HAL
open science

Processus de conception énergétique de bâtiments durables

Ernesto Velázquez Romo

To cite this version:

Ernesto Velázquez Romo. Processus de conception énergétique de bâtiments durables. Eco-conception. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. NNT : 2015ENAM0022 . tel-01314137

HAL Id: tel-01314137

https://pastel.hal.science/tel-01314137

Submitted on 10 May 2016

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.

2015-ENAM-0022

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Conception "

présentée et soutenue publiquement par

Ernesto Efrén VELÁZQUEZ ROMO

Le 18 septembre 2015

Processus de conception énergétique de bâtiments durables

Directeur de thèse : **Jean-Pierre NADEAU**
Co-encadrement de la thèse : **Denis BRUNEAU**

Jury

Mme. Nadia SAIYOURI, Professeur, Université de Bordeaux	Présidente
Mme. Anne VENTURA, Chargée de recherche HDR, Polytech Nantes	Rapporteur
Mme. Catherine SEMIDOR, Professeur, ENSAP Bordeaux	Rapporteur
M. Jean-Rodolphe PUIGGALI, Professeur, Université de Bordeaux	Examinateur
M. Jean-Pierre NADEAU, Professeur, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Denis BRUNEAU, Maître de conférences HDR, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Philippe LAGIERE, Directeur scientifique, Nobatek	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Bordeaux
Laboratoire I2M UMR 5295

Table des matières

Nomenclature i
Table des figures v
Table des tableaux ix
Introduction générale 1
Contexte de la recherche 1
Problématique de recherche 2
Apports de la thèse 3
Organisation du document 4
Chapitre 1 Projet de conception du bâtiment : Etat de l'art 5
1.1. Analyse de la performance énergétique du bâtiment 5
1.1.1. Le bâtiment et sa performance énergétique 6
1.1.2. Méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment 8
1.1.3. Discussion 18
1.2. Progression de la connaissance dans le processus de conception du bâtiment 20
1.2.1. Précision et impact de la prise de décisions dans un projet de construction 20
1.2.2. Phases de conception d'un projet de construction en France 21
1.2.3. Tendances actuelles dans l'industrie du bâtiment 24
1.2.4. Discussion 28
1.3. Conclusions 29
Chapitre 2 Méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables 31
2.1. Principes et logique de la méthodologie 31
2.2. Sélection d'indicateurs de performance pour la conception énergétique du bâtiment 35
2.2.1. Vision fonctionnelle du bâtiment du point de vue énergétique 36
2.2.2. Aspects environnementaux 39
2.2.3. Aspects économiques 42
2.2.4. Aspects sociaux 43
2.2.5. Discussion 47
2.3. Méthode de calcul des indicateurs de performance 48
2.3.1. Définition du périmètre d'analyse 50
2.3.2. Description de la typologie du bâtiment d'étude 55

2.3.3. Modèle de simulation thermique dynamique 57
2.3.4. Modèle de calcul des indicateurs environnementaux 64
2.3.5. Modèle de calcul des indicateurs économiques 66
2.3.6. Modèle de calcul de l'indicateur de confort hygrothermique 69
2.3.7. Modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel 70
2.3.8. Modèle de calcul de l'indicateur de confort acoustique 72
2.3.9. Modèle de calcul de l'indicateur de qualité de l'air intérieur 74
2.3.10. Base de connaissance d'éléments du bâtiment 75
2.3.11. Discussion 79
2.4. Progression des décisions de conception dans les premières phases de projet 80
2.4.1. Présentation de la logique de progression des décisions de conception 81
2.4.2. Définition de la configuration de bâtiment de base 88
2.4.3. Illustration de la logique de progression des décisions de conception 90
2.4.4. Discussion 91
2.5. Conclusions 91
Chapitre 3 Vers un outil d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables 93
3.1. Présentation de l'outil d'évaluation de la performance énergétique 93
3.2. Interface d'entrée de données 94
3.2.1. Déclaration de paramètres de simulation 94
3.2.2. Déclaration des variables de conception 95
3.3. Base de connaissance de paramètres de simulation 96
3.3.1. Base de données de composants et sources d'énergie 97
3.3.2. Base de données météorologiques 99
3.4. Moteur de calcul des indicateurs de performance énergétique 100
3.5. Interface d'exploitation de résultats 102
3.6. Conclusions 105
Chapitre 4 Validation de la méthodologie d'évaluation 107
4.1. Evaluation de la configuration du bâtiment de base 108
4.2. Effet de l'orientation du bâtiment 111
4.3. Effet du taux de vitrage des façades 116
4.4. Effet de la présence d'une façade double peau vitrée 121
4.5. Exemple de scénario de conception d'une façade double peau vitrée 123
4.5.1. Effet du type de vitrage de la façade vitrée 124
4.5.2. Effet de la typologie de l'épaisseur de la cavité d'air entre les façades 126

4.5.3. Effet de la typologie du pourcentage d'ouverture de la façade vitrée 128
4.5.4. Résultat du scénario de conception 129
4.6. Conclusions 130
Conclusion générale et perspectives 135
Contexte de la thèse 135
Contributions 135
Applications 137
Perspectives 138
Bibliographie 141
Annexes 151

Nomenclature

Symboles

Symbole	Description	Unités
h	Coefficient d'échange thermique	W/(m^2·K)
BSL	Période de référence du cycle de vie du bâtiment	Années
C	Capacitance thermique	J/K
	Coût par unité de surface	€/m^2
COP	Coefficient de performance d'une pompe à chaleur	-
Cp	Capacité thermique massique	J/(kg·K)
D	Isolement acoustique standardisé pondéré	dB
DA	Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel	%
E	Eclairement	Lux
EER	Coefficient d'efficacité énergétique d'une pompe à chaleur	-
FLJ	Facteur de lumière du jour	-
G	Facteur solaire	-
H	Coefficient total de transmission thermique	W/K
I	Vecteur d'impacts environnementaux	-
K	Coefficient de changement d'unités	-
L	Longueur	m
LCC	Coût global	€/m^2
N	Nombre	-
P	Puissance thermique	W
PSL	Durée de vie estimée	Années
Q	Débit de renouvellement d'air	m^3
	Quantité totale	-
R	Résistance thermique	(m^2.K)/W
	Ratio surfacique de fermeture de protection solaire	-
	Indice d'affaiblissement acoustique	dB
S	Surface	m^2
T	Température	K
U	Coefficient de transmission thermique surfacique	W/(m^2·K)
UF	Unité fonctionnelle	-
V	Volume	m^3
X	Transmissions acoustiques	-
d	Distance	m
e	Epaisseur	m
f	Facteur	-
k	Coefficient	-
m	Masse	kg
n	Nombre par unité de surface	1/m^2
p	Puissance thermique par unité de surface	W/m^2
q	Quantité annuelle	1/année
r	Facteur de réflexion	-
t	Temps	s

Lettres grecques

Symbole	Description	Unités
Ψ	Coefficient linéique de pont thermique	W/(m·K)
α	Angle d'orientation ou	°
	Coefficient d'absorptivité	-
	Taux d'actualisation	%
β	Pondération de capacitance thermique	-
η	Efficacité	-
λ	Conductivité thermique	W/(m·K)
ρ	Masse volumique	kg/m^3
τ	Taux de vitrage ou taux de remplacement	-
φ	Flux thermique surfacique	W/m^2
ϕ	Flux thermique	W

Indices

Symbole	Description
h	Relatif au système de chauffage
hr	Relatif au système de récupération de chaleur
B	Relatif au bâtiment
BR	Relatif aux zones thermiques d'intérêt
C	Relatif à la construction du bâtiment
E	Relatif à la consommation d'énergie
P	Relatif aux produits de construction
R	Relatif au remplacement de produits de construction
U	Relatif à la phase d'exploitation
ac	Relatif au système de climatisation
air	Relatif à l'air
$bridges$	Relatif aux ponts thermiques
cav	Relatif à la cavité d'air dans la façade double peau vitrée
$conf$	Relatif au confort des occupants
env	Relatif à l'enveloppe du bâtiment
eq	Relatif aux valeurs globales ou équivalentes
ext	Relatif à l'extérieur de l'espace
$glaz$	Relatif aux vitrages de la façade vitrée
$ground$	Relatif au sol
in	Relatif à l'intérieur de l'espace
inf	Relatif aux infiltrations par l'enveloppe
$layers$	Relatif aux couches de matériaux composant une paroi opaque
$light$	Relatif aux équipements d'éclairage
$loads$	Relatif aux charges thermiques internes
m	Relatif à la valeur moyenne
max	Relatif à la valeur maximale
mob	Relatif au mobilier de l'espace
nT, A, tr	Relatif à un bruit de trafic à l'émission
occ	Relatif à l'occupation
op	Relatif aux ouvertures de la façade vitrée
$orient$	Relatif aux orientations du bâtiment (sud, est, nord, ouest)
$other$	Relatif aux zones thermiques voisines
out	Relatif à la surface extérieure des parois de l'enveloppe
pc	Relatif aux équipements de bureautique
r	Relatif au rayonnement des parois intérieures
rec	Relatif à la récupération des apports solaires dans la cavité entre façades
rep	Relatif à la répartition des apports thermiques l'air et les parois intérieures
rep	Relatif à la répartition des apports solaires
ret	Relatif à la rétention des apports solaires dans les espaces
ret	Relatif à la rétention des apports solaires
sat	Relatif à la satisfaction des occupants
sp	Relatif aux protections solaires
$space$	Relatif à la zone thermique/espace
sun	Relatif au rayonnement solaire
$surf$	Relatif aux surfaces intérieures délimitant un espace
$syst$	Relatif aux systèmes techniques de chauffage et refroidissement
$vent$	Relatif au système de renouvellement d'air
$wall$	Relatif aux parois
win	Relatif aux fenêtres
$zones$	Relatif aux zones thermiques composant le bâtiment

Table des figures

Figure 0.1. Logique de la méthodologie d'aide à la décision proposée dans ce travail. 3
Figure 1.1. Sources de consommation énergétique à considérer dans le calcul de la performance énergétique d'un bâtiment selon la directive européenne 2010/31/UE. 6
Figure 1.2. Décomposition des éléments du bâtiment du point de vue énergétique. 7
Figure 1.3. Catégories des critères des certifications environnementales BREEAM, LEED et HQE. 9
Figure 1.4. Les trois dimensions du concept de la durabilité. 10
Figure 1.5. Liste des normes développées par le comité technique TC350 sur la contribution des ouvrages de l'environnement bâti au développement durable. 13
Figure 1.6. Catégories de critères des initiatives internationales collaboratives. 14
Figure 1.7. Critères et éléments d'aide à la décision des outils d'évaluation dans la conception énergétique du bâtiment. 17
Figure 1.8. Dimensions du concept de la durabilité appliqué à la conception énergétique du bâtiment. 19
Figure 1.9. Potentiel d'impact des décisions sur la performance du bâtiment (Adapté de IEA, 2003). 21
Figure 1.10. Positionnement des phases d'études de conception dans le projet de construction des bâtiments. 22
Figure 1.11. Construction d'une façade double peau vitrée dans le campus de l'Université de Bordeaux, sans vitrages (à gauche) et avec vitrages (à droite). 26
Figure 1.12. Principe thermique d'opération d'une façade double peau vitrée. 26
Figure 1.13. Composants principaux d'une façade double peau vitrée. 27
Figure 1.14. Structure porteuse d'une façade double peau vitrée, avant montage (à gauche) et après montage (à droite). 28
Figure 1.15. Vitrages d'une façade double peau vitrée, avant montage (à gauche) et après montage (à droite). 28
Figure 1.16. Premières phases du processus de conception d'un bâtiment selon le cadre normatif français. 29
Figure 2.1. Vision globale de la méthodologie d'évaluation de la performance énergétique proposée. 32
Figure 2.2. Fonctions et contraintes du bâtiment du point de vue énergétique. 37
Figure 2.3. Indicateurs de performance énergétique. 48

Figure 2.4. Les différents modèles composant la méthode de calcul des indicateurs de performance. 49
Figure 2.5. Modèle de répartition des zones thermiques. 57
Figure 2.6. Modèle thermique d'une paroi opaque selon le principe de l'analogie électrique. 59
Figure 2.7. Schématisation de la modélisation thermique d'une zone thermique quelconque par analogie électrique. 60
Figure 2.8. Schématisation de la modélisation thermique pour une zone thermique en contact avec une cavité d'une façade double peau vitrée. 63
Figure 2.9. Décomposition des impacts environnementaux du bâtiment dans son ensemble. 66
Figure 2.10. Décomposition du coût global du bâtiment. 67
Figure 2.11. Calcul du coût global à partir des coûts différés dans le temps. 68
Figure 2.12. Définition du Facteur de Lumière du Jour. 71
Figure 2.13. Types de transmission acoustique d'un bruit aérien. 73
Figure 2.14. Catégories de composants du bâtiment constituant la base de connaissance. 76
Figure 2.15. Logique de progression des décisions de conception dans les premières phases de projet. 82
Figure 2.16. Les quatre sous-étapes dans la phase d'Esquisse. 84
Figure 2.17. La phase d'Avant-Projet Sommaire. 86
Figure 2.18. La phase d'Avant-Projet Détaillé. 87
Figure 2.19. Méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique dans les premières phases de projet. 92
Figure 3.1. Les quatre modules composant l'outil d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment. 93
Figure 3.2. Tableau d'entrée des paramètres de simulation. 95
Figure 3.3.Tableau d'entrée pour la prise de décisions de conception de la phase d'Avant-Projet Sommaire. 95
Figure 3.4. Extrait d'une feuille d'exportation de données au moteur de calcul. 96
Figure 3.5. Extrait de la fiche des vitrages dans la base de données de composants et sources d'énergie. 97
Figure 3.6. Extrait de la fiche météorologique pour la ville de Bordeaux. 100
Figure 3.7. Extrait du code de modélisation en MATLAB. 101
Figure 3.8. Tableau de résultats de l'évaluation des indicateurs de performance énergétique du bâtiment. 103
Figure 3.9. Exemples des courbes d'évolution d'indicateurs et de graphes de type « radar ». 104

Figure 3.10. Tableau montrant le découpage détaillé par type de poste de consommation d'énergie et par type de processus du cycle de vie. 105
Figure 4.1. L'angle d'orientation du bâtiment par rapport au sud. 111
Figure 4.2. Positionnement du choix de l'orientation du bâtiment selon la logique de progression de décisions proposée. 112
Figure 4.3. Variation en pourcentage de tous les indicateurs de performance pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation. 112
Figure 4.4. Variation en pourcentage des indicateurs environnementaux pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation pour valeurs entre -30° et 30°. 114
Figure 4.5. Variation en pourcentage des indicateurs économiques pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation pour valeurs entre -30° et 30°. 115
Figure 4.6. Variation en pourcentage des indicateurs de confort des usagers pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation. 116
Figure 4.7. Positionnement du choix du taux de vitrage des façades du bâtiment selon la logique de progression de décisions proposée. 117
Figure 4.8. Variation en pourcentage des indicateurs environnementaux en fonction du taux de vitrage de la façade sud. 118
Figure 4.9. Variation en pourcentage des indicateurs économiques en fonction du taux de vitrage de la façade sud. 119
Figure 4.10. Variation en pourcentage des indicateurs de confort des usagers en fonction du taux de vitrage de la façade sud. 120
Figure 4.11. Positionnement du choix de la présence d'une façade double peau vitrée selon la logique de progression de décisions proposée. 121
Figure 4.12. Variation en pourcentage des indicateurs de performance dû à la présence de la configuration de base de la façade double peau vitrée. 122
Figure 4.13. Positionnement des choix de conception du scénario de conception d'une façade double peau vitrée selon la logique de progression de décisions proposée. 124
Figure 4.14. Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction du type de vitrage de la façade double peau vitrée. 125
Figure 4.15. Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air entre façades. 127
Figure 4.16. Façade double peau vitrée du siège du journal « Le Monde » à Paris. 127
Figure 4.17. Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction du pourcentage d'ouverture de la façade vitrée. 129

Figure 4.18. Comparaison en variation en pourcentage des indicateurs de performance entre la configuration de façade double peau vitrée de base et son adaptation au contexte de l'exemple du scenario de conception. 130
Figure 4.19. Chantier d'une façade double peau vitrée dans le campus de l'Université de Bordeaux. 132
Figure A.1. Bilan thermique du nœud représentant l'air à l'intérieur de la zone thermique. 155
Figure A.2. Répartition de la puissance thermique solaire entrant dans l'espace. 159
Figure A.3. Bilan thermique du nœud représentant la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique. 162
Figure A.4. Succession de couches de matériaux composant une paroi opaque, énumérées de l'extérieur à l'intérieur de l'espace. 163
Figure A.5. Bilan thermique du nœud représentant la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique. 166
Figure A.6. Echanges thermiques du nœud représentant l'air à l'intérieur de l'espace tampon. 169
Figure A.7. Comportement du ratio surfacique fermeture des protections solaires de type store enroulable en fonction du flux thermique solaire surfacique. 175
Figure A.8. Comportement du ratio surfacique fermeture des protections solaires de type store vénitien extérieur en fonction du flux thermique solaire surfacique. 176
Figure A.9. Schéma d'une pompe à chaleur en mode chauffage. 179
Figure A.10. Schéma d'une pompe à chaleur en mode refroidissement. 181
Figure A.11. Correction des valeurs de rayonnement solaire due à une variation de l'angle d'orientation du bâtiment. 188
Figure B.1. Structure des tableaux de la logique de progression des décisions de conception. 207

Table des tableaux

Tableau 2.1. Critères et indicateurs environnementaux sélectionnés. 40
Tableau 2.2. Critère et indicateurs économiques sélectionnés. 42
Tableau 2.3. Critère et indicateur de confort hygrothermique sélectionnés. 44
Tableau 2.4. Critère et indicateur de confort visuel sélectionnés. 45
Tableau 2.5. Critère et indicateur de confort acoustique sélectionnés. 46
Tableau 2.6. Critère et indicateur de qualité de l'air intérieur sélectionnés. 47
Tableau 2.7. Eléments du bâtiment considérés dans le périmètre d'analyse des produits de construction et leur décomposition en composants de construction. 52
Tableau 2.8. Postes de consommation énergétique et leurs équipements techniques associés. 54
Tableau 2.9. Catégories de niveaux de confort en qualité d'air (adapté de la norme EN 15251). 75
Tableau 2.10. Données environnementales pour les produits de construction. 76
Tableau 2.11. Données environnementales pour les ressources énergétiques. 77
Tableau 2.12. Données techniques pour les différentes catégories de produits de construction. 79
Tableau 2.13. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Géométrie » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment. 84
Tableau 2.14. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Enveloppe » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment. 85
Tableau 2.15. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Matériaux » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment. 85
Tableau 2.16. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Systèmes » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment. 85
Tableau 2.17. Décisions de conception à prendre dans la phase d'Avant-Projet Sommaire en fonction du type d'élément du bâtiment. 87
Tableau 2.18. Décisions de conception à prendre dans la phase d'Avant-projet Détaillé en fonction du type d'élément du bâtiment. 88
Tableau 2.19. Valeurs des décisions de conception décrivant les dispositions architecturales de la configuration du bâtiment de base. 89
Tableau 2.20. Valeurs des décisions de conception décrivant les systèmes techniques de la configuration du bâtiment de base. 89
Tableau 2.21. Valeurs des décisions de conception décrivant la configuration de base pour la façade double peau vitrée. 90

Tableau 2.22. Phasage des décisions de conception pour le niveau d'isolation thermique des murs de l'enveloppe du bâtiment. 90
Tableau 3.1. Liste de produits de construction et de ressources énergétiques dans la base de données de l'outil d'évaluation..... 98
Tableau 4.1. Choix de conception à considérer pour la sous-phase « Géométrie » de la phase d'Esquisse. 108
Tableau 4.2. Paramètres de simulation considérés pour l'évaluation de la configuration du bâtiment de base. 109
Tableau 4.3. Evaluation des indicateurs environnementaux de la configuration de bâtiment de base. 109
Tableau 4.4. Evaluation des indicateurs économiques de la configuration de bâtiment de base..... 109
Tableau 4.5. Evaluation des indicateurs de confort des usagers de la configuration de bâtiment de base. 110
Tableau A.1. Coefficients d'échange thermique par convection et rayonnement en fonction du type de paroi et de son inclination (adapté de NREL, 1995) 156
Tableau A.2. Coefficients linéiques des ponts thermiques selon leur type et le positionnement de l'isolation thermique (adapté de CSTB, 2000)..... 157
Tableau A.3. Coefficients d'absorptivité selon le type de paroi opaque. 160
Tableau A.4. Nombre maximal de couches de matériaux à considérer par type de paroi opaque.... 163
Tableau A.5. Valeurs du ratio surfacique de fermeture de référence et du seuil du flux solaire thermique surfacique pour les protections solaires de type store enroulable..... 175
Tableau A.6. Valeurs des limites supérieure et inférieure du ratio surfacique de fermeture de référence pour les protections solaires de type store vénitiens extérieur. 176
Tableau A.7. Coefficients utilisés pour le calcul du rendement du système de production de chaleur de type chaudière au gaz et au fioul à condensation. 178
Tableau A.8. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-air en mode chauffage. 180
Tableau A.9. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-eau en mode chauffage. 180
Tableau A.10. Matrice de performances d'une pompe à chaleur eau-eau en mode chauffage. 180
Tableau A.11. Températures des sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode chauffage en fonction de leur type. 181
Tableau A.12. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-air en mode refroidissement. . 182
Tableau A.13. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-eau en mode refroidissement. 182
Tableau A.14. Matrice de performances d'une pompe à chaleur eau-eau en mode refroidissement. 182

Tableau A.15. Températures des sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode refroidissement en fonction de leur type. 183
Tableau A.16. Facteur de puissance électrique du système de ventilation par unité de volume d'air et par heure selon le type de système de ventilation. 184
Tableau A.17. Scénario de densité d'occupation des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine. 186
Tableau A.18. Scénario de densité d'occupation des espaces de salles de réunion pour une journée pendant la semaine. 186
Tableau A.19. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine. 186
Tableau A.20. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des salles de réunion pour une journée pendant la semaine. 186
Tableau A.21. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des circulations pour une journée pendant la semaine. 187
Tableau A.22. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine. 187
Tableau A.23. Décomposition des éléments du bâtiment en produits de construction et leurs unités fonctionnelles. 195
Tableau A.24. Types d'énergie finale considérés selon le poste énergétique. 196
Tableau A.25. Loi de masse expérimentale pour le calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique global vis-à-vis d'un bruit de route (adapté de Qualitel, 2012). 204
Tableau C.1. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des vitrages. 212
Tableau C.2. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des vitrages. 212
Tableau C.3. Paramètres techniques caractérisant les vitrages. 213
Tableau C.4. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des menuiseries. 214
Tableau C.5. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des menuiseries et de la structure porteuse de la façade vitrée. 214
Tableau C.6. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des matériaux structurels et d'isolation thermique. 215
Tableau C.7. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts de matériaux structurels et d'isolation thermique. 216
Tableau C.8. Paramètres techniques caractérisant les matériaux structurels. 216
Tableau C.9. Paramètres techniques caractérisant les isolants thermiques. 216

Tableau C.10. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des protections solaires. 217
Tableau C.11. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des protections solaires. 217
Tableau C.12. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des systèmes techniques. 218
Tableau C.13. Noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des systèmes techniques. 219
Tableau C.14. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des ressources énergétiques. 220
Tableau C.15. Noms des classifications et dernières années de valeurs disponibles dans la base Pégase pour les coûts des ressources énergétiques. 220

Introduction générale

La conception énergétique des bâtiments peut être définie comme la prise de décisions pour le choix et le dimensionnement des éléments des ouvrages ayant une influence déterminante sur leur performance énergétique. Les conditions spécifiques de réalisation et l'hétérogénéité des critères de conception font de chaque bâtiment un cas différent : il n'y a pas de formule qui fonctionne pour toutes les situations possibles. Afin de simplifier sa tâche, le concepteur, à travers son expertise et son expérience, propose des solutions validées dans d'autres réalisations et les adapte au contexte du projet. Néanmoins, les exigences croissantes en termes de performance énergétique poussent la conception de bâtiments au-delà des solutions habituelles, en rendant le travail du concepteur de plus en plus complexe. Le concepteur peut alors s'appuyer sur des outils d'aide à la décision, qui lui proposent des éléments pertinents pour guider sa prise de décisions.

