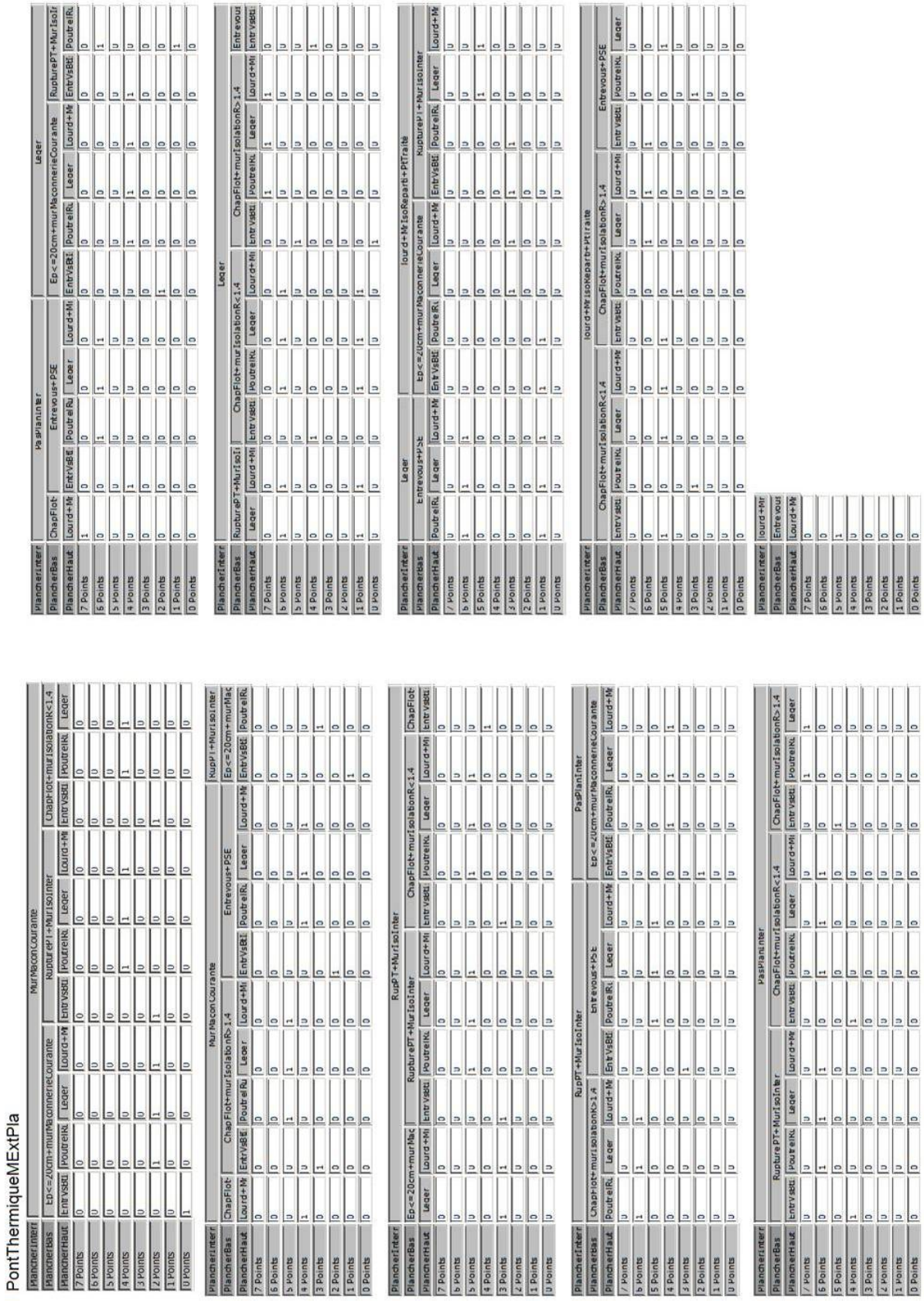
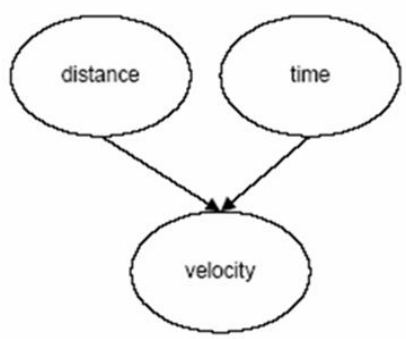
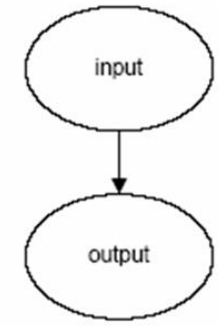


Table de probabilité conditionnelle du nœud PontThermique (Version 1 de l'outil dynamique)