Le cadre général du présent travail concerne le développement d'une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments de bureaux durables dans les premières phases d'un projet de construction.

Contexte de la recherche

Le secteur du bâtiment est caractérisé par des taux élevés de consommation d'énergie et d'impacts sur l'environnement. En 2010, le parc immobilier a été responsable de 40% de la consommation d'énergie finale et de 36% des émissions de dioxyde de carbone de l'Union Européenne (Commission Européenne, 2013). En France, ces chiffres s'élèvent respectivement à 44.5% et 23% pour l'année 2013 (ADEME, 2013). Ce secteur représente ainsi un levier d'action critique pour diminuer notre impact sur l'environnement.

Un grand nombre d'initiatives nationales et internationales, telles que la Réglementation Thermique française (MEEDDM, 2010) et la Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (Parlement européen, 2002 ; Parlement européen, 2010), vise actuellement à réduire la consommation d'énergie des bâtiments pendant leur phase d'exploitation. Néanmoins, le fait de se concentrer uniquement sur cet aspect du bâtiment peut entraîner la dégradation des conditions de confort des occupants ainsi que l'augmentation de l'investissement initial et des impacts environnementaux dus aux produits de construction.

Une vision holistique et intégrale est donc nécessaire pour encadrer la prise de décisions dans la conception énergétique des bâtiments. Ces dernières années, il y a un intérêt croissant pour l'étude de la nature multidimensionnelle des impacts liés aux bâtiments à travers le concept de la durabilité. La prise en compte des trois dimensions fondamentales du développement durable (économique, écologique et sociale) permet de couvrir tous les aspects de la performance énergétique des ouvrages (ISO/TC 59, 2008).

La prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments est répartie au long d'un processus structuré en plusieurs étapes. Le niveau de précision des décisions évolue dans ce processus, du général au spécifique : du choix de la stratégie énergétique du projet au dimensionnement des composants individuels. Egalement, le potentiel d'impact des décisions évolue au long de cette démarche, les étapes le plus en amont du processus étant déterminantes pour la performance du projet. Cependant, ces étapes sont caractérisées par une disponibilité très limitée d'informations, ce qui complique l'évaluation des performances du bâtiment dans son ensemble.

Différents outils et méthodologies sont proposés dans la littérature pour aider à la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments. Toutefois, nous constatons un manque d'outils adaptés aux premières phases de projet et qui intègrent les trois dimensions de la durabilité. L'enjeu du présent travail est alors de proposer au concepteur une telle méthodologie pour guider sa prise de décisions afin d'assurer une bonne performance énergétique du bâtiment.

Problématique de recherche

Il s'agit de résoudre le problème de la prise de décisions dans la conception énergétique des bâtiments par la mise en place d'une méthodologie basée sur l'évaluation de la performance énergétique et sur la progression de la connaissance dans le processus de conception.

La première problématique du travail concerne la définition et l'évaluation de la performance énergétique dans le contexte de la conception de bâtiments durables. L'évaluation de la performance énergétique uniquement par la consommation d'énergie dans la phase d'exploitation ignore d'autres aspects de la vie du bâtiment qui deviennent de plus en plus importants dans une démarche de conception durable. Dans ce travail nous proposons d'élargir le concept de la performance énergétique à tous les aspects du bâtiment impactés par les décisions associées à la conception énergétique. Ainsi, une vision holistique et quantitative basée sur l'évaluation d'indicateurs de performance couvrant les trois dimensions de la durabilité a été retenue.

La deuxième problématique concerne le niveau de précision de la connaissance du bâtiment lors des premières phases de conception. L'impact des décisions prises au long de ces phases est tributaire du niveau limité d'information disponible. La connaissance du bâtiment, pilotée par la prise de décisions de conception, évolue à chaque étape du processus. Dans ce travail nous proposons d'intégrer cet avancement de la connaissance à la démarche de conception de deux manières différentes. D'une part, la méthode proposée d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment est adaptée au niveau limité de précision dans la déclaration du bâtiment. D'autre part, une logique de progression de décisions de conception est proposée afin de permettre au concepteur d'explorer de manière échelonnée l'espace de décision associé à chaque étape du processus, en structurant sa démarche de prise de décisions.

Ainsi, dans le présent travail nous avons développé une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments durables au long des premières phases d'un projet de construction.

Apports de la thèse

Pour répondre à ces deux problématiques, nous proposons une méthodologie d'aide qui permet d'encadrer la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments. Cette méthodologie est destinée à être utilisée par la maîtrise d'œuvre d'un projet de construction, y compris architectes et bureaux d'études concernés par la performance énergétique, pour la conception de bâtiments de bureaux dans un contexte français.

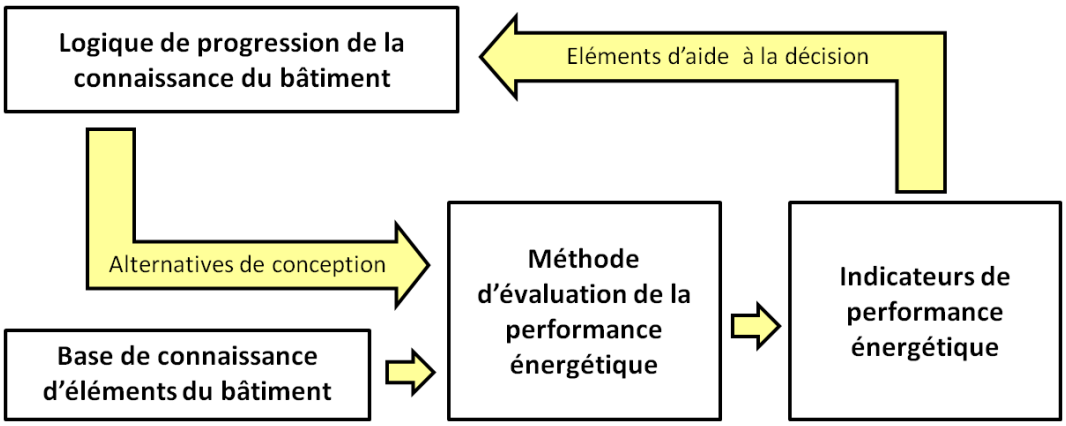

Figure 0.1. Logique de la méthodologie d'aide à la décision proposée dans ce travail.

Comme montré dans la figure 0.1, la méthodologie proposée est composée de plusieurs modules :

- Une base de seize indicateurs caractérisant la conception du bâtiment vu de sa performance énergétique, couvrant les trois dimensions du concept de la durabilité et suivant une approche de type cycle de vie.
- Une méthode d'évaluation de ces indicateurs adaptée au niveau de précision de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de projet.
- Une logique de progression des décisions de conception donnée comme un modèle de répartition séquentielle des choix à effectuer à chaque phase de projet. Cette logique s'appuie sur une configuration de bâtiment de base, représentant des valeurs à considérer par défaut pour les choix qui n'ont pas encore été décidés dans une phase donnée.
- Une base de connaissance d'éléments du bâtiment comprenant les données techniques, environnementales et économiques nécessaires pour la méthode d'évaluation.

Cette méthodologie est implémentée dans un outil numérique d'aide à la décision, qui intègre des bases de données, un moteur de calcul des indicateurs de performances ainsi que des interfaces d'entrée de données et d'exploitation de résultats.

Organisation du document

Les travaux de cette thèse seront discutés au long de 4 chapitres.

Le premier chapitre pose les bases des deux points de départ de ce travail : l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment et la progression de la connaissance au long du processus de conception. Dans une première section de cette étude de l'état de l'art, les approches les plus répandues pour l'analyse de la performance énergétique seront présentées afin d'identifier leurs critères d'évaluation, leur périmètre d'analyse et leurs méthodes de calcul. Dans une deuxième section, l'importance de la prise de décision dans les premières phases de conception sera discutée, suivie de la description du processus de conception des bâtiments tel que décrit par le cadre normatif français. Enfin, les tendances actuelles en termes d'exigences de performance et la mise en place de systèmes énergétiques innovants seront discutées.

Le deuxième chapitre propose une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments durables dans les premières phases de projet. Dans un premier temps, les principes de la démarche d'évaluation proposée seront décrits, y compris la sélection des indicateurs pour caractériser la performance énergétique du bâtiment ainsi que leurs modèles de calcul. La structure d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment sera également présentée, en décrivant les types d'éléments à documenter et les possibles sources de données pour son remplissage. Dans un deuxième temps, une logique de progression de la connaissance du bâtiment est proposée afin d'encadrer la prise de décisions tout au long des trois premières phases de conception : phase d'Esquisse, phase d'Avant-Projet Sommaire et phase d'Avant-Projet Détaillé. Cette logique de progression est fondée sur la prise en compte d'une configuration de bâtiment de base, qui sera également définie dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente l'outil numérique d'aide à la décision construit à partir de la méthodologie proposée dans ce travail. Les bases de données construites selon la structure de la base de connaissance d'éléments du bâtiment seront présentées, ainsi que le principe d'opération du moteur de calcul des indicateurs de performance énergétique. En outre, les interfaces d'entrée de données et d'exploitation de résultats sont discutées en détail afin d'illustrer la démarche d'utilisation de l'outil numérique.

Dans le quatrième chapitre, l'intérêt de la mise en œuvre de la méthodologie est validé par divers cas d'étude à chaque stade du processus de conception : de la phase d'Esquisse à la phase d'Avant-Projet Détaillé. En particulier, l'intégration d'une façade double peau vitrée, un système énergétique innovant dont l'impact sur la performance du bâtiment est encore peu maîtrisé, a été évaluée.

Chapitre 1 Projet de conception du bâtiment : Etat de l'art

L'objectif du présent travail est de proposer une méthodologie pour l'aide dans la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments de bureaux durables au long des premières phases d'un projet de construction. Afin d'identifier les points de départ possibles pour le développement de cette méthodologie, une étude bibliographique sera présentée dans ce premier chapitre sur les deux sujets fondamentaux de ce travail :

- L'évaluation de la performance énergétique du bâtiment : identification des critères et les indicateurs utilisés pour caractériser un ouvrage du point de vue énergétique, ainsi que leurs modèles et hypothèses de calcul.
- La progression de la connaissance dans la définition du bâtiment au long du processus de conception : description des phases structurant un projet de conception d'un bâtiment et leur relation avec le niveau de précision des décisions à prendre.

De cette manière, dans un premier temps, une vision générale de différentes approches proposées dans la littérature pour l'analyse de la performance énergétique du bâtiment sera présentée. Ces approches comprennent les certifications environnementales, les initiatives collaboratives internationales et les outils d'aide à la décision pour la conception énergétique. Dans cette section, le concept de la performance énergétique dans le contexte d'un projet de construction sera introduit, suivi d'une présentation des aspects du bâtiment qui ont une influence déterminante sur cette performance. Ensuite, l'impact de la progression de la connaissance du bâtiment au long de son processus de conception sera discuté, en mettant l'accent sur la prise de décisions influant sur sa performance énergétique. Cette progression de l'information sera étudiée à travers le cadre normatif français, en considérant les nouvelles tendances dans l'industrie du bâtiment.

1.1. Analyse de la performance énergétique du bâtiment

Après la définition des objectifs de l'étude, une des premières étapes dans la construction d'une méthode d'évaluation est la définition des critères à analyser. Dans le cas de la présente méthode d'évaluation, ces critères sont donnés par les indicateurs qui permettront de caractériser la performance énergétique d'une configuration de conception de bâtiment. Afin de pouvoir identifier les indicateurs les plus adaptés aux objectifs de ce travail, une étude couvrant différentes approches utilisées pour l'évaluation de la performance énergétique est proposée dans cette section.

Avant d'entrer dans ce sujet, il faut, dans un premier temps, définir ce que l'on entend par concept de performance énergétique du bâtiment, ainsi que la vision du bâtiment décrivant les aspects de l'ouvrage qui interviennent dans son analyse.

1.1.1. Le bâtiment et sa performance énergétique

Au sens commun, le bâtiment peut être défini comme une construction humaine destinée à protéger les personnes, les biens et les activités des intempéries. De manière plus particulière dans le contexte de ce travail, la directive européenne 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments décrit le bâtiment comme une construction dotée d'un toit et de murs, dans laquelle de l'énergie est utilisée pour réguler le climat intérieur (Parlement européen, 2010).

Inscrite dans le cadre des objectifs en matière d'efficacité énergétique de l'Union Européenne à l'horizon 2020, cette directive vise à promouvoir la performance énergétique des bâtiments en renforçant les dispositions de l'ancienne directive 2002/91/CE (Parlement européen, 2002). Ceci est fait par la mise en place de niveaux d'exigences minimales à adopter par les états membres en termes de performance énergétique. Ces niveaux d'exigences sont définis à partir d'une méthodologie commune de calcul permettant de déterminer l'équilibre optimal en fonction des coûts entre les investissements et les dépenses énergétiques économisées sur toute la durée de vie du bâtiment.

Cette directive définit la performance énergétique d'un bâtiment comme la quantité d'énergie nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut l'énergie utilisée par ses systèmes techniques. Les systèmes techniques représentant les sources de consommation énergétique à considérer selon la directive européenne sont définis par la figure 1.1.

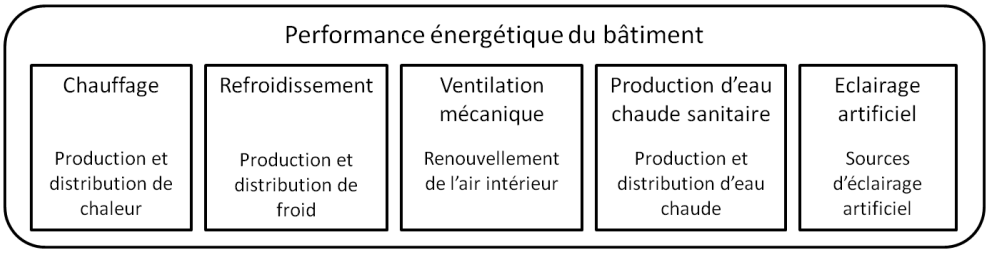

Figure 1.1. Sources de consommation énergétique à considérer dans le calcul de la performance énergétique d'un bâtiment selon la directive européenne 2010/31/UE.

Autrement dit, cette directive définit la performance énergétique du bâtiment comme la consommation d'énergie associée aux postes communément appelés « réglementaires », puisqu'ils composent la base du calcul réglementaire. En France cela correspond à la Réglementation Thermique, actuellement dans son édition 2012, qui fixe des exigences techniques en matière de consommation énergétique pour la construction de bâtiments neufs et la rénovation de bâtiments existants (MEEDDM, 2010).

D'autres types de postes de consommation d'énergie peuvent être identifiés, tels que des équipements comme les ascenseurs ou les appareils électroménagers. Néanmoins, ces postes ne font pas partie du calcul réglementaire et pour cela ne seront pas pris en compte dans ce travail.

Un bâtiment peut être défini du point de vue énergétique par les aspects ayant une influence déterminante sur les consommations d'énergie décrivant sa performance énergétique. De manière générale, quatre types d'aspects de la composition d'un bâtiment peuvent être identifiés :

- Géométrie : Eléments géométriques et organisationnels du bâtiment, y compris les dimensions du bâti, sa relation avec l'environnement et la répartition des espaces intérieurs.
- Enveloppe : Eléments associés aux échanges avec l'extérieur, y compris les pertes thermiques et les apports solaires. Les éléments du bâtiment concernés sont les murs et baies vitrées des façades, le toit et le plancher bas.
- Matériaux : Eléments associés à l'inertie thermique du bâtiment. Les éléments concernés sont principalement les planchers intermédiaires et les cloisons verticales.
- Systèmes : Eléments associés aux équipements techniques du bâtiment, y compris les systèmes de ventilation, d'éclairage, de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude.

Ces aspects du bâtiment peuvent influer sur sa performance énergétique de deux manières différentes. D'une part, les trois premiers aspects (Géométrie, Enveloppe et Matériaux) déterminent les besoins énergétiques du bâtiment, par exemple les besoins thermiques de chauffage ou les débits de renouvellement d'air. D'autre part, le quatrième aspect (Systèmes) permet de répondre à ces besoins à travers d'une consommation d'énergie, par exemple par l'utilisation d'une chaudière à gaz ou d'un système de ventilation mécanique.

Ces quatre aspects peuvent être définis en fonction des éléments du bâtiment les décrivant. La figure 1.2 montre les éléments principaux du bâtiment qui interviennent dans la détermination de sa performance énergétique. Ainsi, la conception énergétique peut être définie comme la sélection et le dimensionnement des éléments du bâtiment influant sur la consommation d'énergie des postes réglementaires.

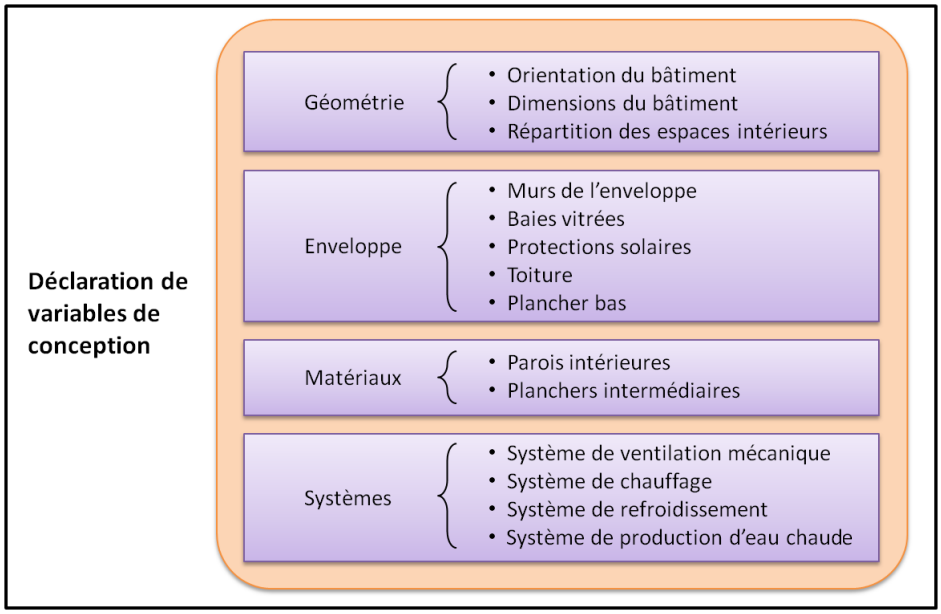

Figure 1.2. Décomposition des éléments du bâtiment du point de vue énergétique.

En plus des éléments mentionnés ci-dessus, d'autres éléments constituant le bâtiment peuvent être également identifiés. C'est le cas, par exemple, d'autres composants de structure verticaux comme des piliers, les réseaux de distribution d'eau et d'électricité ainsi que les équipements sanitaires ou de sécurité. Ces éléments ne répondent qu'aux exigences structurelles et fonctionnelles du bâtiment et ne sont pas normalement considérés dans la détermination de la performance énergétique du bâtiment en raison de leur influence négligeable.

1.1.2. Méthodes d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment

Dans cette section, une étude bibliographique est présentée sur les différentes approches les plus répandues et pertinentes pour l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment. Elle permet d'identifier les critères et indicateurs pris en compte par ces méthodes pour caractériser la performance énergétique du bâtiment et d'étudier leur pertinence pour l'aide à la prise de décision dans les premières phases de conception d'un bâtiment.

Trois types de méthodes d'évaluation seront présentés dans cette section :

- Les certifications environnementales, actuellement ce sont les outils les plus répandus pour améliorer la qualité environnementale des ouvrages de construction.
- Les initiatives collaboratives internationales, représentant l'état de l'art dans l'étude de la performance durable des bâtiments.
- Les outils d'aide à la décision pour la conception énergétique des bâtiments, ce sont des approches opérationnelles pour proposer au concepteur des éléments de décision.

1.1.2.1. Certifications environnementales

Outre les exigences réglementaires, les démarches de certification environnementale représentent les instruments les plus couramment utilisés pour promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. En termes généraux, les certifications environnementales sont définies comme une série d'exigences couvrant plusieurs aspects de l'ouvrage qui permettent de guider le concepteur vers une démarche d'amélioration de la qualité du bâtiment. Elles sont normalement proposées par un organisme certificateur reconnu selon le type de projet d'ouvrage : pour les bâtiments neufs, en exploitation ou en rénovation.

Un grand nombre de certifications environnementales est proposé au niveau international. En France, les trois certifications de référence dans le contexte des bâtiments tertiaires sont (Green Soluce, 2014) :

- La méthode de certification britannique BRE « Environmental Assessment Methodology » (BREEAM), proposée par le Building Research Establishment (BRE) depuis 1990. Etant la certification la plus ancienne et la plus utilisée à travers le monde, ce référentiel évolue

régulièrement pour prendre en compte les évolutions de la réglementation. Les exigences de cette certification sont regroupées en dix catégories associées à la qualité environnementale du bâtiment (BRE, 2014). Un certain nombre de crédits et une pondération spécifique sont alloués à chaque catégorie, permettant au projet de cumuler des points pour atteindre un des 5 niveaux de certification : Passable, Bon, Très Bon, Excellent ou Exceptionnel.

- Le système de certification d'origine américaine « Leadership in Energy and Environmental Design » (LEED), proposé par le Green Building Council depuis 1998. Initialement créée pour son application dans les bâtiments publics américains, cette certification a évolué vers l'international et représente dans l'actualité la deuxième la plus répandue dans le monde. Suivant une démarche similaire à celle de la certification BREEAM, la méthode LEED propose quatre niveaux de certification à atteindre (Certifié, Argent, Or et Platine) par l'assignation de crédits optionnels répartis en sept catégories d'exigences (USGBC, 2013).
- La Démarche « Haute Qualité Environnementale » (HQE), proposée à partir de 2005 pour les bâtiments non-résidentiels par l'organisme de certification Certivéa, une filiale du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Initialement développée par l'Association HQE, cette certification est composée de quatorze cibles réparties en quatre catégories : Eco-construction, Eco-gestion, Confort et Santé. Chaque cible peut être évaluée selon trois niveaux : Très performant, performant et de base. Pour être certifié, un projet de construction doit atteindre au minimum sept cibles au niveau de base, quatre au niveau performant et trois cibles au niveau très performant (Certivéa, 2011).

Les différentes catégories regroupant les critères d'évaluation de ces trois méthodes de certification environnementale sont montrées dans la figure 1.3.

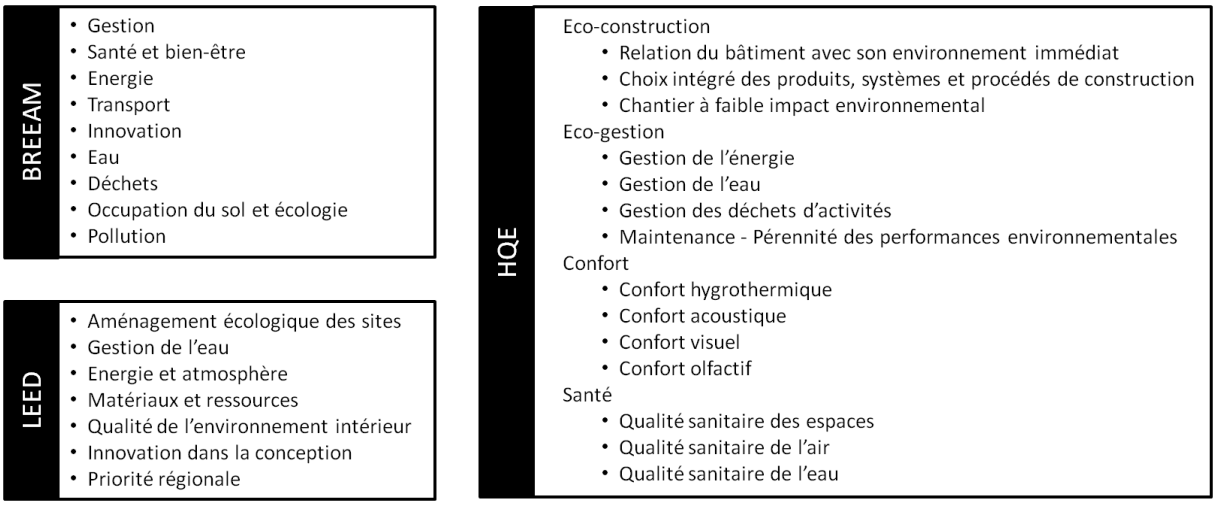

Figure 1.3. Catégories des critères des certifications environnementales BREEAM, LEED et HQE.

Chacune de ces trois certifications évalue la performance énergétique du bâtiment suivant une méthode différente :

- La certification BREEAM la caractérise par un « taux de performance énergétique », calculé en fonction de la demande énergétique en phase d'exploitation, de la consommation d'énergie primaire et des émissions de dioxyde de carbone du bâtiment.
- La certification LEED la caractérise par la réduction des coûts des consommations énergétiques des postes réglementaires et non-réglementaires par rapport à un niveau d'efficacité énergétique de référence.
- La Démarche HQE reprend deux indicateurs de la réglementation thermique française, le coefficient de demande énergétique BBIO et la consommation d'énergie primaire, et ajoute l'émission de trois types de polluants : le dioxyde de carbone, le dioxyde de souffre et les déchets radioactifs.

Néanmoins, les certifications environnementales ne se limitent pas à l'étude de la performance énergétique du bâtiment, mais elles l'évaluent par une description plus complète de sa qualité environnementale. Comme il peut être observé dans la figure 1.3, les catégories de critères décrivant cette vision couvrent une grande variété d'aspects de la qualité de conception du bâtiment, parmi lesquels se trouvent :

- Des critères sociaux
- Des critères environnementaux
- Des critères économiques
- Des critères techniques et fonctionnels
- Des critères associés à la qualité du processus
- Des critères associés à la sélection du site

Les trois premières catégories de critères mentionnées représentent les principes du développement durable ou, plus spécifiquement, les trois dimensions du concept de la durabilité comme montrées dans la figure 1.4. La prise en compte de la durabilité dans les bâtiments a pour objectif de permettre d'atteindre les performances et les fonctionnalités attendues avec le moins d'effets négatifs possibles sur l'environnement, tout en encourageant l'amélioration des aspects économiques et sociaux (ISO/TC 59, 2008). L'évaluation de la qualité de conception d'un ouvrage à travers l'application du concept de la durabilité au bâtiment est la base des initiatives collaboratives internationales, qui seront traitées dans la section suivante.

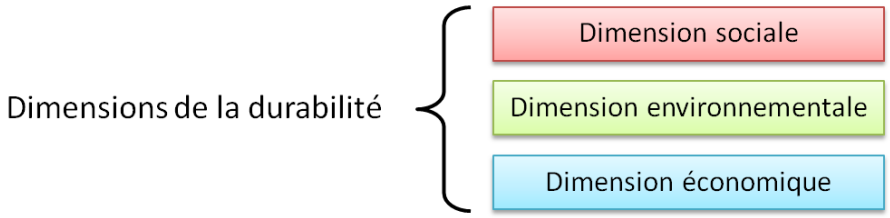

Figure 1.4. Les trois dimensions du concept de la durabilité.

En ce qui concerne la définition du périmètre d'analyse de l'évaluation, les trois certifications environnementales coïncident sur l'essentiel dans leurs approches. D'une part, les frontières du

système étudié ne se limitent pas au bâtiment mais comprennent aussi la situation de la parcelle où il est bâti ainsi que les liens fonctionnels de l'ouvrage avec son environnement immédiat. Quelques exemples des critères traitant ces éléments sont l'aménagement des sites et l'accès aux infrastructures de transport. D'autre part, l'évaluation de la qualité de l'ouvrage est fondée principalement sur l'étude des phases de chantier et d'exploitation ou occupation du bâtiment. D'autres étapes du cycle de vie du bâtiment, notamment la fabrication des produits de construction et la fin de vie de l'ouvrage, sont traitées dans les certifications de manière limitée ou peu détaillée.

Les exigences imposées par les certifications environnementales sont à intégrer dans le processus de conception dès les premières phases de conception, afin d'encadrer la définition d'objectifs à atteindre en termes de qualité du bâtiment. Néanmoins, l'évaluation proposée par ces outils ne peut avoir lieu que vers la fin du processus de conception, à cause de la quantité et de la précision des données d'entrée nécessaires. Ceci limite la contribution des certifications à la prise de décisions la réduisant à une simple vérification de conformité aux exigences spécifiées dans leurs référentiels.

En termes généraux, deux types d'exigences peuvent être identifiées dans les certifications environnementales ici analysées :

- Des niveaux minimaux de performance à atteindre pour des indicateurs quantitatifs caractérisant un aspect de l'ouvrage, à justifier à partir de résultats de calculs suite à la modélisation du projet de construction.
- La déclaration d'une disposition de moyens à mettre en œuvre dans l'ouvrage, dont plusieurs formes sont possibles : des quantifications de besoins, des études de faisabilité, des listes et/ou justifications de solutions de construction, entre autres.

Les trois certifications environnementales ici présentées se fondent aujourd'hui pour l'essentiel sur des exigences de disposition de moyens. La prise en compte de ce type d'exigences est pertinente dans le cadre des certifications environnementales, où elles représentent des conditions à remplir pour atteindre une déclaration de conformité. Néanmoins, cette approche prédispose la mise en œuvre de stratégies caractérisées comme des « bonnes pratiques » de conception, qui varient d'une certification à l'autre en fonction de leurs visions et enjeux particuliers (SuPerBuildings Consortium, 2012). Ainsi, une approche basée sur l'autre type d'exigences, les indicateurs de performance de type quantitatif, semble plus pertinente pour l'aide à la prise de décisions.

Depuis leur conception, les référentiels des certifications environnementales sont en évolution continue, en intégrant les nouvelles tendances dans le secteur du bâtiment. Ceci est le cas notamment de la Démarche HQE, qui est actuellement dans une étape de changement de paradigme, en s'orientant vers une approche de type performancielle (Association HQE, 2014). Le développement du nouveau référentiel « HQE Performance » (HQEP), qui sera intégré progressivement à cette certification, implique 3 réorientations majeures dans l'approche de sa méthodologie d'évaluation :

- De la consommation d'énergie aux impacts environnementaux, par l'estimation du profil environnemental du bâtiment dans son ensemble suivant une approche de type cycle de vie.
- De la phase d'exploitation du bâtiment à toutes les phases de son cycle de vie, en intégrant les consommations d'énergie et la mise en œuvre de produits de construction tout au long de la durée de vie de l'ouvrage.

- De l'évaluation des moyens d'actions à celle des résultats, par la caractérisation de la performance du bâtiment à travers d'indicateurs quantitatifs couvrant les trois dimensions de la durabilité.

Cette évolution dans la méthodologie de la Démarche HQE s'aligne avec les conclusions des travaux internationaux de normalisation de critères d'évaluation de la performance de bâtiments durables, qui seront présentés dans la section suivante.

1.1.2.2. Initiatives collaboratives internationales

Issu d'un consensus scientifique entre les principaux acteurs du secteur du bâtiment aux niveaux européen et international, un certain nombre d'initiatives vise à normaliser la base de critères utilisés pour la caractérisation de la qualité de conception et la performance des bâtiments. Parmi ces initiatives internationales, cinq projets représentent actuellement l'état de l'art dans l'évaluation de la qualité de conception des bâtiments et seront présentés et discutés dans la présente section.

Afin de définir une méthodologie européenne commune et transparente d'évaluation des bâtiments, la Commission Européenne a financé une série de projets de collaboration de portée internationale. Parmi ces initiatives européennes, les trois projets les plus récents sont :

- SuPerBuildings – Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings (SuPerBuildings Consortium, 2012).
- OPEN HOUSE – Benchmarking and mainstreaming building sustainability on the EU based on transparency and openness from model to implementation (OPEN HOUSE, 2013).
- Perfection – Performance Indicators for Health, Comfort and Safety of the Indoor Environment (Perfection, 2010).

Ces trois projets sont les produits des collaborations entre une grande liste de partenaires européens, y compris centres de recherche, autorités gouvernementales et entreprises dans le secteur de l'énergie. Les projets ont partagé le même objectif principal : l'identification d'indicateurs de durabilité dans les bâtiments et la normalisation de leurs définitions et méthodes de calcul. Nonobstant, leurs différentes approches et leurs périmètres d'analyse permettent d'aborder la question de la caractérisation de la performance des bâtiments de différents points de vue. Les conclusions de ces travaux ont été proposées comme point de départ pour des nouvelles méthodologies dans l'analyse comparative et la certification de bâtiments au niveau européen.

Ces trois initiatives européennes sont fortement complémentaires. D'une part, les projets SuPerBuildings et OPEN HOUSE explorent les trois dimensions de la durabilité ainsi que d'autres aspects complémentaires. Leur considération permet donc de fournir une base complète de critères de performance. La principale différence entre ces deux projets est donnée par la démarche suivie pour l'identification de ces critères : SuPerBuildings suit une approche de type « top-down », en partant des problématiques générales de la construction (les dimensions de la durabilité) et en identifiant les mesures qui les caractérisent (indicateurs), tandis que OPEN HOUSE suit une approche de type « bottom-up », qui inversement part des mesures pertinentes et retrouve les problématiques associées. D'autre part, le projet Perfection se concentre uniquement sur les critères associés à la

qualité de l'environnement intérieur. Ceci permet une implication plus profonde de la dimension sociale, un aspect souvent ignoré hors le confort thermique des occupants.

Une autre initiative de portée internationale de grand intérêt est le projet collaboratif SBA Framework for Common Metrics (Sustainable Building Alliance, 2010). Actuellement en cours de développement par la Sustainable Building Alliance (SBA), ce projet vise à identifier des indicateurs qui soient communs aux principales méthodes d'évaluation actuellement en vigueur. Ceci afin de les utiliser pour l'évaluation, la classification et la comparaison de la performance des bâtiments au niveau international. En proposant un nombre concis d'indicateurs et en se concentrant sur les dimensions environnementale et sociale, ce projet présente un cadre simple mais pratique pour l'évaluation de la durabilité des bâtiments.

Le comité technique TC350 du Comité Européen de Normalisation (CEN) a été mis en place pour le développement d'une série de normes européennes traitant l'évaluation de la contribution de l'environnement bâti au développement durable. Les normes élaborées par ce comité technique fournissent un système européen d'évaluation des performances environnementales, sociales et économiques des bâtiments s'appuyant sur une vision de type cycle de vie. Le système proposé est décrit en deux parties :

- D'une part, la série de normes EN 15643 (CEN/TC 350, 2010-2012), qui fournissent le cadre méthodologique de l'évaluation, donnant les principes et les lignes directrices pour les trois dimensions de la durabilité.
- D'autre part, les normes EN 15978 (CEN/TC 350, 2012), EN 16309 (CEN/TC 350, 2011) et EN 16627 (CEN/TC 350, 2013), qui présentent les critères et indicateurs de performance également pour chacune des trois dimensions de la durabilité.

La norme EN 15978 et son complément EN 15804 sont de première importance. Elles définissent les méthodes d'évaluation des performances environnementales des bâtiments et des produits de construction. Ces documents normatifs ont récemment remplacé les normes XP P 01-020-3 et NF P 01-010, qui ont défini le format actuel des profils d'indicateurs environnementaux des produits de construction en France : les Fiches de Déclaration Environnemental et Sanitaire (FDES).

Un tableau récapitulatif des normes développées par le comité technique TC350 est donné dans la figure 1.5.

Cadre général	EN 15643-1		
Cadre spécifique	EN 15643-2	EN 15643-3	EN 15643-4
Méthodes de calcul	EN 15978 / XP P 01-020-3*	EN 16309	EN 16627
Déclarations de produits	EN 15804 / NF P 01-010*		
*Normes obsolètes	Dimension environnementale	Dimension sociale	Dimension économique

Figure 1.5. Liste des normes développées par le comité technique TC350 sur la contribution des ouvrages de l'environnement bâti au développement durable.

De manière générale, les cinq initiatives collaboratives présentées partagent trois principes fondamentaux dans leur vision de l'évaluation de la qualité de conception du bâtiment :

- Une quantification de performances, basée sur des indicateurs essentiellement quantitatifs caractérisant les résultats ou performances de l'ouvrage.
- L'application de la notion de la durabilité à l'évaluation du bâtiment, en associant chacune de ses dimensions à un aspect de la performance du bâtiment.
- Une approche de type « cycle de vie », en prenant en compte toutes les phases composant le cycle de vie d'un bâtiment.

Les catégories de critères des cinq projets internationaux sont montrées dans la figure 1.6, classées selon leur aspect de la performance du bâtiment.

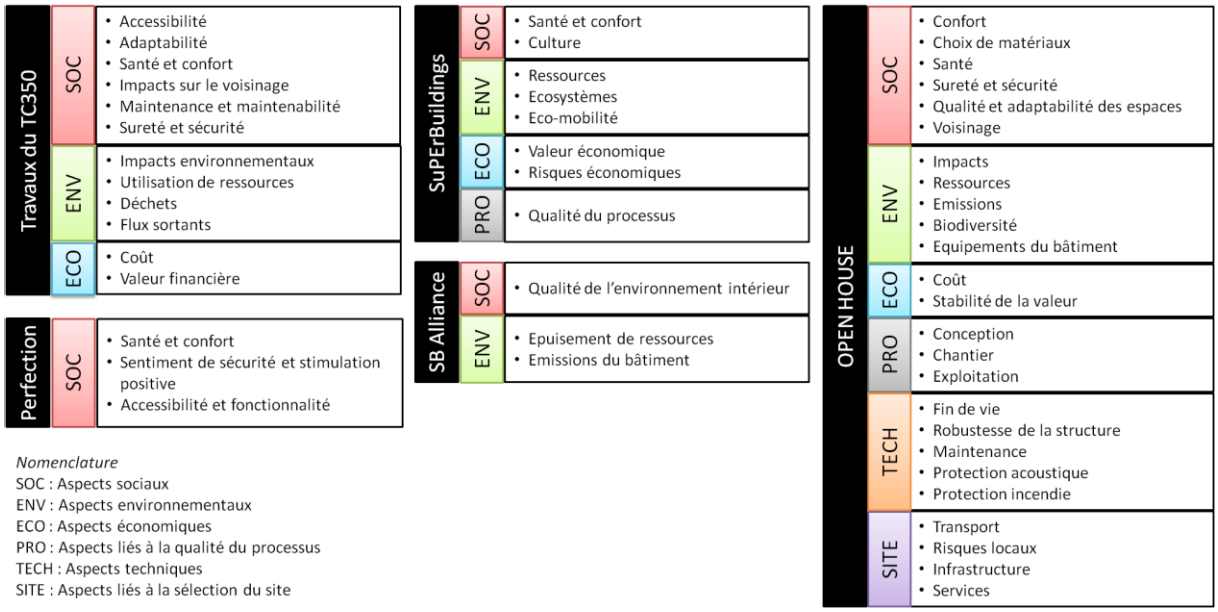

Figure 1.6. Catégories de critères des initiatives internationales collaboratives.

Les cinq projets ici présentés conviennent dans l'application de la notion de durabilité dans les bâtiments, en associant chacune des trois dimensions fondamentales à un aspect de performance :

- La dimension économique est caractérisée par le coût économique.
- La dimension environnementale est évaluée à travers la dégradation de l'environnement.
- La dimension sociale est représentée par le bien-être des occupants et leur interaction avec le bâtiment et son environnement.

Diverses sous-catégories de critères sont identifiées dans la dimension sociale, y compris la sécurité, l'adaptabilité, l'accessibilité ainsi que la santé et le confort des occupants.

Trois des initiatives collaboratives ici présentées offrent des éléments pour l'interprétation des résultats de l'évaluation. Les projets européens OPEN HOUSE et Perfection proposent un système de notation unique, calculée par l'agrégation des indicateurs calculés, en tenant compte de leurs

importances relatives. De son côté, le projet SuPerBuildings propose des consignes pour la définition de niveaux typiques de performance pour l'interprétation des résultats de l'évaluation. La difficulté de définir une valorisation standard pour l'agrégation des indicateurs ou d'établir des niveaux de référence valides dans tout contexte de conception est reconnue dans ces projets. En outre, le projet SuPerBuildings spécifie que, dans le cas particulier des architectes et concepteurs, la présentation favorisée des résultats de l'évaluation est au niveau des indicateurs individuels, sans aucune agrégation. Ainsi, l'interprétation des indicateurs individuels avec l'aide d'une référence adaptée au contexte particulier de chaque projet de construction se présente comme une approche pertinente dans l'aide à la prise de décisions de conception.

A l'exception des normes du comité technique TC350, les méthodes d'évaluation proposées par ces projets internationaux offrent la possibilité de réaliser l'évaluation dans deux moments différents dans la vie de l'ouvrage :

- Pendant la phase de conception, par la modélisation du bâtiment à travers des calculs simplifiés ou des simulations numériques.
- Lors de la phase d'exploitation, avec l'ouvrage terminé, à travers une campagne de mesures in situ des performances du bâtiment.

Le projet Perfection propose deux approches différentes dans l'évaluation pendant la phase de conception : une méthode simple, réalisée à partir d'une analyse qualitative des moyens à mettre en œuvre et une méthode détaillée, à partir d'une modélisation quantitative du bâtiment.

En général, la différentiation des approches d'évaluation selon la phase de vie du bâtiment permet de s'adapter au niveau de connaissance des caractéristiques du bâtiment et ainsi permet une évaluation plus pertinente des critères de performance. Cette approche pourrait être améliorée par une analyse plus granulaire de la phase de conception, comme proposée dans quelques outils d'aide à la décision, ce qui sera discuté dans la section suivante.

En ce qui concerne le périmètre d'analyse, la majorité de ces projets se concentrent sur l'analyse du bâtiment et sa parcelle, en mettant l'accent sur la prise en compte de la totalité de phases de vie de l'ouvrage. La prise en compte de la parcelle dans le périmètre d'analyse est pertinente pour la comparaison de projets de construction différents, ce qui est l'objectif de ces initiatives internationales. Néanmoins, cette approche nécessite une grande quantité de données d'entrée pour l'évaluation, ce qui pourrait limiter son intérêt auprès des concepteurs (Attia *et al.*, 2012). Une délimitation du périmètre d'analyse aux aspects les plus influents sur la performance du bâtiment, en fonction des objectifs de l'étude, semble plus pertinente pour l'aide à la prise de décisions dans la conception de bâtiments.

Il faut insister sur le fait que l'intérêt de l'application du concept de la durabilité dans les ouvrages de construction est associé à l'objectif d'atteindre les performances et fonctionnalités attendues avec le moins d'effets négatifs possibles sur l'environnement, tout en encourageant l'amélioration des aspects économiques et sociaux aux niveaux local, régional et mondial (ISO/TC59, 2008). Cette approche permet au concepteur d'avoir une vision holistique et intégrale de l'ouvrage de construction. Néanmoins, une partie significative des critères identifiés par ces travaux collaboratifs ne sont pas directement liés à la définition de la performance énergétique, et ainsi se montrent peu pertinents pour son évaluation. Ceci est le cas par exemple des aspects structuraux et

organisationnels du bâtiment. Ainsi, il faudrait adapter le choix des critères de performance pour caractériser la performance énergétique du bâtiment.

1.1.2.3. Outils d'évaluation dans la conception énergétique des bâtiments

Un grand nombre d'outils d'évaluation sont proposés dans la littérature pour aider à la prise de décisions dans la conception énergétique des bâtiments. L'objectif de ces outils est de proposer au concepteur des éléments de décision pour l'accompagner pendant le choix et le dimensionnement des éléments influençant la performance énergétique du bâtiment.

Parmi les outils d'évaluation actuellement disponibles dans la littérature, un certain nombre d'entre eux sont proposés pour aider à la prise de décisions dans les premières phases de conception des bâtiments. Afin d'identifier les catégories de critères d'évaluation utilisés par ces outils ainsi que les types d'éléments de décision qu'ils proposent, une sélection d'outils d'évaluation a été étudiée et sera présentée dans cette section.

Les outils d'évaluation ici présentés sont adaptés aux premières phases de conception de deux façons différentes :

- D'une part, par la mise en œuvre de méthodes de calcul simplifiées pour la modélisation du bâtiment, surtout par la considération d'hypothèses simplificatrices. Ceci résulte en des méthodes de calcul légères, qui permettent d'explorer l'espace de décision disponible dans ces premières phases de conception de manière rapide.
- D'autre part, par la simplification des données d'entrées nécessaires pour les alimenter, en les adaptant au niveau de précision de l'information disponible dans ces phases de conception.

La figure 1.7 montre un tableau récapitulatif des critères et éléments d'aide à la décision de la sélection d'outils d'évaluation utilisés dans les premières phases de la conception énergétique du bâtiment.

Comme il peut être observé dans la figure 1.7, aucun des outils d'évaluation considérés ne propose des indicateurs dans les trois dimensions de la durabilité en même temps. Ils sont en général limités à une ou deux dimensions, en s'appuyant de manière complémentaire sur des indicateurs énergétiques. La considération en parallèle des trois dimensions de la durabilité représente alors une opportunité potentielle pour le développement des outils d'évaluation dans le domaine de la conception énergétique de bâtiments.

Référence	Indicateurs sociaux	Indicateurs environnementaux	Indicateurs économiques	Indicateurs énergétiques	Indicateurs techniques	Elements d'aide à la décision
Itard, 2003						Indicateurs évalués
Nielsen, 2005						Indicateurs évalués
Wang *et al.* , 2005						Front de Pareto
Wahlström *et al.* , 2006						Note unique par agrégation
Ochoa *et al.* , 2009						Indicateurs évalués
Yezioro, 2009						Indicateurs évalués, propositions d'amélioration
da Silva *et al.* , 2010						Classement de solutions
Diakaki *et al.* , 2010						Indicateurs évalués, classement de solutions
Attia *et al.* , 2012						Indicateurs évalués, analyse de sensibilité
Granadeiro *et al* . 2013						Note unique par agrégation
Baek *et al.* , 2013						Indicateurs évalués
Hamdy *et al.* , 2013						Front de Pareto
Santos *et al.* , 2014						Indicateurs évalués

Figure 1.7. Critères et éléments d'aide à la décision des outils d'évaluation dans la conception énergétique du bâtiment.

Contrairement aux certifications environnementales et aux conclusions des initiatives internationales présentées précédemment, les outils de calcul proposent un nombre réduit d'indicateurs par catégorie de critères. Les indicateurs les plus employés pour caractériser ces catégories de critères sont :

- Indicateurs énergétiques : les deux indicateurs les plus courants sont les besoins thermiques de chauffage et/ou de refroidissement, et la consommation d'énergie primaire ou finale. Une autre approche identifiée est la quantification de l'exergie liée à l'opération des systèmes techniques de contrôle d'ambiance.
- Indicateurs sociaux : parmi les différents critères identifiés dans la dimension sociale, seulement des indicateurs associés au confort des occupants ont été identifiés. Le confort thermique est favorisé, avec une diversité d'indicateurs tels que la température d'air à l'intérieur des espaces, la période de confort thermique, le confort d'été et le pourcentage de personnes insatisfaites avec l'ambiance thermique. D'autres catégories de confort sont aussi considérées, telles que le confort visuel notamment avec le facteur de lumière du jour, et le confort acoustique avec l'isolement acoustique standardisé pondéré de la façade pour un bruit de trafic à l'émission.
- Indicateurs environnementaux : les indicateurs les plus favorisés dans cette catégorie sont les émissions de dioxyde de carbone ou des gaz à effet de serre en général. D'autres effets sur l'atmosphère comme l'acidification, l'eutrophisation et l'émission de particules fines ont été également identifiés.
- Indicateurs économiques : les indicateurs le plus courants sont le coût d'investissement, le coût global ou le coût de la mise en œuvre de stratégies d'économie d'énergie.
- Indicateurs techniques : ce type d'indicateurs a une influence sur les autres catégories de critères. Quelques exemples d'indicateurs techniques identifiés sont la puissance des systèmes techniques de chauffage et/ou refroidissement, la satisfaction des besoins thermiques de façon passive et la performance thermique de l'enveloppe.

Les éléments de décision que les outils peuvent proposer au concepteur prennent plusieurs formes :

- Les valeurs des indicateurs évalués, sous la forme de tableaux ou de graphes comparatifs.