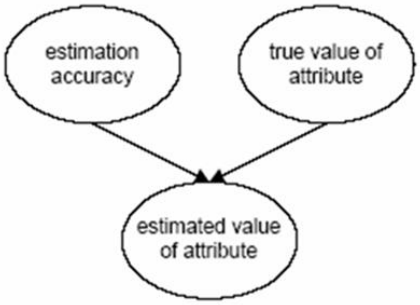
ANNEXE 6 : Idiomes



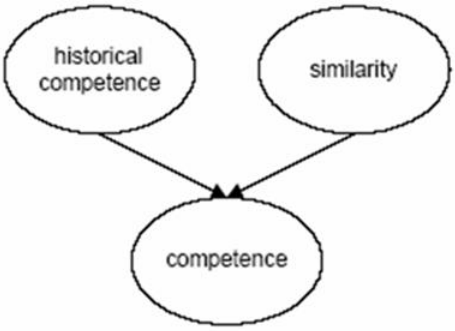
IDIOME DE DÉFINITION/SYNTHÈSE



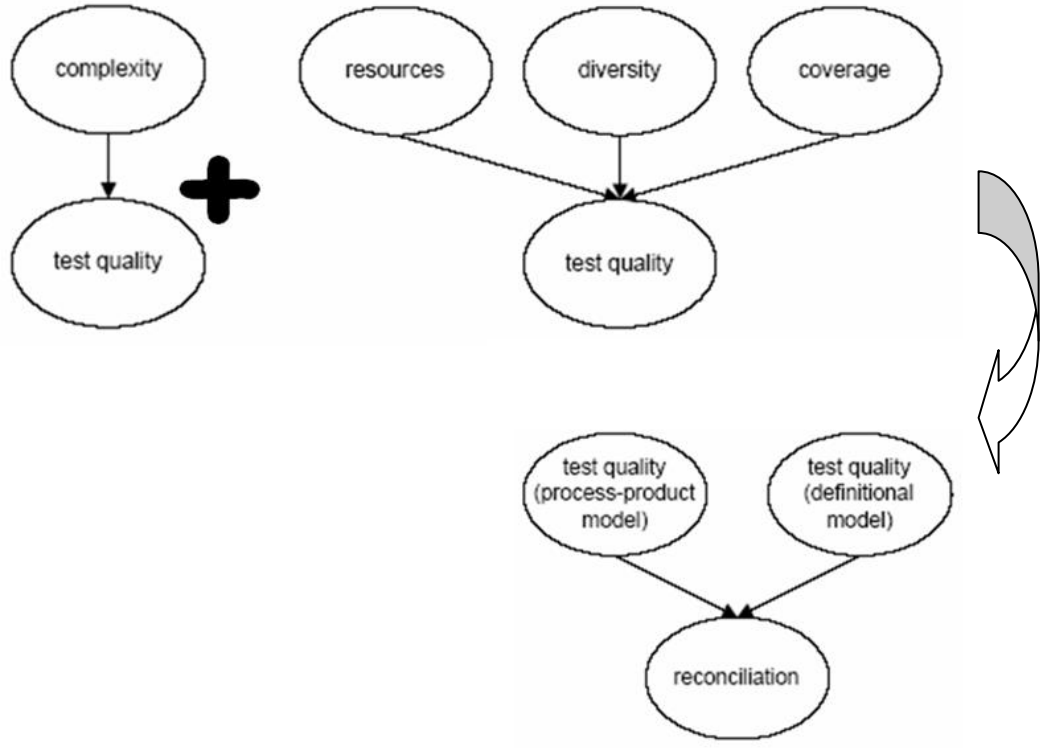
IDIOME DE CAUSE/CONSÉQUENCE



IDIOME DE MESURE



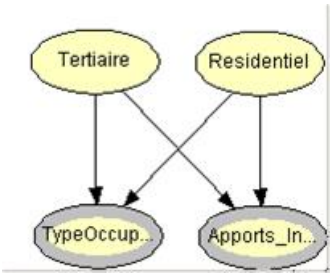
IDIOME D'INDUCTION



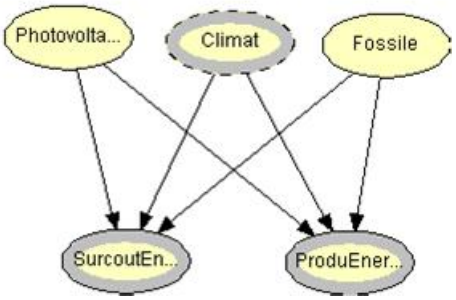
IDIOME DE RÉCONCILIATION

ANNEXE 7 : Présentation des classes de la version quatre de l'outil dynamique

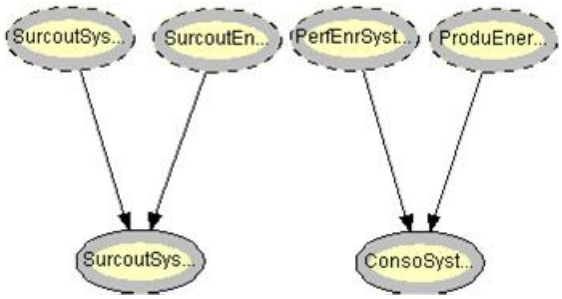
Niveau 1, RBn°1 : classe Environnement



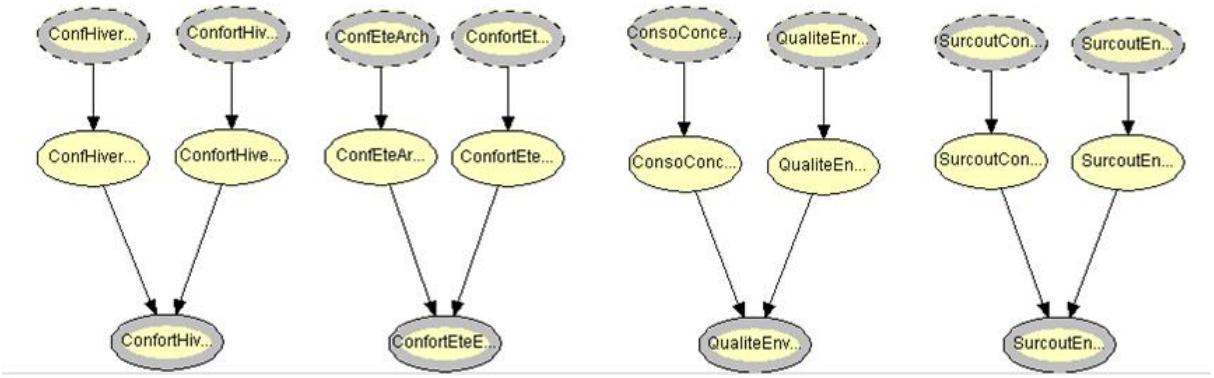
Niveau 1, RBn°3 : classe ApportsInternes