- Une valeur unique calculée par l'agrégation des indicateurs en prenant compte de leurs importances relatives.
- Un front de Pareto d'alternatives de conception généré à travers un algorithme génétique.
- Un classement d'alternatives de conception en tenant compte de leurs importances relatives.
- La proposition de possibles améliorations à une alternative de conception.

Les outils d'évaluation ici présentés proposent au concepteur des éléments d'aide à la décision essentiellement par la comparaison des alternatives de conception, limitant le périmètre d'analyse aux éléments les plus influents sur la performance énergétique. Cette approche a l'avantage de s'adapter à la démarche actuelle de travail des architectes et ingénieurs de bureaux d'études impliqués dans la conception énergétique des bâtiments (SuPerBuildings, 2012).

En outre, quatre des outils d'évaluation présentés permettent d'étudier le processus de conception du bâtiment en plusieurs étages en prenant en compte la progression de l'information dans la définition du bâtiment. Ceci est fait notamment en considérant les types de données d'entrée disponibles et les décisions de conception à prendre dans chacun de ces étages. De cette façon, le concepteur a à sa disposition des éléments de décision plus adaptés à son état d'avancement dans le processus de conception pour guider sa prise de décisions.

1.1.3. Discussion

Suite à la présentation et l'analyse des approches les plus répandues pour l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment, quelques conclusions générales peuvent être tirées :

- Les certifications environnementales proposent une vision holistique et intégrale du bâtiment, en considérant les trois dimensions de la durabilité. Néanmoins, elles sont essentiellement fondées sur une culture de moyens, ce qui limite leur contribution dans les premières phases de conception à la définition d'objectifs à atteindre en termes de qualité.
- Par contre, les initiatives collaboratives internationales, qui représentent l'état de l'art dans l'évaluation de la qualité des bâtiments, coïncident sur une approche performancielle suivant une approche de type cycle de vie. Néanmoins, une partie des critères n'ont pas de lien avec la performance énergétique du bâtiment et leur considération semble peu pertinente pour la caractériser.
- Les outils d'évaluation utilisés dans les premières phases de la conception énergétique mettent en œuvre des méthodes de calcul adaptées au niveau de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de conception. Nonobstant, ils ne considèrent qu'une ou deux dimensions de la durabilité au même temps.

Le développement d'une nouvelle méthodologie d'évaluation de la performance énergétique intégrant les points forts de ces trois approches semble alors comme une opportunité de grand intérêt et potentiel.

Comme présenté dans la section 1.1.1, la performance énergétique d'un bâtiment est donnée en fonction des consommations des postes dits réglementaires. Ainsi, les décisions définissant la

conception énergétique sont représentées par le choix et le dimensionnement des éléments influant sur cette consommation d'énergie.

Ainsi, afin d'intégrer une vision holistique à l'évaluation de la performance énergétique, on propose l'élargissement de la définition de ce concept à tous les aspects du bâtiment qui sont impactés par les décisions associées à la conception énergétique. Ces impacts seront caractérisés par une quantification de performances, à travers des indicateurs de performance couvrant les trois dimensions du concept de la durabilité appliqué au bâtiment et suivant une démarche de type cycle de vie.

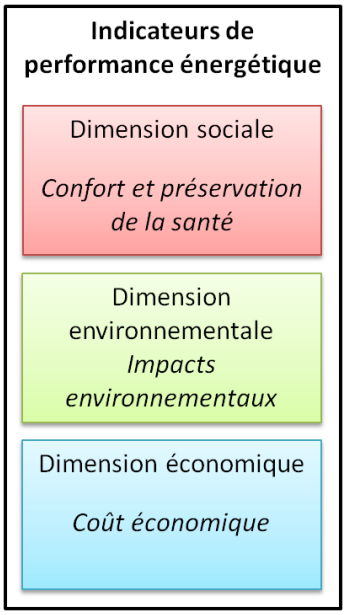

Figure 1.8. Dimensions du concept de la durabilité appliqué à la conception énergétique du bâtiment.

Comme montré dans la figure 1.8, chacune des trois dimensions du concept de la durabilité est associée à un aspect de la performance du bâtiment : la dimension économique est caractérisée par le coût économique, la dimension écologique est donnée à travers la dégradation de l'environnement et la dimension sociale est représentée par le confort et la préservation de la santé des occupants.

En suivant une approche inspirée des outils actuellement disponibles pour l'évaluation de la performance dans la conception énergétique, on propose de limiter le périmètre d'analyse aux aspects du bâtiment ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique. Cela afin de minimiser la quantité de données d'entrée nécessaires pour l'évaluation, qui représente actuellement un des facteurs limitant l'utilisation de ce type d'outils dans les premières phases de conception.

En outre, dans ce travail on propose d'adapter la méthode d'évaluation au niveau de précision de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de conception. Pour ce faire, une présentation

de la progression de l'information au long du processus de conception des bâtiments sera donnée dans la section suivante.

1.2. Progression de la connaissance dans le processus de conception du bâtiment

Après d'avoir analysé les différentes méthodes disponibles pour l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment, dans cette section on étudiera la manière d'intégrer, dans cette évaluation, la progression de la connaissance au long du processus de conception.

Dans un premier temps, une discussion sur l'impact de la prise de décisions dans les premières phases d'un projet de construction sera présentée, en mettant l'accent sur l'importance de ces phases dans la démarche de conception. Ensuite, une analyse du cadre normatif guidant le processus de conception en France sera réalisée, afin de donner les bases pour l'identification des types de décisions de conception à prendre dans les premières phases de projet ainsi que leurs niveaux de précision. Finalement, les tendances actuelles dans l'industrie du bâtiment seront discutées, en faisant le lien entre l'évolution des exigences en termes de performances énergétiques et les solutions énergétiques innovantes qui sont mises en œuvre pour y répondre.

1.2.1. Précision et impact de la prise de décisions dans un projet de construction

Le processus de conception d'un bâtiment est complexe et long. Les décisions prises dans les premières phases d'un projet de construction définissent les principes d'opération et les moyens de satisfaction des fonctions du bâtiment, qui, à leur tour, deviennent des contraintes dans les étapes ultérieures du processus (Attia *et al.*, 2012). C'est-à-dire que l'importance des décisions est alors inversement proportionnelle au niveau de précision de l'information disponible à chaque phase du projet. En outre, ce niveau de précision des décisions évolue du plus général et libre au plus spécifique et contraint lorsqu'on s'approche du lancement des travaux de chantier.

Ce constat est discuté dans les conclusions de la Tâche 23 de l'Agence Internationale de l'Energie, qui traite le sujet du processus de conception intégrée dans le contexte de la conception de bâtiments durables et optimisés pour l'énergie solaire (IEA, 2003). Dans ce travail on observe que le principal intérêt de prendre une bonne décision de conception dans les premières phases d'un projet est lié au fait que l'efficacité des décisions décroit à chaque phase du processus. Cette efficacité peut être définie comme la relation entre l'impact de la décision sur la performance du bâtiment et le coût économique pour la mettre en œuvre. Comme il peut être observé sur la figure 1.9, les décisions prises dans les premières phases d'un projet ont plus d'impact sur la performance d'un bâtiment, en réduisant leur coût de mise en œuvre.

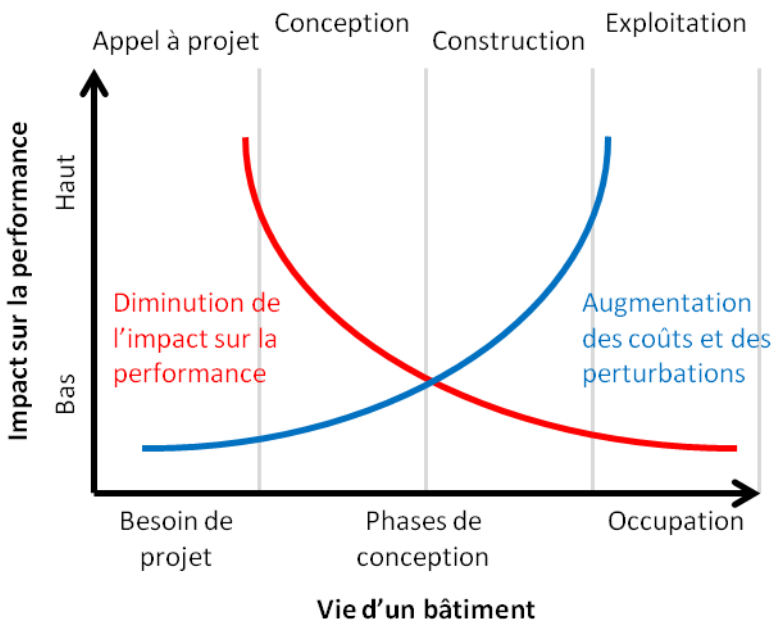

Figure 1.9. Potentiel d'impact des décisions sur la performance du bâtiment (Adapté de IEA, 2003).

En récapitulant, la liberté de choix qui caractérise les premières phases d'un projet de conception se traduit par un potentiel d'impact majeur sur la performance du bâtiment. Néanmoins, cette liberté de choix est compensée par un manque de précision dans la connaissance du bâtiment, qui pose des problèmes dans l'évaluation de la performance dans les premières phases de conception. Ainsi, le développement d'une méthodologie d'évaluation pour l'aide dans la prise de décisions dans les premières phases de conception doit tenir compte de cette progression de la précision de l'information disponible.

Comme mentionné précédemment, chaque décision prise au long du processus de conception devient une contrainte dans les phases ultérieures par la réduction de l'espace de décisions disponible. De la même manière, la prise de chaque décision permet d'augmenter le niveau de connaissance des éléments composant le bâtiment, en fixant au moins une partie des paramètres les décrivant. Ainsi, il est clair que la progression de la précision de l'information disponible à chaque phase du processus est pilotée par l'échelonnement de la prise de décisions de conception.

Afin de définir cet échelonnement de décisions dans la conception des bâtiments dans le contexte français, le cadre normatif jalonnant le déroulement des projets de construction en France sera présenté dans la section suivante.

1.2.2. Phases de conception d'un projet de construction en France

Le processus de conception d'un projet de construction est divisé en plusieurs étapes. La démarche de travail à suivre au long de ce processus, définie par une succession de tâches et de résultats, peut varier d'un pays à l'autre en fonction de son contexte normatif et historique.

En France, la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, couramment appelée « Loi MOP », met en place la relation entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre pour les marchés publics (JORF, 1993). Le terme Maîtrise d'ouvrage (MOA) désigne le propriétaire de l'ouvrage ou commanditaire des travaux d'un projet de construction, tandis que la Maîtrise d'œuvre (MOE) représente l'entité chargée de la conception et puis de la conduite opérationnelle de ces travaux. Autrement dit, ce texte légal définit le cadre légal structurant les projets de construction commandités par l'état français et conduits par des entreprises privées, où les architectes et ingénieurs des bureaux d'études interviennent en tant que concepteurs.

Même si cette loi et ses décrets d'application ont été conçus dans le contexte des commandes publiques, ils représentent actuellement la référence dans l'attribution d'obligations et l'échelonnement d'activités de tous les projets d'ouvrages de construction en France, aussi bien publiques que privés.

Le principal décret d'application de la loi MOP, le Décret n°93-1268 du 29 novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'œuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé, fixe les différentes missions qui sont demandées à la maîtrise d'œuvre (JORF, 1994). Ces missions correspondent aux étapes d'avancement des projets de construction, dès les phases d'études de conception jusqu'à la fin des travaux de chantier.

Avant le début des missions confiées à la maîtrise d'œuvre, une phase d'études dites préalables a lieu. Dans cette phase on retrouve notamment la programmation architecture et technique, qui a pour objectif de permettre à la maîtrise d'ouvrage d'exprimer les objectifs et contraintes du projet de construction (MIQCP, 2011). Le résultat de la phase de programmation est le programme de l'opération, donné sous la forme d'un cahier des charges architecturales et techniques qui représente le point de départ du travail de la maîtrise d'œuvre.

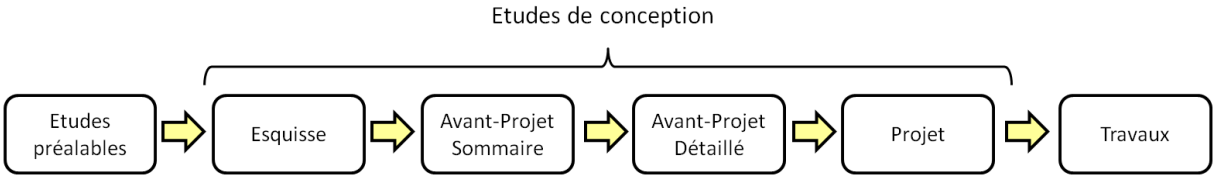

Figure 1.10. Positionnement des phases d'études de conception dans le projet de construction des bâtiments.

Les phases d'études de conception, positionnées entre les études préalables et les travaux de chantier comme montré dans la figure 1.10, sont les étapes du projet de construction qui englobent la prise de décisions de conception (Hutter, 2003). Pour les opérations de construction neuve de bâtiment, ces phases sont définies dans le cadre normatif français comme :

- Phase d'Esquisse (ESQ)
- Phase d'Avant-Projet Sommaire (APS)
- Phase d'Avant-Projet Détaillé (APD)
- Phase de Projet (PRO)

Les quatre phases de conception seront brièvement présentées dans les sections qui suivent, en mettant l'accent sur la progression du niveau de précision dans l'information dans la définition du bâtiment.

1.2.2.1.Phase d'Esquisse

Etant au début du processus de conception, la phase d'Esquisse représente une étape déterminante dans la définition des attentes du projet de construction en termes de performance. Dans cette phase la maîtrise d'œuvre dessine les grandes lignes architecturales, environnementales et techniques du projet en partant des objectifs et contraintes exprimés par la maîtrise d'ouvrage dans le programme de l'opération. De manière générale, les choix de conception se déterminent en termes de stratégies, sans entrer encore dans les détails techniques.

A la fin de la phase d'Esquisse, la maîtrise d'œuvre propose une ou plusieurs solutions d'ensemble, en présentant les dispositions techniques générales envisagées et en vérifiant la faisabilité de l'opération vis-à-vis des contraintes du programme et du site d'implantation.

1.2.2.2.Phase d'Avant-Projet Sommaire

Suite aux premières remarques de la part de la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre continue à vérifier la compatibilité de l'esquisse retenue et du programme de l'opération dans la phase d'Avant-Projet Sommaire. De manière générale, cette phase a deux objectifs principaux :

- D'une part, mettre en œuvre de manière complète et coordonnée le projet architectural, en précisant la composition générale en plan et en volume.
- D'autre part, assurer l'intégration des dispositions architecturales et des systèmes techniques qui ont été établis dans la solution d'ensemble.

Un travail de comparaison quantitative et d'optimisation des différentes solutions énergétiques possibles a lieu dans cette phase, parfois pour la première fois dans le processus de conception. Ceci permet d'établir des performances à atteindre, notamment en termes de consommation d'énergie, d'isolation thermique et de qualité de l'environnement intérieur.

1.2.2.3.Phase d'Avant-Projet Détaillé

Aussi appelée phase d'avant-projet définitif, cette deuxième étape de l'Avant-Projet vise principalement à définir avec un certain niveau de détail les principes constructifs, les matériaux et les installations techniques. Dans cette phase, les solutions techniques retenues sont justifiées, notamment en ce qui concerne aux installations techniques, qui sont décrites à travers des schémas

de fonctionnement. En outre, les principes constructifs de fondation et de structure sont arrêtés ainsi que certains choix d'équipements.

Le projet architectural étant finalisé, les dimensions et l'aspect du bâtiment peuvent être arrêtés et synthétisés pour leur utilisation dans le dossier de demande de permis de construire à déposer avant de commencer la dernière étape des études de conception.

1.2.2.4.Phase de Projet

Dans la phase Projet, la description de l'ouvrage passe d'une approche plus ou moins schématique à une autre plus précise, par la traduction des solutions énergétiques à des composants spécifiques et des plans d'installations définis. Son objet est ainsi de finaliser et de détailler tous les choix et toutes les solutions architecturales et techniques retenues, en précisant la compatibilité et l'implantation de l'ensemble des éléments structurels et des équipements techniques. En outre, la nature et les caractéristiques des matériaux et leurs conditions de mise en œuvre sont arrêtées.

En arrêtant tous les choix décrivant l'ouvrage, le dossier produit à la fin de la phase de Projet offre une connaissance détaillée et complète du bâtiment. Ceci sert de base pour la constitution du Dossier de Consultation d'Entreprises (DCE), qui a comme objectif de lancer l'appel d'offres pour l'assignation des contrats de travaux.

1.2.3. Tendances actuelles dans l'industrie du bâtiment

Comme présentées dans la section précédente, les bases de la démarche guidant le déroulement des projets de construction en France sont définies par le cadre normatif constitué par la loi MOP et ses décrets d'application. Nonobstant, ce cadre représente seulement les dispositions minimales qui sont demandées aux architectes et ingénieurs de bureaux d'études qui interviennent dans la conception de bâtiments. En plus de ces exigences de base, la maîtrise d'œuvre est actuellement confrontée à un nombre croissant d'exigences en termes de performance, imposées par les nouvelles tendances dans l'industrie du bâtiment.

Dans cette section, les facteurs favorisant cette évolution des niveaux d'exigences seront d'abord présentés, ainsi que l'impact que cette évolution a imposé sur la démarche de travail des acteurs de la maîtrise d'œuvre. Ensuite, un des nouveaux types de solutions énergétiques qui sont apparues pour répondre à ce renforcement d'exigences sera présenté : la façade double peau vitrée. Ceci sera accompagné par une discussion sur l'intérêt de sa mise en œuvre ainsi que les verrous qui limitent actuellement son implémentation.

1.2.3.1. Evolution des exigences de performance du bâtiment

L'évolution actuelle en termes d'exigences dans l'industrie du bâtiment concerne à la fois l'augmentation des niveaux de performance exigée et la diversité d'aspects de performance à considérer. En ce qui concerne le contexte français, plusieurs raisons contribuent à cette évolution, notamment :

- Un cadre réglementaire toujours plus contraignant, résultat de la progression de la Réglementation Thermique française face aux objectifs en matière d'efficacité énergétique de l'Union Européenne à l'horizon 2020 (Parlement européen, 2002).
- Un intérêt croissant par les certifications environnementales, qui représente dans l'actualité une création de valeurs pour les actifs immobiliers (McGraw-Hill Construction, 2013).
- Une augmentation de la productivité des occupants dans les bâtiments de bureaux par une amélioration des conditions de confort (World Green Building Council, 2013).
- La volonté de minimiser la facture énergétique par la maîtrise des charges d'exploitation (Green Soluce, 2014).

Pour répondre à cet alourdissement des exigences de performance, la maîtrise d'œuvre a répondu par un renforcement des missions de base composant le processus de conception ainsi qu'un avancement des tâches par rapport au phasage traditionnel.

Dans ce sujet, la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP) propose l'introduction d'une prestation de niveau « Esquisse + », une version confortée et avec plus d'exigences que la mission traditionnelle de niveau Esquisse (MIQCP, 2011). Cette prestation, intermédiaire entre les exigences des phases d'Esquisse et d'Avant-Projet Sommaire, est à prendre en compte au début du processus de conception. Sa considération permet ainsi d'intégrer dès les premières décisions de conception des éléments de réflexion pour l'optimisation de tous les éléments du bâtiment du point de vue énergétique.

Ce type de réflexion est nécessaire notamment dans la mise en œuvre de solutions énergétiques avec des principes bioclimatiques, qui représente un autre effet résultant de l'évolution des exigences en termes de performances du bâtiment.

1.2.3.2.Mise en œuvre de solutions énergétiques innovantes

Afin de répondre aux exigences croissantes en termes de performance énergétique, un éventail de solutions énergétiques et des stratégies bioclimatiques est actuellement mis en œuvre de plus en plus dans les projets de construction. Venant des traditions vernaculaires ou des nouveaux développements technologiques, ces systèmes promettent de réduire les besoins énergétiques des bâtiments. Quelques exemples sont les murs Trombe, le refroidissement solaire, les cheminées solaires, les matériaux à changement de phase, les toitures végétalisées et les toitures réfléchissantes (Chan *et al.*, 2010 ; Sadineni *et al.*, 2011).

A cause de leur nature innovante, les impacts de ces systèmes énergétiques sur la performance globale du bâtiment sont parfois peu maîtrisés. Un exemple d'un tel système énergétique d'actualité mais pour l'instant peu étudié en détail est la façade double peau vitrée. Représenté sur la figure 1.11, ce système énergétique peut être défini comme une façade simple traditionnelle doublée par l'extérieur par une deuxième façade essentiellement vitrée. Plusieurs variations du concept sont possibles, chacune avec des avantages et des inconvénients (Poirazis, 2004).

Figure 1.11. Construction d'une façade double peau vitrée dans le campus de l'Université de Bordeaux, sans vitrages (à gauche) et avec vitrages (à droite).

Le principe thermique d'opération d'une façade double peau vitrée est montré dans la figure 1.12. La conception de ce système présente ainsi des compromis à faire entre les multiples objectifs de conception : par exemple, du point de vue thermique, l'augmentation potentielle dans la captation d'énergie solaire peut se traduire par une diminution des besoins de chauffage en hiver, mais aussi par l'apparition des surchauffes en période estivale.

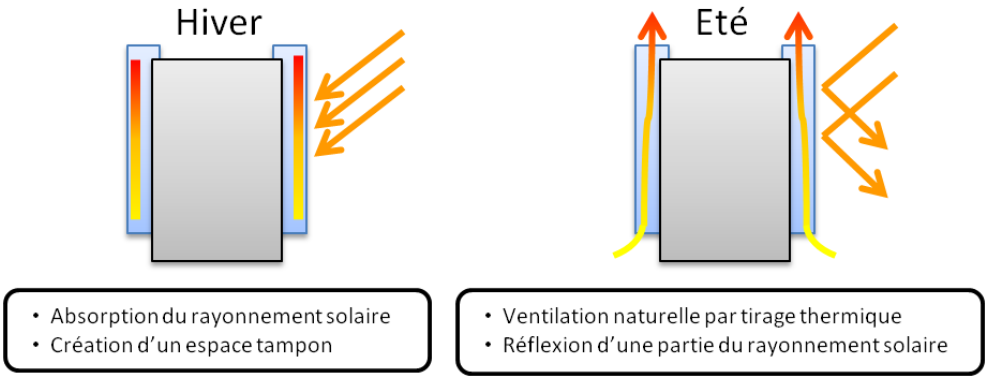

Figure 1.12. Principe thermique d'opération d'une façade double peau vitrée.

De cette manière, la présence d'une façade double peau vitrée influe le comportement thermique, visuel et acoustique du bâtiment de plusieurs manières :

- Modification du flux solaire thermique et lumineux incident sur la façade intérieure, à considérer par l'introduction du facteur de transmission lumineuse et du facteur solaire de la façade vitrée.
- Réduction du niveau de bruit de trafic arrivant sur la façade intérieure, à prendre compte à travers l'isolement acoustique standardisé pondéré de la façade vitrée.
- Modification de l'échange thermique entre la surface extérieur de l'enveloppe et son environnement, donnée par une modification du coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement entre eux ainsi que de la température de l'air en contact avec l'enveloppe.

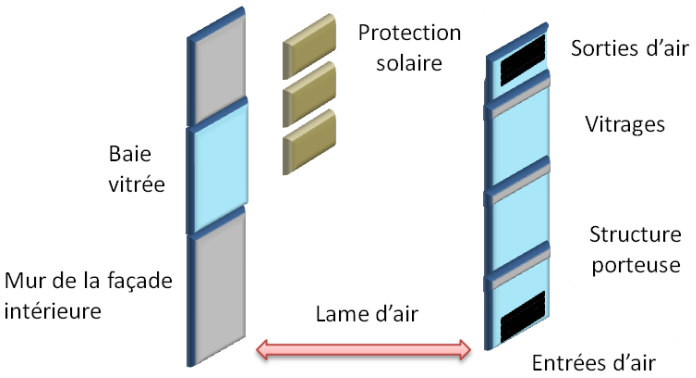

Figure 1.13. Composants principaux d'une façade double peau vitrée.

Comme présenté dans la figure 1.13, les composants principaux d'une façade double peau vitrée sont (Schiefer *et al.*, 2008) :

- Une façade vitrée, couvrant au moins une des façades du bâtiment et comportant une structure porteuse (figure 1.14) et des vitrages (figure 1.15).
- Une cavité d'air comprise entre la façade vitrée et la façade traditionnelle du bâtiment, segmentée ou non entre les différents étages du bâtiment.
- Des protections solaires, positionnés dans la cavité d'air entre façades ou à l'extérieur de la façade vitrée.
- Des ouvertures d'air vers l'extérieur et/ou vers l'intérieur du bâtiment.

Figure 1.14. Structure porteuse d'une façade double peau vitrée, avant montage (à gauche) et après montage (à droite).

Figure 1.15. Vitrages d'une façade double peau vitrée, avant montage (à gauche) et après montage (à droite).

Ainsi, une approche reprenant les trois aspects de la durabilité semble adaptée pour évaluer l'impact de la présence et conception d'un système énergétique tel que la façade double peau vitrée sur la performance énergétique d'un bâtiment. Pour cette raison, la conception de ce système énergétique a été choisie comme un cas d'étude pour la validation de la méthodologie d'aide à la décision proposée dans ce travail. Cette première application de la méthodologie permettra de guider le concepteur pendant la sélection et le dimensionnement des composants de la façade double peau vitrée en considérant tous les compromis entre les critères de conception.

1.2.4. Discussion

Comme présenté dans cette section, l'évolution des exigences en termes de performances du bâtiment a entraîné un renforcement des missions confiées à la maîtrise d'œuvre par rapport aux dispositions légales spécifiées dans le cadre normatif français. Suivant la recommandation de la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques de considérer une prestation confortée de niveau « Esquisse + » comme première phase dans le processus de conception, le déroulement du processus de conception est décalé vers les premières phases de conception. La phase de Projet devient ainsi juste une étape de formalisation des dispositions déjà fixées en phase d'Avant-Projet Détaillé, l'essentiel des décisions de conception ayant lieu lors des trois premières phases de conception.

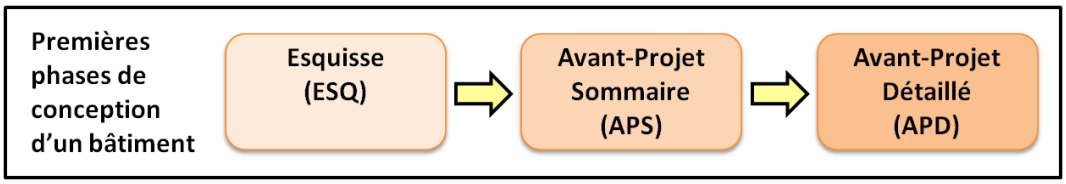

Figure 1.16. Premières phases du processus de conception d'un bâtiment selon le cadre normatif français.

Dans ce travail on propose ainsi de limiter l'évaluation du bâtiment à ces premières phases de conception, afin de donner au concepteur des éléments de décision pour guider sa prise de décisions. La figure 1.16 présente alors le phasage du processus à considérer dans la logique de progression des décisions de conception.

En outre, la mise en œuvre de systèmes énergétiques innovants, tels que la façade double peau vitrée, nécessite une vision holistique de la performance du bâtiment, afin de comprendre les compromis à faire entre les différent critères de conception. Ainsi, une méthodologie d'aide à la prise de décision qui permet d'intégrer cette vision dès les premières phases de projet présente un grand intérêt pour guider les concepteurs dans un contexte de plus en plus exigeant.

1.3. Conclusions

Lors de cette étude de l'état de l'art on a identifié le manque d'outils pour l'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments, qui au même temps soient adaptés aux premières phases de conception et proposent une vision holistique des impacts des décisions. Trois types de méthodes d'évaluation de la performance des bâtiments ont été présentés et discutés, chacun ayant des approches et limitations différentes.

Dans ce contexte, on propose le développement d'une méthodologie d'évaluation de la performance des bâtiments proposant des éléments d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique, en considérant :

- La prise en compte d'indicateurs de performance couvrant les trois dimensions du concept de la durabilité appliqué au bâtiment et suivant une approche de type cycle de vie.
- La progression de la connaissance du bâtiment au long des premières phases de conception à travers de l'échelonnement de décisions.

Afin de s'adapter à la démarche de travail actuelle des acteurs de la construction en France, l'échelonnement de décisions de conception est calé sur le cadre normatif français, en se focalisant sur les trois premières phases de projet : phase d'Esquisse, phase d'Avant-Projet Sommaire et phase d'Avant-Projet Détaillé.

La méthodologie proposée dans ce travail pour l'aide à la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments sera alors présentée en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre 2 Méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables

Une des conclusions de l'étude de l'état de l'art présentée dans le premier chapitre est le manque de méthodologies et outils d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments qui soient adaptés aux premières phases de conception d'un projet de construction.

Dans ce deuxième chapitre, une proposition de méthodologie d'aide à la prise de décisions répondant à ce besoin est présentée, en accord avec les nouvelles démarches d'analyse de la performance énergétique des bâtiments. Dans un premier temps, les principes et la logique décrivant la méthodologie seront présentés et discutés. La caractérisation de la performance énergétique du bâtiment, donnée à partir de l'identification de critères et indicateurs, est détaillée dans la deuxième section. Dans une troisième section, la mise en place d'une méthode d'évaluation de la performance, composée des modèles de calcul des indicateurs de performance, est décrite en détail. Cette démarche d'évaluation est complétée dans une quatrième section par la proposition d'une logique de choix visant à l'adapter à la progression de la définition du bâtiment au long des premières phases de conception, sous la forme d'un phasage de décisions.

2.1. Principes et logique de la méthodologie

La conception d'un bâtiment est une tâche complexe. D'un côté, tout bâtiment doit être conçu pour répondre aux exigences définies par la maîtrise d'ouvrage dans le cahier de charges du projet, sous la forme d'une pluralité de fonctions à satisfaire ainsi que de contraintes à respecter pour ce bâtiment pendant toute sa durée de vie. D'un autre côté, le bâtiment représente un système composé par une multiplicité d'éléments, y compris d'autres systèmes, dont les interactions sont à prendre en compte puisqu'elles détermineront le comportement dynamique du bâtiment pendant la phase d'exploitation. Cette complexité intrinsèque à la conception d'un bâtiment est naturellement encore plus importante dans le cas d'un projet de construction visant une haute performance énergétique.

Pour répondre à cette condition de complexité, une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments durables est proposée dans ce travail. Cette méthodologie est destinée à être utilisée, sous la forme d'un outil d'aide à la décision, par la maîtrise d'œuvre d'un projet de construction, y compris l'architecte et les bureaux d'études concernés par la performance énergétique. La méthodologie développée dans ce travail est construite sur deux principes de base :

- L'évaluation de la performance énergétique du bâtiment à travers le concept de la durabilité.
- L'adaptation à la progression du niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases de conception.

L'objectif de cette méthodologie est ainsi de donner au concepteur une vision globale de l'impact de ses choix de conception, pour ainsi le guider dans la prise de décisions dans la sélection et le

dimensionnement des éléments du bâtiment ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique. Ceci est fait par une évaluation multicritère des alternatives de conception par l'application du concept de la durabilité au bâtiment et en s'appuyant sur une approche de type cycle de vie. La méthodologie suit une logique de progression dans la prise des décisions de conception dans les premières phases de projet, lesquelles déterminent de manière séquentielle le niveau de détail dans la définition du bâtiment au long du processus de construction.

Une vision globale de la méthodologie proposée dans ce travail est montrée dans la figure 2.1. Les modules composant cette méthodologie sont entourés en rouge et sont donnés comme :

1) La sélection d'une base d'indicateurs de performance couvrant tous les aspects des impacts des décisions concernant la conception énergétique.
2) La construction d'une méthode d'évaluation des indicateurs de performance adaptée au niveau de précision de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de conception.
3) La définition d'une logique de progression des décisions de conception dans les premières phases de conception, ainsi que le choix d'une configuration de bâtiment de base.
4) La construction d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment pour faciliter la déclaration de l'information par le concepteur.

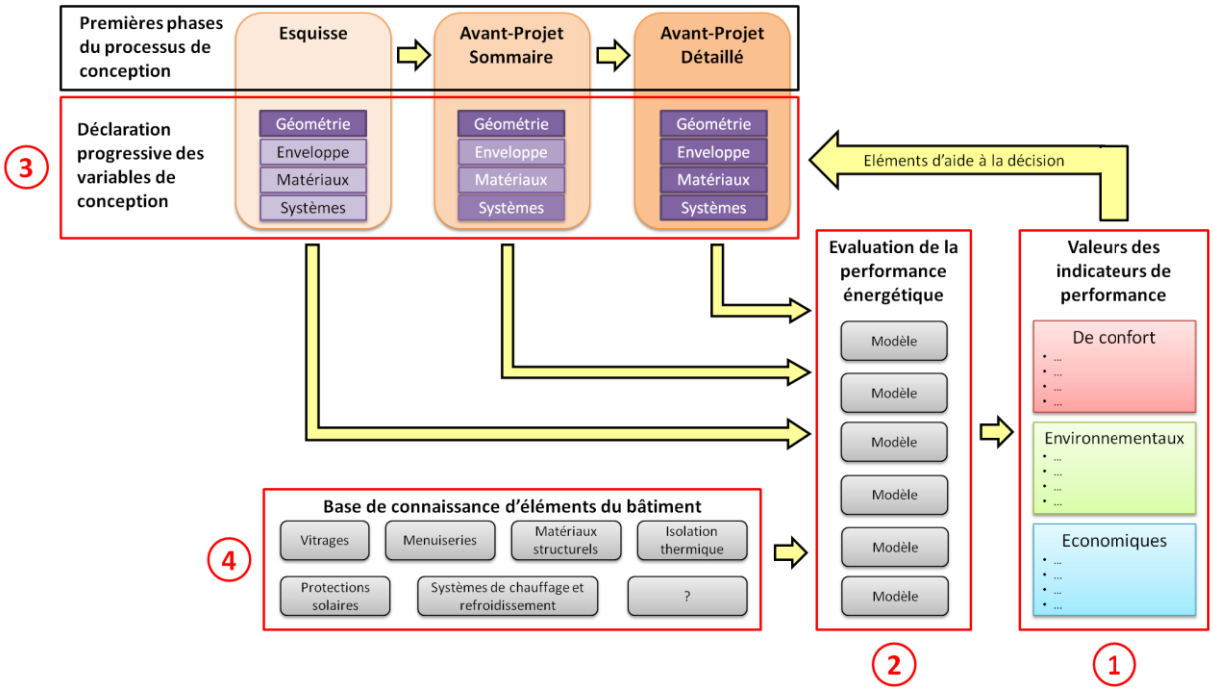

Figure 2.1. Vision globale de la méthodologie d'évaluation de la performance énergétique proposée.

En ce qui concerne l'identification des critères de performance, chacune des trois dimensions de la durabilité est liée à un aspect de la performance du bâtiment :

- La dimension économique est caractérisée par le coût économique.

- La dimension écologique est donnée à travers la dégradation de l'environnement.
- La dimension sociale est représentée par le confort et la préservation de la santé des occupants.

Des indicateurs de performance caractérisant ces critères ont été sélectionnés pour évaluer les alternatives de conception suivant une approche quantitative de type performancielle. Une approche orientée « performances » permet d'analyser de manière globale la qualité de conception d'un bâtiment, dans son ensemble et sur l'ensemble de son cycle de vie. Cette approche se distingue notamment d'une culture orientée « moyens », fondée sur l'exigence de la mise en œuvre de dispositions considérées comme de bonnes pratiques de conception. Ce changement de paradigme a été constaté dans l'étude de l'état de l'art de ce travail à partir des plus récentes initiatives de normalisation internationale. Plus particulièrement en France, l'évolution de la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) vers le projet de certification HQE Performance est un clair exemple d'un changement de mentalité dans l'évaluation de la performance des bâtiments.

Il est important de mentionner que l'évaluation des critères environnementaux et économiques n'a pas comme objectif d'être exhaustive, comme c'est le cas des certifications environnementales ou les analyses de coûts pour le chiffrage des projets. Par contre, cette méthodologie vise à donner au concepteur des éléments de décision par la comparaison des alternatives de conception en fonction de leur performance énergétique. Cette approche comparative permet de limiter le périmètre d'analyse aux éléments du bâtiment les plus influents sur la performance énergétique.

En outre, la méthodologie d'aide à la décision ici proposée est adaptée à la progression de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de conception : la phase d'Esquisse (ESQ), la phase d'Avant-Projet Sommaire (APS) et la phase d'Avant-Projet Détaillé (APD). L'information disponible à chaque phase de projet, donnée par le niveau de détail de la définition du bâtiment, est directement liée à la prise de décisions effectuée dans les étapes précédentes, et elle évolue tout au long du processus de conception : du général au spécifique.

Cette progression de l'information a été intégrée dans la méthodologie de deux manières différentes :

- D'un côté, les indicateurs de performance ainsi que leurs méthodes de calcul ont été sélectionnés pour être compatibles avec les niveaux d'information limités qui caractérisent les premières phases de conception.
- D'un autre côté, une logique de progression des décisions de conception pour une définition échelonnée du bâtiment a été définie en fonction du déroulement du projet de construction.

Cette logique de progression représente un modèle de répartition séquentielle des décisions à prendre dans chaque phase de conception. Sa construction part du constat que la progression du niveau de détail dans la définition d'un bâtiment est donné par l'avancement des décisions de conception. La logique de progression a été formalisée à partir des pratiques actuelles dans le secteur de la construction et adaptée aux exigences croissantes en matière de performance énergétique. Suivant cette approche, le concepteur peut explorer l'espace de décision de manière séquentielle, en adaptant ses études paramétriques aux possibilités de choix disponibles dans chaque phase de conception.

Les conclusions de ce travail sont axées sur la conception énergétique des bâtiments de bureaux dans un contexte français. L'intérêt du choix des bâtiments de bureaux comme cas d'étude est multiple :

- D'une part, la taille et le budget des projets de construction pour les bâtiments avec cet usage sont généralement importants (OPCOC, 2014). Ceci donne la possibilité de considérer des solutions énergétiques performantes, surtout en ce qui concerne les principes constructifs et les solutions techniques.
- D'une autre part, des études montrent qu'une haute qualité de l'environnement intérieur est liée à une amélioration considérable de la productivité des employés ainsi que de leur santé et bien-être (World Green Building Council, 2013).

Par conséquence, les bâtiments de bureaux représentent une opportunité de grand potentiel pour le développement des projets de construction à haute qualité environnementale et performance énergétique, ce qui se traduit par une forte volonté pour la certification des projets (McGraw-Hill Construction, 2013).

Un outil d'aide à la décision a été développé comme une première application de la méthodologie ici proposée, en reprenant tous les principes de base de celle-ci. L'objectif de sa mise en œuvre est de valider la logique de la méthodologie ainsi que d'étudier son intérêt : ce qu'elle peut apporter au concepteur comme éléments d'aide à la décision. Cet outil permettra aussi d'identifier les difficultés et les limites de son application comme un guide dans l'analyse de la performance énergétique et dans la prise de décisions dans la conception d'un bâtiment.

L'outil d'aide à la décision proposé ici est décomposé en trois parties :

- Une méthode complète pour le calcul des indicateurs sélectionnés pour caractériser la performance énergétique des alternatives de conception.
- Une base de données regroupant tous les paramètres d'entrée nécessaires pour alimenter la méthode de calcul des indicateurs, y compris les caractéristiques techniques, économiques et environnementales des composants du bâtiment et des sources énergétiques.
- Un guide support pour la structuration de la prise de décisions en fonction de la phase de projet concerné.

Avant d'entrer dans le détail, il est important de mentionner que à cause de la complexité intrinsèque de l'analyse complète de la performance d'un bâtiment, les conclusions du présent travail sont le résultat d'une réflexion réalisée en parallèle et même de manière itérative entre tous les aspects de la méthodologie : la sélection des indicateurs de performance, le choix des méthodes de calcul pour leur évaluation, l'identification des bases de données pour alimenter les modèles, la définition des éléments du bâtiment composant le périmètre d'analyse, ainsi que la définition des décisions de conception et leur répartition dans le processus de conception. Le fait de présenter tous ces aspects d'une façon plus ou moins séquentielle dans ce rapport entraînera parfois des références à des concepts ou des arguments qui n'ont pas encore été présentés précédemment. Dans ces cas, le lecteur sera dirigé promptement vers la section concernée pour plus d'information.

2.2. Sélection d'indicateurs de performance pour la conception énergétique du bâtiment

Afin de caractériser la performance énergétique des alternatives de conception, un ensemble d'indicateurs a été sélectionné couvrant les trois dimensions de la durabilité. La sélection de ces indicateurs est le résultat de l'étude de l'état de l'art sur l'analyse de la performance énergétique des bâtiments présenté dans la section 1.1 de ce travail, ainsi que d'autres considérations de type pratique associées à la mise en place de leurs méthodes de calcul. L'identification des indicateurs de performance est basée notamment sur les travaux du comité technique TC350 du Comité Européen de Normalisation (CEN/TC 350, 2009-2014), de l'initiative internationale Sustainable Buildings Alliance (Sustainable Building Alliance, 2010) et des projets européens Perfection (Perfection, 2010), OPEN HOUSE (OPEN HOUSE, 2013) et SuPerBuildings (SuPerBuildings Consortium, 2012). D'autres références telles que les certifications environnementales et le cadre réglementaire en France, en particulier la règlementation thermique française en vigueur (CSTB, 2010), ont été également étudiées, en apportant une vision pratique sur les démarches de conception et construction actuelles.

Dans le but de valider la représentabilité de l'ensemble d'indicateurs identifiés, les conclusions de cette étude ont été présentées à un groupe d'experts du centre de ressources technologiques Nobatek, qui développe des activités de recherche appliquée et des prestations de service dans les domaines de l'aménagement et de la construction durables. Les échanges avec des chefs de projet et des experts dans tous les domaines liés à la performance énergétique du bâtiment ont permis de confronter les principes de cette méthodologie avec les exigences communes des cahiers de charges et les pratiques « de bonne conception » dans le secteur de la construction. Les remarques issues de ces échanges ont enrichi les conclusions de la sélection des indicateurs de performance énergétique.

Sous forme récapitulative, la philosophie de sélection d'indicateurs peut être décrite en cinq points :

- Les indicateurs doivent caractériser de manière globale et représentative la performance énergétique à l'échelle du bâtiment en couvrant les trois aspects du concept de la durabilité appliqué au bâtiment, suivant une approche de type cycle de vie.
- Ils doivent être calculables dans les premières phases de conception, en étant compatibles avec le niveau de précision de l'information disponible.
- Ils doivent permettre l'évaluation de l'effet des décisions de conception sur la performance énergétique, pour permettre la comparaison des alternatives de conception.
- Ils doivent être associés à des méthodes de calcul simples et légères, pour permettre une exploration de l'espace de décision avec un coût réduit en temps de simulation numérique.
- Ils doivent être compatibles avec la disponibilité actuelle de sources de paramètres de calcul, notamment les bases de données de profils environnementaux, considérés comme un des principaux obstacles pour l'analyse (CSTB, 2011 ; CSTB, 2013).

2.2.1. Vision fonctionnelle du bâtiment du point de vue énergétique

Comme présenté précédemment, la définition de base de la performance énergétique d'un bâtiment est directement liée aux besoins énergétiques des systèmes techniques associés aux usages réglementaires : le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage et la production d'eau chaude sanitaire. Des références réglementaires telles que la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (Parlement européen, 2002) et la réglementation thermique française mettent en œuvre cette définition pour caractériser la conception d'un bâtiment du point de vue énergétique.

En outre, on constate un intérêt émergent pour l'analyse quantitative de la qualité d'un ouvrage de construction à travers l'application du concept de la durabilité et ses trois dimensions fondamentales. Cette tendance répond notamment aux efforts de normalisation du comité technique TC350 du Comité Européen de Normalisation et à l'évolution de la démarche HQE en France vers une approche performancielle (Association HQE, 2014).

Pour répondre à ce changement de paradigme, dans ce travail on propose d'étendre l'étude de la performance énergétique du bâtiment :

- En incluant le degré de satisfaction des services ou fonctions que les systèmes techniques des postes réglementaires fournissent au bâtiment et à ses occupants.
- En intégrant les impacts environnementaux et coûts des moyens nécessaires pour la mise en place et l'opération de ces systèmes ainsi que des autres éléments du bâtiment qui ont une influence déterminante sur ses besoins énergétiques.

De cette façon, l'évaluation de la performance énergétique dans ce travail permet d'intégrer les fonctions et les contraintes des éléments du bâtiment associées aux besoins énergétiques des systèmes techniques des postes réglementaires. Ces éléments comprennent logiquement les systèmes techniques des postes spécifiés auparavant, mais aussi les dispositions architecturales qui déterminent leurs besoins énergétiques : la composition de l'enveloppe, le choix des matériaux et la géométrie du bâtiment. Cette vision fonctionnelle du bâtiment est montrée dans la figure 2.2.

Ainsi, la conception d'un bâtiment du point de vue énergétique est définie dans ce travail comme la sélection et le dimensionnement de ces dispositions architecturales et systèmes techniques ayant une influence déterminante sur les besoins énergétiques des postes réglementaires. Les frontières du système à considérer sont alors données par l'ensemble de composants du bâtiment qui intervient de cette façon sur sa performance énergétique.

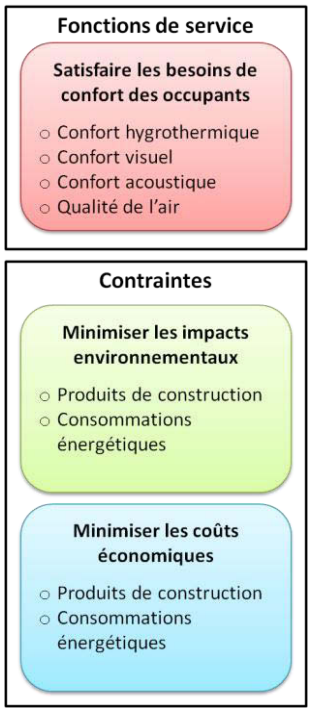

Figure 2.2. Fonctions et contraintes du bâtiment du point de vue énergétique.

En ce qui concerne les fonctions des postes réglementaires, on part du constat qu'un bâtiment est conçu pour répondre à une pluralité de besoins fonctionnels et techniques. Plusieurs catégories de besoins fonctionnels ont été identifiées lors de l'étude de l'état de l'art de l'évaluation de la performance énergétique : accessibilité, santé et confort, adaptabilité, sûreté et sécurité, entre autres. Cependant, seulement la catégorie de santé et confort des occupants est associée au fonctionnement des systèmes techniques des postes réglementaires :

- Les systèmes de chauffage et de refroidissement permettent d'assurer des conditions de confort thermique adaptées aux besoins des occupants.
- Le système de ventilation permet de garantir une qualité de l'air appropriée dans les espaces habitables.
- Le système d'éclairage fourni un niveau d'éclairement adapté à l'activité dont le bâtiment est le support pour ainsi assurer le confort visuel des occupants.
- Le système de production d'eau chaude permet l'approvisionnement d'eau pour les usages sanitaires.

De façon complémentaire aux services ou fonctions mentionnés ci-dessus, un autre type de besoin a été identifié comme pertinent dans ce travail : le confort acoustique. Même si aucun des systèmes techniques mentionnés n'est utilisé pour assurer des conditions acoustiques adaptées, les décisions de conception ayant une influence déterminante sur cet aspect sont fortement liées aux besoins thermiques et d'éclairage. C'est notamment le cas de la composition de l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, le confort acoustique a été ajouté dans ce travail à la liste de fonctions à considérer dans l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment.

Par ailleurs, dans le contexte des bâtiments de bureaux, les besoins énergétiques associés à la production d'eau chaude sanitaire sont généralement négligeables et ces types de systèmes sont parfois omis dans un projet de construction. Ceci a été constaté lors d'une étude dans le cadre du présent travail à partir des données de la base de projets de construction de l'Observatoire BBC (Collectif Effinergie, 2014), qui comprend des ouvrages à haute qualité environnementale et performance énergétique. Une partie considérable des projets de bureaux dans cette base de données n'incluent pas de système de production d'eau chaude. Cette observation a été confirmée à travers des échanges avec l'équipe de travail du centre de ressources technologiques Nobatek. Pour cette raison, ce poste réglementaire n'a pas été pris en compte dans ce travail comme fonction pertinente à satisfaire dans l'étude de la performance énergétique du bâtiment.