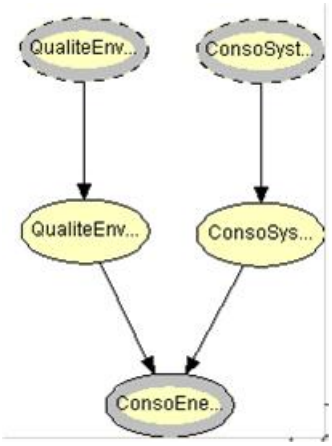
Niveau 1, RBn°6 : classe ProductionEnergie



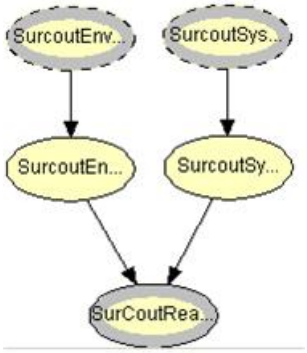
Niveau 2, RBn°8 : classe Systèmes



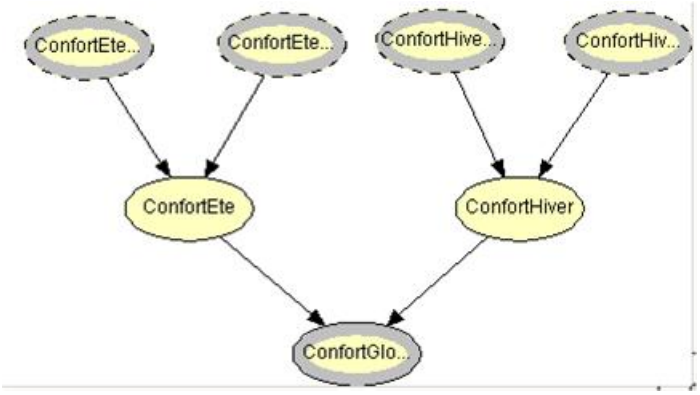
Niveau 2, RBn°9 : classe EnveloppeGobale



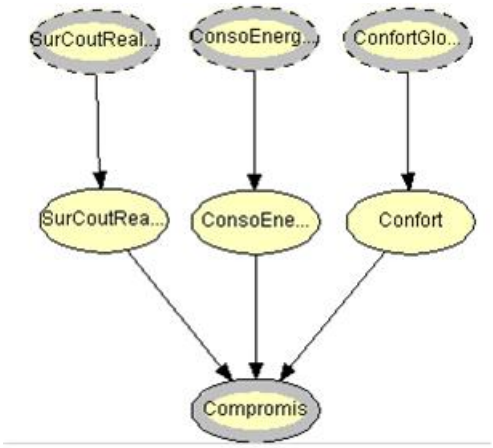
Niveau 3, RBn°10 : classe ConsoGlobale (consommation d'énergie)



Niveau 3, RBn°11 : classe SurcoûtGobale



Niveau 3, RBn°12 : classe ConfortGlobal



Niveau 3, RBn°13 : classe Compromis

ANNEXE 8 : Présentation du Réseau Bayésien Orienté Objet de la version 4 sous format net