Ainsi, les services liés aux systèmes techniques à considérer pour l'étude de la performance énergétique dans ce travail sont données par quatre types de fonctions de confort des occupants :

- Confort hygrothermique
- Confort visuel
- Confort acoustique
- Qualité de l'air intérieur

L'étude de la performance énergétique du bâtiment dans ce travail ne se limite pas qu'aux besoins énergétiques des postes réglementaires. Cette étude intègre aussi la mise en place des systèmes techniques associés ainsi que les autres éléments du bâtiment ayant une influence déterminante sur leurs besoins énergétiques. Ces éléments comprennent de manière générale la composition de l'enveloppe et le choix de matériaux. La mise en place des composants de ces éléments induit des coûts économiques ainsi que des impacts sur l'environnement tout au long du cycle de vie du bâtiment. Ces deux types de critères représentent par conséquent des contraintes à respecter lors de la conception, en ayant comme objectif leur minimisation.

Pour les prendre en compte au niveau du bâtiment, les impacts environnementaux et les coûts économiques sont à agréger en intégrant deux aspects de la vie du bâtiment :

- L'utilisation des produits de construction, y compris matériaux et systèmes techniques.
- La consommation de ressources énergétiques par les postes réglementaires.

En récapitulant, la définition de l'étude de la performance énergétique correspond à une vision fonctionnelle du bâtiment du point de vue énergétique qui comprend deux types de critères de conception :

- Le confort et santé des occupants, considérés comme des fonctions du bâtiment à satisfaire.
- Les impacts sur l'environnement et les coûts économiques engendrés par l'ouvrage tout au long de son cycle de vie, représentant des contraintes à respecter.

La considération de ces deux types de critères de conception permet l'élargissement du concept de la performance énergétique aux aspects environnementaux, économiques et sociaux des postes consommateurs d'énergies des usages réglementaires. Les fonctions et contraintes ici identifiées sont à caractériser au travers d'un ensemble d'indicateurs qui se doivent d'être représentatifs de la

performance globale du bâtiment, ainsi que compatibles avec le niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases de conception.

2.2.2. Aspects environnementaux

Comme discuté dans le premier chapitre de ce travail, un des aspects les plus étudiés de la performance énergétique du bâtiment est sa qualité environnementale. Bien que d'autres méthodes d'évaluation existent, l'approche privilégiée est en règle générale celle de l'analyse de cycle de vie (ACV). Le but de cette approche est de permettre d'estimer la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie.

La méthode d'application d'une analyse de cycle de vie a été standardisée par la série de normes ISO 14040 sur le management environnemental (ISO/TC 207, 2006). Le choix des indicateurs caractérisant la performance environnementale d'un produit quelconque est néanmoins ouvert et à adapter selon le contexte d'application. De manière générale, un facteur déterminant pour ce choix est la disponibilité de données d'entrée pour l'évaluation. Dans le cas des ouvrages de construction, ces données représentent les profils environnementaux des composants du bâtiment et des sources d'énergie.

En France, la base de données INIES donne actuellement accès libre et public à un catalogue de profils environnementaux des produits de construction, appelés Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) (Association HQE, 2014). Au juin 2014, un total de 1345 fiches est disponible en ligne, couvrant toutes les catégories des produits de construction (Comité technique INIES, 2014).

Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire des produits de construction sont fournies par les fabricants ou syndicats professionnels des produits concernés selon le modèle de la norme française NF P01-010 (CEN/TC 350, 2004). Cette norme, développée par le comité technique TC350 du Comité Européen de Normalisation, a fourni la méthode d'obtention et le format des FDES depuis la création de la base de données. Le format de la norme NF P01-010 spécifie les critères et indicateurs environnementaux à déclarer pour l'évaluation de la performance environnementale à l'échelle des produits de construction. De manière parallèle, le calcul correspondant pour l'évaluation à l'échelle du bâtiment est spécifié dans la norme XP P 01-020-3 (CEN/TC 350, 2009).

Les profils environnementaux de la base INIES représentent une source de données de référence en constante augmentation, produit d'une réflexion collaborative entre les principaux acteurs du bâtiment, y compris l'Association HQE, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Pour cette raison, les indicateurs environnementaux du format de déclaration des FDES ont été sélectionnés comme point de départ pour caractériser la performance environnementale du bâtiment.

Nonobstant, l'introduction des normes EN 15804 (CEN/TC 350, 2014) et EN 15978 (CEN/TC, 2012) en 2012 par le comité TC350 a annoncé un changement dans le format de déclaration des profils à l'échelle des produits et des bâtiments respectivement. Ces normes définissent un nouvel ensemble

d'indicateurs environnementaux à prendre en compte. Une période de transition est prévue à partir de juillet 2014, date à partir de laquelle les fiches ne seront acceptées que dans le nouveau format (AFNOR, 2014).

Pour tenir compte de cette période de transition, pendant lequel les FDES de la base INIES adopteront progressivement le nouveau format, les indicateurs considérés dans ce travail sont ceux qui sont communs entre les normes NF P 01-010 et EN 15804. Ainsi, la disponibilité des données pour l'évaluation du bâtiment sera garantie pendant et après cette période de transition.

Pour permettre la comparaison d'alternatives de conception à l'échelle du bâtiment, les indicateurs ont été normalisés par rapport à la surface de plancher du bâtiment et à la période de référence du calcul. De cette façon, les indicateurs environnementaux sélectionnés pour caractériser la performance environnementale des bâtiments, ainsi que leurs unités, sont montrés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Critères et indicateurs environnementaux sélectionnés.

Catégorie de critère	**Indicateur de performance**	**Unités**
Utilisation de ressources physiques	Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	$kWh_{EP}/(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Consommation d'eau	$L/(m^2_{plancher}\cdot année)$
Impacts sur l'environnement	Potentiel de réchauffement climatique	kg CO_2-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg SO_2-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg C_2H_4-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC 11-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$
Génération de déchets	Déchets dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Déchets non dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$
	Déchets radioactifs éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$

Similairement, il est important de mentionner qu'en plus des produits de construction, l'autre contributeur principal à la performance environnementale du bâtiment est la consommation d'énergie pendant la phase d'exploitation. Les profils environnementaux des sources d'énergie typiquement utilisées dans les bâtiments, tels que l'électricité et le gaz naturel, sont nécessaires pour l'évaluation des impacts environnementaux correspondants. Ces profils sont également disponibles en France sous le format défini par la norme NF P 01-010. Ce format sera mis à jour selon la nouvelle norme de manière parallèle au cas des produits de construction.

En plus de la base INIES, d'autres sources de FDES sont actuellement disponibles en France :

- La base de données du Programme PEP ecopassport, qui propose les déclarations sur la qualité environnementale des équipements électriques, électroniques et de génie climatique, sous la forme des Profils Environnementaux Produits (PEP) (PEP ecopassport, 2014).
- L'outil ELODIE, qui est un logiciel en interface web développé par le CSTB pour le calcul des impacts environnementaux à l'échelle du bâtiment. ELODIE contient des FDES de type générique pour des produits de construction ainsi que des profils environnementaux des sources d'énergie (CSTB, 2014).

- La plateforme DIOGEN (Données d'Impact pour les Ouvrages de Génie Civil), une base de données spécifique pour les déclarations environnementales des matériaux utilisés dans la réalisation des ouvrages de génie civil (DIOGEN, 2014).

L'évaluation de la performance environnementale à l'échelle du bâtiment est basée sur les principes d'application des normes XP P 01-020-3 et EN 15978. De manière générale, chaque type de produit de construction ou consommation d'énergie est associé à un profil environnemental, qui décrit ses impacts environnementaux par unité fonctionnelle. L'évaluation de l'impact environnemental global à l'échelle du bâtiment est alors calculé par la somme du nombre d'unités fonctionnelles de chaque type de produit ou consommation énergétique mis en œuvre pendant la période d'analyse du cycle de vie du bâtiment multipliés par leurs profils environnementaux associés.

Les FDES intègrent tous les impacts environnementaux dans la vie typique d'un produit de construction. Le format de ces fiches de profils environnementaux divise le cycle de vie d'un produit de construction en cinq étapes :

- Production : cette étape comprend la fabrication du produit ainsi que l'extraction, la préparation et le transport des matières premières nécessaires.
- Transport au site de construction : Cette étape comprend le transport du produit de l'usine de production jusqu'au site où il sera mis en œuvre.
- Mise en œuvre : cette étape est donnée par la mise en place du produit dans un ouvrage. Le transport des déchets de mise en œuvre, tels que les chutes de découpe et les consommables, est également pris en compte.
- Vie en œuvre : cette étape comprend la période pendant laquelle le produit assure sa fonction dans le bâtiment, définie comme la durée de vie typique du produit (DVT). Le bilan environnemental durant cette période peut comprendre l'entretien, la maintenance et de remplacement partiel du produit.
- Fin de vie : cette étape consiste dans le traitement ultime du produit à la fin de sa vie utile dans l'ouvrage, lors d'une opération de démolition, réhabilitation ou entretien.

En outre, étant donné que l'objectif de ce travail est de guider la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments, le périmètre d'analyse est limité aux éléments ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique. Les composants du bâtiment intégrant le périmètre d'analyse ainsi que les hypothèses de l'évaluation environnementale seront présentées en détail dans la section 2.3.1 de ce travail.

La performance environnementale du bâtiment est ainsi caractérisée en utilisant un ensemble d'indicateurs représentatifs et cohérents avec les principes de la présente méthodologie d'évaluation. L'existence d'une base nationale de profils environnementaux d'accès libre et publique assure la disponibilité de données d'entrée pour alimenter la méthode de calcul des indicateurs sélectionnés.

2.2.3. Aspects économiques

Comme commenté dans l'étude de l'état de l'art, l'intérêt pour l'analyse de la performance économique du bâtiment est relativement récent (SuPerBuildings, 2012). En règle générale, la pratique courante est limitée dans la phase de conception au chiffrage de l'investissement initial pour valider la compatibilité du projet avec l'enveloppe financière des travaux. Néanmoins, les nouvelles tendances dans l'industrie du bâtiment obligent à élargir cette approche vers une vision plus globale du cycle de vie du bâtiment.

Le renforcement des exigences au niveau de la performance énergétique des bâtiments a comme conséquence une réduction des consommations d'énergie pendant la phase d'utilisation, qui se traduit par la réduction des coûts d'exploitation. Par contre, la mise en place de stratégies d'économie d'énergie peut entraîner une augmentation de l'investissement initial. Pour répondre à cette possible modification de la structure des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, une approche basée sur le principe du coût global est proposée dans ce travail.

L'évaluation du coût global, aussi appelé par son nom en anglais Life Cycle Costing (LCC), est une approche analogue à l'analyse de cycle de vie des aspects environnementaux. Cet indicateur représente la somme de toutes les dépenses associées au bâtiment tout au long de son cycle de vie, compte tenu d'un taux d'actualisation pour la prise en compte des coûts différés dans le temps. Cette méthode d'évaluation économique a été proposée par les normes ISO 15686-5 (ISO/TC 59, 2008) et EN 15643-4 (CEN/TC 350, 2012), et utilisée dans les projets SuPerBuildings, OPEN HOUSE et HQE Performance.

En suivant l'approche de la démarche HQE Performance, deux indicateurs supplémentaires sont considérés dans ce travail afin de complémenter la vision globale de l'indicateur du coût global : le coût de construction et le coût d'exploitation. Cette décomposition permet d'analyser séparément les coûts économiques des deux étapes d'intérêt du cycle de vie du bâtiment. Ainsi, les trois indicateurs sélectionnés pour l'évaluation de la performance économique du bâtiment ainsi que leurs unités sont montrés dans le tableau 2.2.

De manière analogue à l'évaluation de la performance environnementale du bâtiment, le périmètre d'analyse du coût global est limité dans ce travail aux consommations d'énergie des systèmes techniques associées à la performance énergétique et aux composants du bâti ayant une influence déterminante sur ces consommations. Egalement, les indicateurs économiques sont normalisés par rapport à la surface de plancher du bâtiment.

Tableau 2.2. Critère et indicateurs économiques sélectionnés.

Catégorie de critère	Indicateur de performance	Unités
Coût économique	Coût global	€/$m^2_{plancher}$
	Coût de construction	€/$m^2_{plancher}$
	Coût d'exploitation	€/$m^2_{plancher}$

En ce qui concerne les sources de données économiques, plusieurs références ont été identifiées pour chiffrer les constructions en France. D'une part, plusieurs bases de données de prix de produits de construction sont disponibles, telles que les catalogues proposés par Batiprix (Batiprix, 2011), BATITEL (Office des Prix du Bâtiment, 2014) et l'Annuel des Prix BTP (Batiactu Groupe, 2014). D'autre part, la base de données Pégase du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie diffuse des statistiques du contexte énergétique français, y compris des données sur l'évolution annuelle de prix des ressources énergétiques en France (MEDDE, 2014).

2.2.4. Aspects sociaux

Étant donné que l'objectif de cette étude est la sélection d'indicateurs pertinents pour la conception énergétique du bâtiment, seulement les catégories directement liées à la performance énergétique ont été prises en compte. Dans le cas de la dimension sociale, uniquement la catégorie de santé et confort des occupants a été prise en compte, car elle a été considérée comme la seule à être directement impactée par les décisions de la conception énergétique d'un bâtiment, tel que proposé par les projets SuPerBuildings, OPEN HOUSE et SBA Framework for Common Metrics. Cette catégorie est divisée en quatre sous-catégories liées à la qualité de l'environnement intérieur :

- Confort hygrothermique
- Confort visuel
- Confort acoustique
- Qualité de l'air

La sélection des indicateurs pour caractériser ces critères a été faite avec l'objectif d'identifier les paramètres ayant un lien direct avec la perception de confort des occupants, en tenant compte de la faisabilité de leur estimation dans les premières phases de conception d'un bâtiment.

2.2.4.1.Confort hygrothermique

Le confort hygrothermique représente la satisfaction psychologique des conditions physiques adaptées de critères de qualité de l'environnement intérieur tels que la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air dans un espace du bâtiment. Le nombre de facteurs à prendre en compte peut varier en fonction du modèle de confort choisi par le concepteur, de telle façon qu'un indicateur général qui prend en compte cette considération a été sélectionné : le pourcentage de temps de confort thermique.

Cet indicateur est proposé comme une généralisation de l'indicateur « Confort d'été » pris en compte dans l'annexe technique de la démarche HQE Performance, et représente une approche assez générale pour pouvoir être compatible avec les différents modèles de confort hygrothermique normalement utilisés. Le tableau 2.3 montre ainsi l'indicateur sélectionné pour caractériser le confort hygrothermique ainsi que son unité de mesure.

Tableau 2.3. Critère et indicateur de confort hygrothermique sélectionnés.

Catégorie de critère	Indicateur de performance	Unités
Confort hygrothermique	Pourcentage de temps de confort thermique	$\%_{temps\text{-}occupation}$

Cet indicateur comptabilise le pourcentage du temps d'occupation d'un espace où les conditions hygrothermiques correspondent à la plage de confort définie dans le cahier de charges de l'ouvrage. Il existe plusieurs modèles de confort (Djongyang *et al.*, 2010), les plus utilisés étant :

- Intervalle de températures de confort : cette approche décrit de manière très simple les conditions de confort thermique par la comparaison de la température intérieur avec une fourchette de valeurs acceptables.
- Approche dite « rationnelle » ou du bilan thermique : cette méthode prend en compte six facteurs déterminants du confort hygrothermique (température, humidité et vitesse relative de l'air, température radiante des parois, métabolisme et habillement des occupants) et permet d'estimer les indicateurs Predicted Mean Vote (PMV) (vote moyen prévisible) et Percentage Dissatisfied (PPD) (pourcentage prévisible d'insatisfaits).
- Confort adaptatif : dans ce modèle développé par De Dear et par Brager, généralement appelé simplement Zone de Brager, la température de confort des occupants peut être considérée comme une fonction des conditions météorologiques extérieures. Ce modèle est valable dans les espaces non climatisés où l'ouverture et la fermeture des fenêtres reste le moyen essentiel pour la régulation des conditions thermiques.

Même si le confort hygrothermique peut dépendre d'un grand nombre de paramètres, un modèle thermique basé sur un intervalle de températures acceptables est le plus répandu dans la pratique actuelle, du fait de sa simplicité de mise en œuvre. Le fait de se limiter à l'observation d'un seul paramètre permet de simplifier le calcul des conditions intérieures des espaces, en limitant ainsi la complexité du modèle de simulation thermique dynamique à mettre en place.

Dans ce modèle de confort, deux températures sont généralement utilisées : la température de l'air intérieur et la température opérative de l'ambiance intérieure. Cette dernière peut être définie comme la valeur moyenne entre la température moyenne des surfaces à l'intérieur d'un espace et celle de l'air intérieur (ASHRAE, 2004).

Afin de simplifier le niveau de détail du modèle de simulation thermique dynamique, tout en restant en cohérence avec les pratiques actuelles dans l'industrie du bâtiment, un modèle de confort de type intervalle de températures opératives a été choisi pour la première application de la présente méthodologie.

2.2.4.2.Confort visuel

Pour l'analyse du confort visuel, deux approches sont disponibles dans la littérature : le niveau d'éclairement dans les espaces et l'accès à la lumière naturelle. Ce dernier est d'un intérêt particulier

pour les bâtiments de bureaux. D'un côté, l'accès à la lumière naturelle est associé à une perception de bien-être des occupants, qui favorise d'ailleurs une augmentation de leur productivité. D'un autre côté, il permet la minimisation des besoins en éclairage artificiel, qui actuellement représente un contributeur important à la consommation d'électricité dans les bureaux (World Green Building Council, 2013).

Par conséquent, un indicateur quantifiant à la fois l'accès à la lumière du jour et son effet sur la consommation en éclairage artificiel a été sélectionné : le pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel. Comme montré dans le tableau 2.4, cet indicateur est donné comme le pourcentage du temps d'occupation durant lequel un espace pourra se passer de l'éclairage artificiel.

Tableau 2.4. Critère et indicateur de confort visuel sélectionnés.

Catégorie de critère	**Indicateur de performance**	**Unités**
Confort visuel	Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel	$\%_{temps\text{-}occupation}$

De manière générale, un espace peut être considéré comme autonome en éclairage naturel quand la valeur de l'éclairement intérieur est supérieure au niveau requis selon le type d'activités qu'il abrite. D'une part, le niveau d'éclairement requis des espaces de bureaux est normalement considéré égal à 500 lux, comme proposé dans la norme EN 15251 (CEN/TC 156, 2012). D'autre part, la disponibilité d'éclairement à l'intérieur d'un espace représente une tâche plus complexe, puisqu'il dépend des conditions lumineuses disponibles à l'extérieur, de la surface vitrée de la façade ainsi que des caractéristiques géométriques et optiques des surfaces intérieures.

Pour simplifier le calcul du niveau d'éclairement à l'intérieur de l'espace, dans ce travail son estimation passe par le calcul du Facteur de Lumière du Jour moyen (FLJ). Ce paramètre, couramment utilisé pour évaluer le potentiel d'accès à la lumière naturelle, est donné comme le rapport de l'éclairement intérieur reçu en un point du plan de référence, à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale par un ciel complètement couvert (Université catholique de Louvain, 2014). L'utilisation du Facteur de Lumière du Jour permet non seulement d'intégrer les caractéristiques géométriques et optiques de l'espace dans un seul paramètre, mais aussi utiliser les conditions d'un ciel couvert comme hypothèse simplificatrice pour le calcul.

Néanmoins, le choix d'utiliser un indicateur calculé à partir du Facteur de Lumière du Jour moyen a un côté réducteur, du fait des caractéristiques intrinsèques de ce paramètre. L'utilisation d'une valeur moyenne pour représenter un espace entraîne une perte importante d'information en ce qui concerne les valeurs extrêmes qui peuvent êtres trouvées : des valeurs de FLJ très importantes près des baies vitrées et d'autres beaucoup moins au fond des espaces. Nonobstant, la simplicité de son calcul permet d'obtenir des résultats pertinents dans les premières phases de projet, en accord avec les principes de la méthodologie ici présentée.

2.2.4.3.Confort acoustique

Dans le domaine de l'acoustique du bâtiment, il existe deux types d'exigences dans la réglementation (Meisser, 2014) :

- Correction acoustique : modification (amélioration) du rendu sonore d'un local.
- Isolation acoustique : minimisation du niveau du bruit produit en extérieur du local entrant dans celui-ci.

La première de ces exigences, la correction acoustique, est surtout liée à l'aménagement intérieur en termes des matériaux absorbants. Les décisions de conception à prendre pour atteindre cette exigence n'ont pas un lien fort avec la performance énergétique du bâtiment. C'est pour cette raison que ce type d'exigence n'a pas été pris en compte dans cette étude.

Par contre, les décisions de conception liées à l'isolation acoustique concernent la composition des surfaces délimitant un local, notamment l'enveloppe du bâtiment, un élément clé dans sa performance thermique. Pour cette étude, on cherche un indicateur pour valider la composition de l'enveloppe d'un point de vue acoustique, pour ainsi assurer une protection acoustique suffisante vis-à-vis des sources de bruit extérieures telles que les transports, l'activité humaine, la faune, les conditions météorologiques, etc. (Semidor *et al.*, 2011).

Tableau 2.5. Critère et indicateur de confort acoustique sélectionnés.

Catégorie de critère	**Indicateur de performance**	**Unités**
Confort acoustique	Isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission	dB

Comme montré dans le tableau 2.5, un indicateur qui caractérise la capacité de l'enveloppe d'un bâtiment à bien l'isoler des sources sonores externes a été sélectionné : le niveau d'isolement acoustique standardisé pondéré, pour un bruit de trafic à l'émission. Le choix de cet indicateur permet de caractériser la composition de l'enveloppe du point de vue acoustique, afin d'assurer une bonne compatibilité entre les décisions de conception au niveau des isolements thermique et acoustique.

2.2.4.4.Qualité de l'air intérieur

Afin de caractériser la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment, un indicateur faisant le lien entre les actions d'amélioration et l'occupation des espaces a été sélectionné : le pourcentage attendu de satisfaits. Ce paramètre caractérise la perception de la qualité de l'air par les occupants en fonction du taux de renouvellement d'air, qui est la quantité d'air frais introduit dans un espace pour l'élimination des polluants de l'air intérieur. Ces polluants comprennent les émissions biologiques, tels que le dioxyde de carbone, ou des produits chimiques libérés par les produits de construction, tels que le formaldéhyde.

Le pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur est estimé d'après les catégories proposées dans la norme européenne EN 15251. Dans cette norme, des catégories données en fonction de pourcentages d'occupants insatisfaits sont définies en fonction du débit de renouvellement d'air par occupant. Afin de garder une logique de maximisation dans les indicateurs de confort des occupants de ce travail, le pourcentage complément de ce paramètre a été retenu, c'est-à-dire le ratio des occupants qui sont attendus d'être satisfaits avec la qualité de l'air intérieur.

Ainsi, l'indicateur sélectionné pour caractériser les conditions de la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment, ainsi que son unité, est montré dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6. Critère et indicateur de qualité de l'air intérieur sélectionnés.

Catégorie de critère	Indicateur de performance	Unités
Qualité de l'air intérieur	Pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur	$\%_{occupants}$

Le modèle considère seulement la pollution due à l'occupation (émission de bioeffluents), ce qui représente la pratique actuelle dans l'industrie de construction. La pollution due au bâtiment lui-même (émissions par les matériaux, équipements, etc.) n'est pas prise en compte, puisqu'il n'existe actuellement aucun consensus scientifique sur une méthodologie pour estimer correctement ces valeurs au cours de la phase de conception (SuPerBuildings Consortium, 2012). De plus, les éléments les plus contributeurs pour la partie produits, tels que types spécifiques de revêtements ou le mobilier, sont définis lors de la phase Projet ou même après, ce qui reste en dehors du cadre de ce travail.

2.2.5. Discussion

Les indicateurs sélectionnés dans ce travail permettent d'offrir au concepteur une vision globale de la performance énergétique du bâtiment, adaptée au niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases de conception.

L'ensemble de ces indicateurs représente une base solide pour l'évaluation d'alternatives de conception énergétique à travers le concept de la durabilité. Cette évaluation est en effet basée sur la caractérisation de la performance énergétique du bâtiment par l'utilisation d'indicateurs objectifs et quantitatifs. Cette approche est utilisée dans les plus récentes initiatives dans le domaine de l'évaluation de la durabilité dans le bâtiment.

Comme montré dans la figure 2.3, les valeurs des seize indicateurs sélectionnés, à calculer à travers de la méthode d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment, sont proposés au concepteur comme éléments d'aide à sa prise de décisions de conception énergétique.

Afin de conserver l'information et la fiabilité, tout en apportant des éléments utiles dans la prise de décisions, la présentation des résultats de l'évaluation est faite au niveau des indicateurs individuels, sans avoir recours à des coefficients de pondération subjectifs pour leur agrégation. En raison de la nature comparative des indicateurs venant d'une approche de type cycle de vie (indicateurs

environnementaux et économiques), l'identification de points de repère pour leur interprétation permet d'améliorer leur intelligibilité ou compréhension par les concepteurs (Ventura, 2012).

Deux approches comparatives sont alors proposées dans cette méthodologie pour l'interprétation des valeurs des indicateurs de performance :

- La comparaison avec des valeurs de référence venant du cadre réglementaire français ou des bonnes pratiques dans le secteur de la construction.
- Le calcul de la variation en pourcentage des indicateurs avec une configuration de bâtiment de référence qui soit adaptée au contexte du projet de construction.

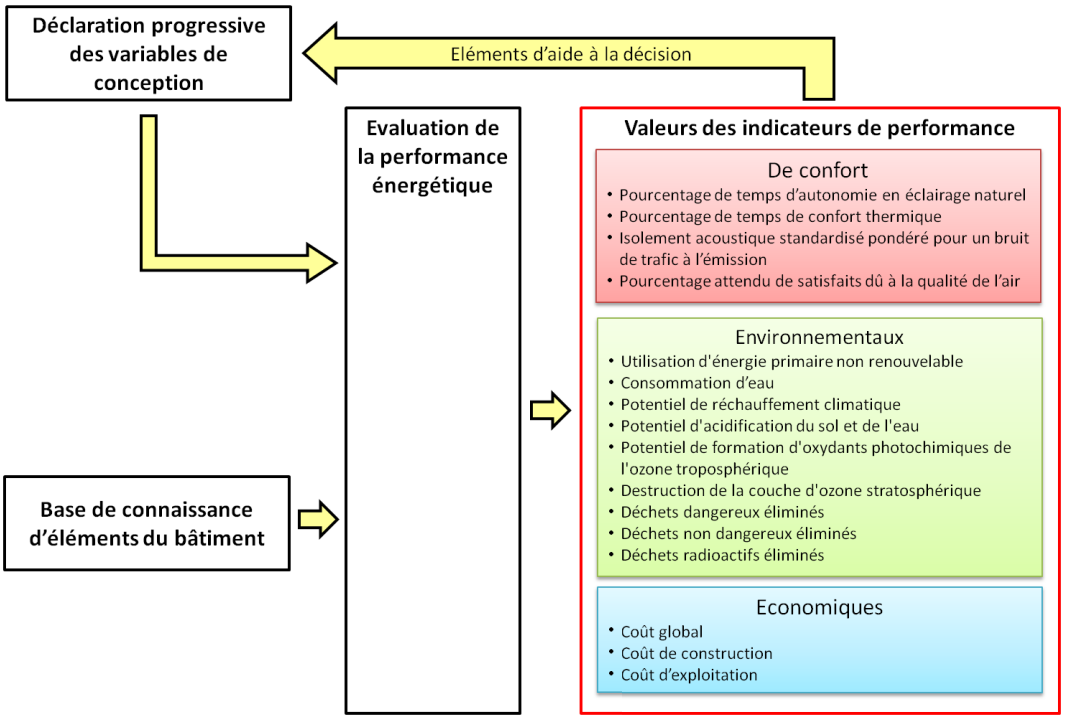

Figure 2.3. Indicateurs de performance énergétique.

2.3. Méthode de calcul des indicateurs de performance

Afin d'évaluer les indicateurs de performance présentés dans la section précédente, une méthode de calcul a été mise en place dans ce travail. Cette méthode est composée de différents modèles de calcul, chacun axé sur un aspect spécifique associé à la performance du bâtiment.

Le choix des modèles de calcul a été fait de manière parallèle à la sélection des indicateurs de performance et partage les mêmes principes de sélection de base. De plus, les modèles de calcul ont été choisis de manière à satisfaire les conditions suivantes :

- Compatibilité entre les paramètres d'entrée des modèles et le niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases du processus de conception du bâtiment.

- Simplicité dans l'algorithme de calcul, pour réduire le temps de simulation numérique et ainsi permettre une exploration plus rapide de l'espace de décisions disponible à chaque phase de conception.
- Représentativité et fiabilité des résultats des modèles de calcul pour modéliser de manière pertinente les performances du bâtiment.

De manière à garantir la satisfaction de cette troisième condition requise, des documents normatifs et autres ouvrages de référence ont été utilisés comme point de départ pour la définition des modèles de calcul des indicateurs. Des modifications ont été faites pour adapter les modèles au contexte particulier de ce travail, principalement en ce qui concerne le périmètre d'analyse et les contraintes liées au niveau de précision des données d'entrée.

Comme montré dans la figure 2.4, la méthode de calcul (entourée en rouge) permet d'évaluer la performance énergétique des alternatives de conception définies à partir de la logique de déclaration progressive des variables de conception. Les résultats de l'évaluation, les valeurs des indicateurs de performance, sont proposés au concepteur comme éléments d'aide à la prise de décisions de conception.

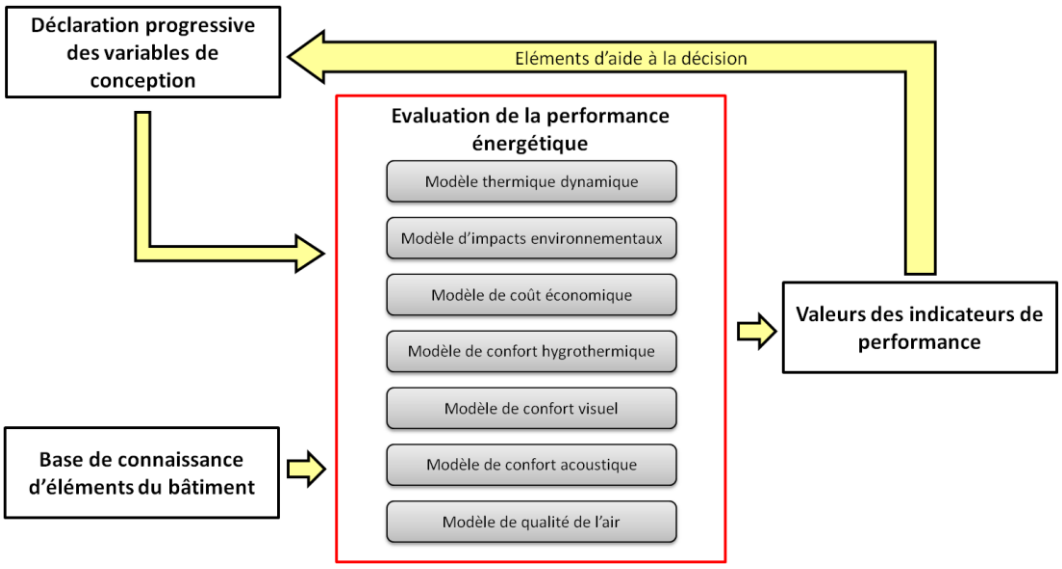

Figure 2.4. Les différents modèles composant la méthode de calcul des indicateurs de performance.

La méthode de calcul des indicateurs de performance est composée de sept modèles différents :

- Modèle de simulation thermique dynamique : calcul des températures à l'intérieur des espaces, des besoins et consommations énergétiques des postes réglementaires à l'échelle du bâtiment ainsi que de leurs puissances maximales demandées tout au long d'une année type. Les résultats obtenus à partir de ce modèle sont utilisés comme entrées dans les modèles d'impacts environnementaux, de coûts économiques et de confort hygrothermique.
- Modèle d'impacts environnementaux : calcul de l'ensemble des indicateurs environnementaux à l'échelle du bâtiment.

- Modèle de coûts économiques : calcul des indicateurs des coûts global, de construction et d'exploitation à l'échelle du bâtiment.
- Modèle de confort hygrothermique : calcul du pourcentage de temps de confort thermique dans les espaces d'intérêt du bâtiment.
- Modèle de confort visuel : calcul du temps d'autonomie en éclairage naturel dans les espaces d'intérêt du bâtiment. Les résultats obtenus à partir de ce modèle sont utilisés comme des données d'entrée dans le modèle de simulation thermique dynamique.
- Modèle de confort acoustique : calcul du niveau d'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission des façades principales du bâtiment.
- Modèle de qualité de l'air intérieur : calcul du pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur à l'échelle du bâtiment.

Il est important de mentionner que dû à leur nature de type inventaire de cycle de vie, les modèles d'impacts environnementaux et de coûts économiques partagent une étape de pré-calcul dédiée à la quantification des produits de construction mis en œuvre dans le bâtiment. Dans cette étape, le nombre d'unités de chaque type de produit de construction à employer dans le bâtiment tout au long de son cycle de vie est calculé. Les principes de ce modèle de quantification seront présentés dans la description du modèle des indicateurs environnementaux, mais ses résultats seront également utilisés comme entrées dans le modèle des indicateurs économiques.

Afin de simplifier la saisie d'information par le concepteur, une base de connaissance d'éléments du bâtiment a été construite pour être intégrée à la méthode de calcul des indicateurs. Construite sous la forme d'une base de données, elle comprend les informations environnementales, économiques et techniques des composants et ressources énergétiques qui sont nécessaires pour la modélisation du bâtiment.

Dans un premier temps, le périmètre d'analyse pris en compte dans cette méthode sera présenté, en identifiant les composants du bâtiment et les postes de consommation à considérer dans ce calcul. Ceci sera suivi par la description de la typologie du bâtiment considérée dans cette première version de l'outil d'évaluation. Les différents modèles de calcul seront alors discutés en détail, en décrivant leurs principes et hypothèses de calcul ainsi que leur adaptation au contexte de ce travail. Enfin, la structure d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment sera présentée.

2.3.1. Définition du périmètre d'analyse

Comme dans toute méthode d'évaluation, la définition du périmètre d'analyse doit être cohérente avec l'objectif de l'étude. Dans le cas présent, l'objectif est de caractériser la performance énergétique d'une alternative de conception définie par les décisions à prendre dans les premières phases d'un projet de construction. Le résultat de cette évaluation permettra la comparaison quantitative des différentes possibilités de choix, pour ainsi donner au concepteur des éléments pour guider sa prise de décisions.

Par conséquent, le périmètre d'analyse doit considérer :

- Les éléments du bâtiment ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique, telle que définie dans la section 2.2.1 de ce travail.
- Les composants de ces éléments qui sont concernés par les décisions de conception à prendre dans les premières phases d'un projet de construction, lesquelles seront décrites en détail dans la section 2.4.

Autrement dit, les éléments à prendre en compte dans l'évaluation des indicateurs de performance sont ceux dont la sélection et le dimensionnement ont des effets sur la performance énergétique du bâtiment et qui en même temps font partie de la faculté d'action de la maîtrise d'œuvre dans les phases de conception concernées.

Ceci se différencie d'une analyse de coûts pour le chiffrage des projets ou d'une évaluation destinée à la déclaration environnementale des bâtiments, comme c'est le cas des certifications environnementales présentées lors de l'étude de l'état de l'art. Dans ces deux cas, le périmètre d'analyse vise à être aussi exhaustif que possible et comprend normalement l'ensemble des éléments constituant un bâtiment, voire toutes les parties de l'ouvrage dans la parcelle. Par contre, quand l'objectif d'une évaluation est de comparer plusieurs alternatives de conception pour donner des éléments de décision, l'analyse peut se limiter aux éléments du bâtiment qui ont une influence sur les critères évalués et qui peuvent être impactés par la prise de décisions.

Dû à la nature des indicateurs de performance énergétique sélectionnés, deux niveaux d'observation sont identifiés dans l'évaluation :

- A l'échelle du bâtiment dans le cas des indicateurs environnementaux et économiques.
- A l'échelle des sous-parties du bâtiment dans le cas des indicateurs de confort et santé des occupants.

2.3.1.1.Indicateurs environnementaux et économiques

Le périmètre d'analyse des indicateurs environnementaux et économiques comprend deux types de processus associés au cycle de vie du bâtiment :

- L'utilisation de produits de construction, dans la phase de construction du bâtiment et pendant son exploitation (en raison du remplacement des composants).
- La consommation de ressources énergétiques par les postes réglementaires, pendant la phase d'exploitation du bâtiment.

Comme mentionné précédemment, les modèles de calcul des indicateurs environnementaux et économiques partagent une logique de type inventaire de cycle de vie. Dans ces modèles, chaque unité fonctionnelle de produit de construction mis en œuvre, ou de ressource énergétique consommée, est associée à une contribution environnementale et économique spécifique. Suivant cette logique, les contributions individuelles de tous les produits et consommations mises en œuvre dans une période d'analyse déterminée sont agrégées de manière à obtenir comme résultat leur contribution totale au niveau du bâtiment.

L'analyse de cycle de vie pour un bâtiment est normalement faite sur la base de sa durée de vie, telle que définie par le maître d'ouvrage et/ou le maître d'œuvre dans le programme fonctionnel. Cette période temporelle est appelée durée de vie requise dans la norme EN 15978 et durée de vie programmée dans la norme XP P01-020-3. Néanmoins, la prise en compte de la totalité de la durée de vie du bâtiment comme base de l'évaluation pose des questions au niveau des possibles évolutions des usages et fonctions du bâtiment.

Pour répondre à cette problématique, dans ce travail la durée de la période de référence pour le calcul a été fixée à une valeur de 50 ans, de manière conforme avec les règles d'application de la démarche HQE Performance (Association HQE, 2014) et ses deux études de modélisation du cycle de vie de bâtiments (CSTB, 2011 et CSTB, 2013). Cette approche a l'avantage de permettre la comparaison des résultats de l'évaluation des indicateurs environnementaux avec les résultats obtenus lors de ces études de modélisation.

En cohérence avec cette définition de la période d'analyse du cycle de vie du bâtiment, aucun scénario de réhabilitation ni de démolition-reconstruction n'a été considéré. Seuls les remplacements à l'identique des produits et équipements dont la durée de vie estimée est inférieure à la période d'étude sont inclus dans le périmètre d'analyse.

En ce qui concerne l'utilisation de produits de construction, la définition des frontières de l'étude a été effectuée en fonction de deux critères différents :

- Le niveau d'influence des éléments sur la performance énergétique du bâtiment.
- La faculté d'action de la maîtrise d'œuvre dans les premières phases de conception.

Tableau 2.7. Eléments du bâtiment considérés dans le périmètre d'analyse des produits de construction et leur décomposition en composants de construction.

Eléments du bâtiment	Composants
Fenêtres	Vitrages
	Menuiseries
	Protections solaires
Murs de l'enveloppe	Matériau structurel
	Isolation thermique
Toit	Matériau structurel
	Isolation thermique
Cloisons	Matériau structurel
Planchers intermédiaires	Matériau structurel
Plancher bas	Matériau structurel
	Isolation thermique
Système de chauffage	Système de production de chaleur
Système de refroidissement	Système de production de froid
Façade double peau vitrée	Vitrages
	Cadres support

Dans un premier temps, le bâtiment est décomposé en des éléments ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique. Comme discuté dans la section 1.1.1, ces éléments représentent de manière générale la composition de l'enveloppe, le choix des matériaux et les systèmes techniques. Subséquemment, les principaux composants constituant ces éléments ont été

identifiés en lien avec les types de décisions de conception à prendre dans les phases concernées. La décomposition du bâtiment en des éléments et composants définissant le périmètre d'analyse des produits de construction est montrée dans le tableau 2.7.

Cette vision du bâtiment est cohérente avec les principes de simplicité et représentativité de la méthode d'évaluation proposée dans ce travail, par décomposition de chaque élément en un nombre réduit de composants indépendants :

- Les fenêtres, représentant les surfaces vitrées de l'enveloppe, sont composées de vitrages, de menuiseries et de protections solaires.
- Les surfaces opaques de l'enveloppe, y compris murs, toit et plancher bas, sont constituées par du matériau structurel et de l'isolation thermique.
- Dans le cas des surfaces intérieures, données par les cloisons et les planchers intermédiaires, seulement le matériau structurel est à prendre en compte.
- Pour les équipements techniques, les systèmes de chauffage et de refroidissement sont considérés par la prise en compte des systèmes de production de chaleur et de froid respectivement.
- Pour une façade double peau vitrée, les composants à prendre en compte sont les vitrages et les cadres support constituant la structure porteuse.

Comme identifié dans les études de modélisation HQE Performance, la disponibilité de données environnementales est une des barrières les plus importantes dans l'analyse de la performance énergétique des bâtiments. Dans le cas du présent travail, le manque de profils environnementaux compatibles avec le format des indicateurs sélectionnés a empêché la prise en compte d'une partie des éléments du bâtiment dans le calcul de l'utilisation des produits de construction.

C'est notamment le cas des produits associés aux systèmes de ventilation et d'éclairage artificiel, pour lesquels les contributions environnementales ne sont pas prises en compte dans cette première version de la méthode d'évaluation proposée. Toutefois, leurs besoins énergétiques sont intégrés dans le calcul des consommations d'énergie. Pour la même raison, d'autres composants auxiliaires, notamment les réseaux de distribution et les émetteurs de chaleur et de froid, ainsi que d'autres éléments tels que les bardages de façade, ne sont pas pour l'instant considérés dans cette méthode d'évaluation.

En plus des éléments sélectionnés pour l'évaluation de la performance énergétique, il y a d'autres types d'éléments qui peuvent avoir une influence importante sur le coût ou les impacts environnementaux associés au bâtiment. Ceci est le cas des éléments dont la fonction est liée spécifiquement à la structure ou à l'esthétique du bâtiment. Etant donné que leur influence sur les besoins d'énergie des postes réglementaires peut être considérée comme négligeable, ces éléments n'ont pas été intégrés au périmètre d'analyse.

En ce qui concerne la consommation de ressources énergétiques, le périmètre de l'étude comprend les consommations associées aux usages réglementaires tels qu'identifiés dans la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (Parlement européen, 2002), à l'exception du poste de production d'eau chaude sanitaire. Comme discuté dans la présentation de la vision fonctionnelle du bâtiment du point de vue énergétique (section 2.2.1), les besoins énergétiques associés à ce poste sont généralement négligeables et une partie considérable des

projets de bureaux dans la base de projets de l'Observatoire BBC ne l'intègrent pas du tout. Par conséquent, ce poste réglementaire n'a pas été pris en compte dans le périmètre d'analyse de ce travail.

La consommation de ressources énergétiques de chacun des usages considérés est calculée à partir des besoins énergétiques moyens annuels des équipements techniques associés, dans des conditions normales d'exploitation du bâtiment. De cette façon, les postes de consommation d'énergie à considérer dans l'analyse de la performance énergétique du bâtiment et leurs équipements associés sont données dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8. Postes de consommation énergétique et leurs équipements techniques associés.

Poste de consommation énergétique	Equipement technique associé
Chauffage	Système de production de chaleur
Refroidissement	Système de production de froid
Ventilation	Système de renouvellement d'air mécanique
Eclairage	Systèmes d'éclairage artificiel des espaces intérieurs

2.3.1.2.Indicateurs de confort des occupants

Dans le cas des fonctions de confort des occupants, l'échelle d'évaluation des indicateurs de performance est dans la majorité des cas différente à celle du bâtiment. Ceci est dû à la diversité des valeurs des paramètres décrivant les conditions des différents espaces composant le bâtiment.

L'échelle d'évaluation de chaque indicateur de confort dépend ainsi de la nature de son modèle de calcul : son principe de calcul et ses hypothèses. Par conséquent, pour obtenir une valeur représentative au niveau du bâtiment, les résultats individuels associés aux différents espaces d'étude doivent être intégrés pour pouvoir remonter en échelle. Les échelles d'évaluation des indicateurs de confort des occupants sont données comme suit :

- Confort hygrothermique : au niveau des zones thermiques du bâtiment.
- Confort visuel : au niveau des zones thermiques du bâtiment.
- Confort acoustique : au niveau des façades du bâtiment.
- Qualité de l'air intérieur : au niveau du bâtiment dans son ensemble.

Dans le cas du confort de type hygrothermique et visuel, les modèles de calcul tiennent compte d'une hypothèse de homogénéité des conditions dans les zones thermiques par la prise en compte de valeurs moyennées pour le calcul des indicateurs. Pour ces deux types d'indicateurs, la valeur à l'échelle du bâtiment est donnée dans ce travail par l'agrégation des résultats individuels de chaque zone thermique en fonction de sa surface de plancher. Ceci est fait en considérant l'évaluation des deux types d'espaces d'intérêt de cette étude : les espaces de bureaux et les salles de réunion.

En ce qui concerne à l'indicateur de confort acoustique, deux hypothèses similaires d'homogénéité sont considérées au niveau des façades du bâtiment : d'une part, chaque façade est considérée ayant

une répartition homogène des surfaces vitrées, et d'autre part, la composition des murs de l'enveloppe est donnée comme régulière. Dans ce travail, la valeur représentative à l'échelle du bâtiment pour l'indicateur acoustique est définie comme la valeur minimale des deux façades principales en termes de surface.

Dans le cas de l'indicateur de qualité de l'air intérieur, une répartition instantanée et homogène du débit de renouvellement d'air dans le bâtiment est considérée comme hypothèse. De cette façon, le résultat de l'évaluation est directement donné à l'échelle du bâtiment.

2.3.2. Description de la typologie du bâtiment d'étude

La méthode de calcul construite dans ce travail considère un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin de faciliter sa mise en place :

- Le bâtiment est considéré comme une construction indépendante, séparée physiquement d'autres bâtiments voisins. Ainsi, les parois composant l'enveloppe ne sont pas partagées avec d'autres bâtiments et sont considérées toutes en contact avec l'air extérieur.
- Aucun masque proche ou lointain autour du bâtiment n'est pris en compte, telles que des arbres ou d'autres bâtiments. Ceci simplifie la modélisation du rayonnement solaire incident sur les façades ainsi que de la disponibilité de l'éclairement naturel dans les espaces du bâtiment.
- Les baies vitrées sont distribuées de manière homogène sur chaque façade. Ainsi, la surface vitrée d'un espace intérieur quelconque est donnée par sa surface exposée vers l'extérieur et le taux de vitrage de la façade en question.
- Un toit plat de type terrasse et un plancher bas sur terre-plein sont considérés pour simplifier la modélisation de l'échange thermique à travers ces éléments ainsi que l'absorption du rayonnement solaire incident sur la toiture.
- Pour une alternative de conception donnée, une même configuration est considérée pour chaque type d'élément du bâtiment. C'est-à-dire, par exemple, qu'un même profil de composition de mur est donné pour l'ensemble de parois composant l'enveloppe ou qu'un même type de fenêtre est considéré pour toutes les baies vitrées des façades.

Une autre hypothèse simplificatrice considérée dans cette première version de la méthode d'évaluation est liée à la déclaration des aspects géométriques du bâtiment. La déclaration des données géométriques a été identifiée comme une des barrières principales dans l'intégration d'outils d'évaluation de la performance énergétique dans les premières phases de conception (Attia *et al.*, 2012). Pour cette raison, une typologie simple de plan de plancher du bâtiment a été sélectionnée pour cette première version de la méthode d'évaluation.

Cette typologie est donnée par la forme la plus simple des bâtiments : un plan de plancher de forme rectangulaire. Cette forme de plan de plancher est identifiée comme une des plus représentatives des pratiques actuelles dans la conception de bâtiments de bureaux en raison de sa simplicité, mais également en raison d'avantages tels qu'une bonne compacité et un potentiel de captage solaire favorable (Miceli, 2013). D'autres formes de planchers courantes sont les plans de type circulaire, en

forme de L, et avec un atrium ouvert ou fermé (Bazzocchi *et al.*, 2013). La prise en compte de ces autres typologies représente une des perspectives de travail de la présente méthode d'évaluation.

En plus de réduire le nombre de données géométriques à déclarer par le concepteur, la sélection d'une typologie rectangulaire permet une simplification de la méthode de modélisation du bâtiment. Un phénomène physique à considérer dans le cas de formes plus complexes est l'ombrage des surfaces des façades par des éléments du bâtiment lui-même. La modélisation de ce phénomène a besoin d'une analyse avancée sur le parcours diurne du soleil dans le ciel en fonction de l'heure et de la saison. Exempte de ce phénomène d'auto-ombrage, la prise en compte d'une typologie de plan de plancher rectangulaire permet ainsi une modélisation moins complexe et plus facile à mettre en place.

Un plan de plancher rectangulaire a par conséquence deux façades dites principales et deux autres dites latérales, les premières ayant une surface souvent plus importante que les dernières. De ce fait, mais aussi du fait de la distinction de chacune des quatre façades en termes de taux de vitrage, l'orientation du bâtiment par rapport aux points cardinaux joue un rôle considérable dans le comportement thermique des espaces intérieurs, en l'identifiant ainsi comme une décision de conception importante.

En ce qui concerne la différenciation des espaces intérieurs, le bâtiment est décomposé en quatre types d'espaces, représentatifs des usages dans un bâtiment de bureaux. Ces types d'espaces se différencient par leurs besoins de confort ainsi que par leurs scénarios d'occupation et de charges thermiques internes, y compris éclairage et bureautique. Les quatre catégories identifiées comprennent l'ensemble d'espaces composant un bâtiment de bureaux comme suit :

- Bureaux : tous les espaces de travail de bureau, assimilés à une typologie de bureau de type individuel.
- Salles de réunion : salles de réunion et autres espaces de travail collaboratif.
- Circulations : couloirs, escaliers et aires communes.
- Autres espaces : sanitaires, locaux techniques, espaces de stockage, etc.

Parmi ces quatre types d'espaces, deux sont considérés d'intérêt pour l'évaluation des indicateurs de confort des occupants en raison de leur occupation permanente : les bureaux et les salles de réunion. Par conséquent, uniquement les résultats de l'évaluation du confort dans ces espaces seront pris en compte dans le calcul de ces indicateurs à l'échelle du bâtiment.

D'autre part, un modèle d'organisation intérieure a été défini de façon à simplifier la saisie de données géométriques par le concepteur. Ce modèle de répartition d'espaces, représentatif d'une majorité des bâtiments tertiaires, a été défini à partir d'échanges avec les ingénieurs du centre de ressources technologiques Nobatek.

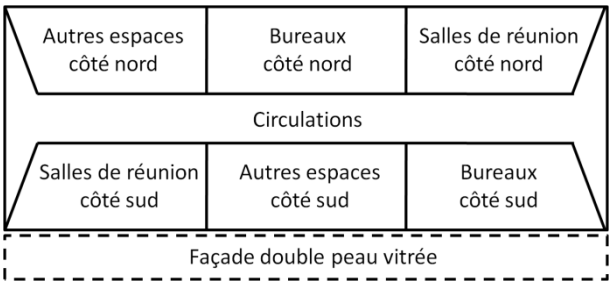

Figure 2.5. Modèle de répartition des zones thermiques.

Ce modèle de répartition spatiale est articulé autour d'un couloir central, avec deux lignes d'espaces différenciés aux côtés et des escaliers placés à ses extrémités. La figure 2.5 montre une représentation schématique de la répartition des espaces dans ce modèle d'organisation intérieure.

Afin de prendre en compte l'asymétrie des conditions de rayonnement solaire dans les deux façades principales, la définition des zones thermiques de l'étude prend en compte une différentiation des espaces en fonction de l'orientation des façades. Ceci permet d'augmenter la finesse de la modélisation thermique et résulte en l'identification de sept zones thermiques dans le bâtiment :

- Bureaux orientés côté sud
- Bureaux orientés côté nord
- Salle de réunion orientée côté sud
- Salle de réunion orientée côté nord
- Autres espaces orientés côté sud
- Autres espaces orientés côté nord
- Circulations

Ces espaces sont homogènes en termes de surface du plancher de part et d'autre des façades principales du bâtiment. De plus, les zones thermiques associées aux espaces de bureaux sont équitablement fractionnées en bureaux individuels en fonction du nombre total de bureaux et du nombre d'étages dans le bâtiment.

En outre, en cas de présence d'une façade double peau vitrée, ce système est considéré comme étant installé au long de la façade principale orientée au sud, en accord avec les pratiques courantes (Poirazis, 2004).

Après avoir présenté la définition du périmètre d'analyse et la description de la typologie du bâtiment d'étude, les sept modèles composant la méthode d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment seront présentés.

2.3.3. Modèle de simulation thermique dynamique

Le modèle de simulation thermique dynamique de bâtiment représente un élément central d'une méthode d'évaluation de la performance énergétique. Dans ce travail, les résultats obtenus à partir

de ce modèle sont le point de départ pour une partie des modèles de calcul des indicateurs de performance :

- Les valeurs maximales des puissances thermiques d'appel, qui déterminent le dimensionnement des systèmes de chauffage et de refroidissement, ont un impact sur le calcul des indicateurs environnementaux et économiques.
- Les besoins thermiques annuels des zones thermiques, qui sont utilisés dans le calcul des consommations énergétiques des systèmes de chauffage et refroidissement ont également un impact sur le calcul des indicateurs environnementaux et économiques.
- Les températures à l'intérieur des zones thermiques à chaque pas de temps de simulation sont des entrées du modèle de calcul de l'indicateur de pourcentage de temps de confort thermique.

Un bon équilibre entre précision dans la modélisation et simplicité du calcul numérique associé est donc essentiel dans le choix du modèle de simulation thermique dynamique. Pour cette raison, une méthode de modélisation simplifiée du comportement thermique du bâtiment, basée sur l'analogie électrique avec des résistances et capacitances thermiques, a été mise en place dans ce travail. Le cœur de calcul, développé à partir de cette méthode, a été complété par d'autres modèles proposés par la réglementation thermique française, y compris un modèle thermique pour représenter la façade double peau vitrée.

2.3.3.1.Modélisation par l'analogie électrique-thermique

Le modèle thermique basé sur l'analogie électrique-thermique répond de manière simple mais efficace à la résolution de l'équation fondamentale de la chaleur de Fourier en régime dynamique à travers une vision nodale et multizone du bâtiment. Le modèle résultant peut être facilement intégré aux modèles de calcul des indicateurs de performance tout en respectant les principes de rapidité de calcul et de simplicité de mise en œuvre dans la méthode d'évaluation ce travail.

Ayant ses origines dans les travaux d'Allard (Allard, 1978) sur l'étude des ponts thermiques des parois, le concept de l'analogie électrique-thermique a été formalisé par Roux (Roux, 1984) et par Caccavelli (Caccavelli *et al.*, 1987) dans leur développement de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments. Plus récemment, Bouyer (Bouyer, 2009) a appliqué ce concept dans l'étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Les principes du modèle thermique mis en place dans le présent travail se réfèrent principalement à la présentation de la méthode de modélisation dans les travaux de ce dernier.

L'outil numérique de simulation thermique dynamique proposé dans le présent travail représente une adaptation du code de simulation CHAMAN, développé par le centre de ressources technologiques Nobatek sur les principes des travaux de Bouyer. Ce code numérique a été précédemment utilisé et validé par Hénon (Hénon *et al.*, 2012) dans le contexte de la rénovation énergétique de bâtiments existants et par Rouault (Rouault *et al.*, 2014) dans l'étude du comportement thermique d'un système de stockage thermique à base de matériaux à changement de phase.

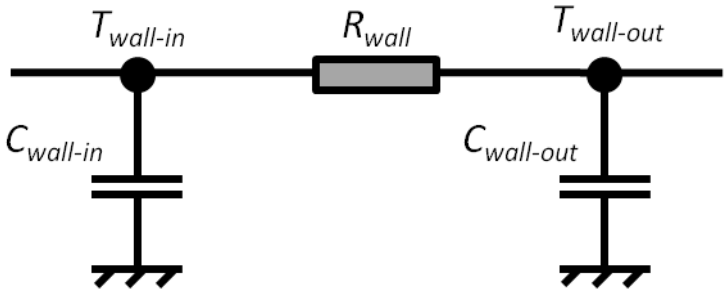

Figure 2.6. Modèle thermique d'une paroi opaque selon le principe de l'analogie électrique.

Le principe de l'analogie électrique-thermique consiste à représenter les parois opaques composant le bâtiment à l'aide d'un réseau de résistances et capacitances, comme montré dans la figure 2.6. Plusieurs modèles combinant ces types d'éléments ont été identifiés par Fraisse *et al.*, par exemple à l'aide de 3 résistances et 4 capacités (3R4C) ou avec 3 résistances et 2 capacités (3R2C) (Fraisse *et al.*, 2002). Dans le modèle thermique du bâtiment mis en place ici, un modèle de type une résistance et deux capacitances (1R2C) a été considéré, en raison d'un bon équilibre entre précision et simplification dans sa mise en œuvre (Bouyer, 2009).

Dans ce modèle, la représentation analogique d'une paroi opaque est donc donnée à partir de trois paramètres, qui dépendent uniquement de la nature des matériaux de construction :

- Une résistance thermique, ou alternativement un coefficient de transmission thermique, qui caractérise la capacité du flux de chaleur à traverser la paroi. Ce paramètre est la somme des résistances thermiques des différentes couches de matériaux composant le profil d'une paroi transversalement homogène.
- Deux capacitances thermiques surfaciques, une positionnée au niveau de la surface intérieure de la paroi et une autre au niveau de la surface extérieure, qui caractérisent la capacité que chaque paroi à absorber de la chaleur.

Le calcul de ces paramètres considère la masse volumique, la capacité thermique massique et l'épaisseur des couches des matériaux composant la paroi, ainsi que leur positionnement relatif par rapport aux surfaces exposées.

De manière générale, tout échange thermique peut être représenté par une résistance thermique, tandis que tout élément associé à une masse thermique peut être modélisé par une capacitance thermique. En partant de ce principe, les éléments constitutifs du bâtiment peuvent être ainsi modélisés en faisant appel à l'analogie électrique-thermique :

- Les murs composant l'enveloppe, le toit, le plancher bas ainsi que les cloisons et planchers intermédiaires entre zones thermiques sont modélisés par une résistance et deux capacitances, ces dernières implantées à chaque côté de l'élément.
- Les cloisons à l'intérieur d'une même zone thermique sont modélisées uniquement par une capacitance thermique.

- Les parois vitrées, d'inertie thermique considérée négligeable par rapport aux parois opaques, sont uniquement représentées par une résistance thermique.

Le concept de capacitance thermique est également appliqué à la masse d'air situé à l'intérieur des espaces, pour prendre en compte son inertie thermique. Dans ce cas, la capacitance thermique est calculée à partir du volume de l'espace ainsi que de la masse volumique et de la capacité thermique massique de l'air. Ce calcul peut aussi tenir compte de la masse thermique d'autres éléments dans l'espace non associés au bâti, comme c'est le cas du mobilier. Par contre, d'autres composants du bâtiment, tels que les portes ou les menuiseries intérieures, ne sont pas modélisés dans ce modèle thermique. Les surfaces occupées par ces composants sont assimilées aux éléments où elles sont implantées (murs de l'enveloppe et cloisons).

Comme montré dans la figure 2.7, le cœur de calcul du modèle est donné par des bilans thermiques effectués sur trois types de nœuds, caractérisés par leurs températures dans chaque zone thermique du bâtiment :

- Nœud « Air intérieur » (T_{air-in}) : associé à la masse d'air située dans l'espace intérieur de la zone thermique étudiée. L'air à l'intérieur de la zone thermique est considéré bien mélangé et avec une température homogène.
- Nœud « Surfaces intérieures » ($T_{wall-in}$) : associé à la « partie intérieure » des parois opaques en délimitant la zone thermique étudiée, y compris planchers intermédiaires, cloisons, toit, plancher bas et murs de l'enveloppe. Une valeur uniforme de température est considérée pour l'ensemble de ces surfaces intérieures de la zone thermique considérée.
- Nœud « Surfaces extérieures » ($T_{wall-out}$) : associé à la « partie extérieure » des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique étudiée, y compris toit, plancher bas et murs de l'enveloppe. Une valeur uniforme de température est considérée pour l'ensemble des surfaces extérieures de la zone thermique considérée.

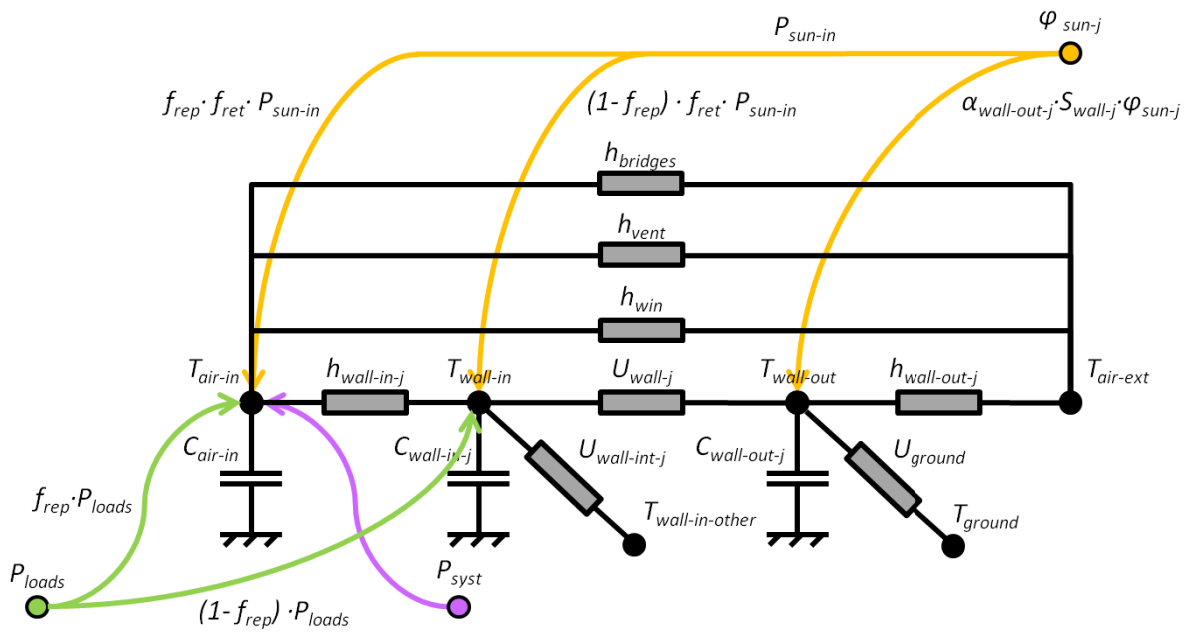

Figure 2.7. Schématisation de la modélisation thermique d'une zone thermique quelconque par analogie électrique.

Pour chacun de ces trois types de nœuds, les différents phénomènes d'échange thermique considérés dans le bilan thermique sont :

- Echange par convection et rayonnement entre l'air à l'intérieur des zones thermiques et la surface intérieure des parois opaques.
- Echange par convection, rayonnement et conduction entre l'air à l'intérieur des zones thermiques et l'air à l'extérieur, à travers les baies vitrées de l'enveloppe.
- Echange par convection dû au flux de renouvellement d'air entre les zones thermiques et l'extérieur.
- Absorption du flux thermique dû au rayonnement solaire par l'air à l'intérieur des zones thermiques ainsi que par les surfaces intérieures et extérieures des parois opaques.
- Captage du flux thermique dû aux charges thermiques internes (occupants, équipements de bureautique et d'éclairage) par l'air à intérieur de la zone thermique et par les surfaces intérieures des parois opaques.
- Echange entre l'air à l'intérieur des zones thermiques et les systèmes techniques de chauffage et refroidissement.
- Echange par conduction entre les surfaces intérieure et extérieure des parois opaques (hors ponts thermiques).
- Echange par conduction entre l'air à l'intérieur des zones thermiques et l'air à l'extérieur à travers les ponts thermiques de l'enveloppe.
- Echange par convection et par rayonnement entre la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe des zones thermiques et l'air à l'extérieur.
- Echange par conduction entre la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe des zones thermiques et le sol.

Une description détaillée des équations composant le cœur de calcul du modèle est donnée dans l'annexe A.1 de ce travail.

Afin de simplifier sa mise en place ainsi que pour augmenter la finesse du calcul, le modèle thermique tel que présenté par Bouyer a été adapté au contexte de ce travail par une série de modifications dans les hypothèses considérées :

- Dans le modèle de Bouyer les zones thermiques sont partitionnées par étages. Par contre, dans le modèle ici proposé elles sont différenciés par leur type d'usages et leur orientation de façade, comme montré dans la figure 2.5. Ce choix de modélisation permet d'analyser les conditions de confort dans chaque zone thermique d'intérêt de manière individualisée.
- Dans le modèle de Bouyer, la modélisation de l'échange thermique par rayonnement associé aux surfaces extérieures de l'enveloppe est donnée par le calcul du flux infrarouge total net échangé avec l'environnement, tandis que dans le cas des surfaces intérieures ceci est fait par la considération d'un nœud fictif associé à une température radiante moyenne des surfaces intérieures. Dans ce travail, les échanges thermiques associés au rayonnement et à la convection entre les éléments du bâti et l'air sont modélisés de manière combinée à l'aide de coefficients globaux constants. Les valeurs considérées pour ces coefficients sont ceux proposées dans le projet Building Energy Simulation Test (BESTEST) de l'Agence

Internationale de l'Energie, une méthodologie de référence pour la comparaison d'outils de simulation thermique dynamique du bâtiment (NREL, 1995).

- Une autre adaptation dans le modèle thermique est la considération des baies vitrées comme des éléments avec une inertie thermique négligeable par rapport aux autres éléments du bâti. Dans ce travail ces éléments sont modélisés par une résistance thermique, tandis que dans le modèle de Bouyer les fenêtres sont représentées de manière similaire aux parois opaques avec deux capacitances.

Les bilans thermiques aux trois nœuds de température de chaque zone thermique permettent de construire un système de 3N équations, correspondant à 3N inconnues (températures). Pour sa résolution numérique, un schéma de type Crank-Nicholson a été retenu, en raison d'un bon compromis entre stabilité, rapidité de calcul et précision des résultats. Un pas de temps horaire (1 h) a été choisi, cohérent avec l'objectif « in fine » d'aide à la décision du code mis en place, tout en assurant un temps de calcul réduit. La méthode de résolution numérique est décrite en détail dans l'annexe A.1 de ce travail.

Le cœur du modèle de calcul de simulation thermique dynamique, construit à partir de l'analogie électrique-thermique, a été complété par des modèles complémentaires provenant de la réglementation thermique française en vigueur (CSTB, 2010). Cette méthode de calcul réglementaire, décrite en détail dans les règles de calcul Th-BCE 2012, est en effet une référence incontournable dans le domaine du bâtiment en France et représente le résultat d'une réflexion menée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). En raison de son approche pratique et son adaptation au contexte français, les règles de calcul Th-BCE 2012 ont ainsi été considérées comme une référence valide pour la définition des modèles et paramètres de simulation ci-dessous :

- Scénarios d'occupation et de charges thermiques internes des salles de réunion et bureaux de type individuel.
- Modèle de gestion des protections solaires de type « volet » et « store enroulable ».
- Modèles de calcul des consommations énergétiques des équipements de production de froid et de chaud, y compris pompes à chaleur et systèmes à combustion.

L'annexe A.1 de ce travail décrit en détail ces scénarios et modèles complémentaires, ainsi que les modèles de calcul des consommations énergétiques des équipements de renouvellement mécanique d'air et d'éclairage artificiel et le modèle de correction du rayonnement solaire incident selon l'orientation du bâtiment mis en place.

2.3.3.2. Modélisation de la façade double peau vitrée

Un modèle de calcul venant du cadre réglementaire a été également considéré pour prendre en compte la possibilité d'une présence de façade double peau vitrée en face sud du bâtiment. Les règles de calcul Th-BCE 2012 proposent une méthode pour la modélisation des espaces de type « tampon solarisé », définis comme des zones non chauffées qui jouent le rôle de transition et protection thermique entre le bâtiment et l'extérieur. Quelques exemples d'espaces tampons solarisés sont les vérandas, les serres, les jardins d'hivers et les atriums. Dans ce travail, dû à ses

caractéristiques thermiques, on considère qu'une façade double peau vitrée peut être assimilée à un espace tampon de type solarisé.

En accord avec le principe de l'analogie électrique-thermique, dans ce modèle de double peau, l'espace créé entre l'enveloppe du bâtiment et la façade vitrée est caractérisé par un nœud de température représentant l'air situé à l'intérieur de la cavité ($T_{air-cav}$). La température caractérisant ce nœud est estimée à partir d'une formulation simplifiée du bilan thermique, en considérant les échanges thermiques avec les zones thermiques contigües à la cavité et avec l'extérieur. Les phénomènes d'échange considérés dans la modélisation de la façade double peau vitrée sont :

- Echange par conduction, convection et rayonnement entre l'air situé à l'intérieur de la cavité et l'air à l'extérieur, à travers les baies vitrées constituant la façade vitrée de la double peau.
- Echange par conduction, convection et rayonnement entre l'air situé à l'intérieur de la cavité et l'air extérieur, à travers les baies vitrées composant l'enveloppe thermique du bâtiment en contact avec cette cavité.
- Echange par convection et rayonnement entre l'air à l'intérieur de la cavité et la surface extérieur des parois opaques composant l'enveloppe.
- Absorption du flux thermique dû au rayonnement solaire par l'air à l'intérieur de la cavité.
- Echange par convection dû au flux de renouvellement de l'air situé à l'extérieur de la cavité, par action du vent et par tirage thermique.
- Echange entre l'air situé à l'intérieur de la cavité et l'air à l'intérieur des zones thermiques en contact avec celle-ci à travers les ponts thermiques de l'enveloppe du bâtiment.

Une description détaillée des équations de la modélisation de la façade double peau vitrée est donnée dans l'annexe A.1.1.4 de ce travail.

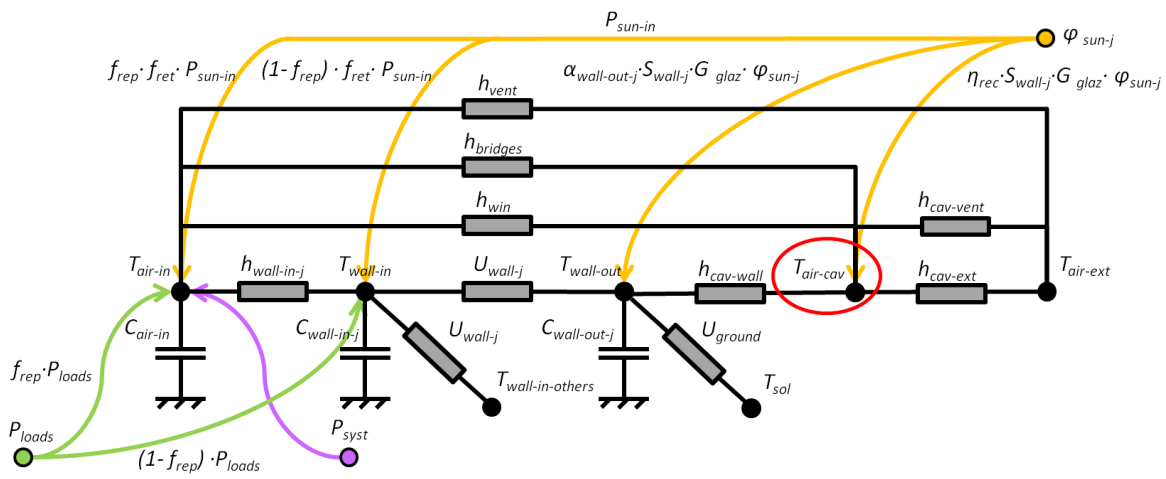

Figure 2.8. Schématisation de la modélisation thermique pour une zone thermique en contact avec une cavité d'une façade double peau vitrée.

Le modèle d'espaces tampons solarisés proposé par la méthode réglementaire est construit à partir d'une série d'hypothèses simplificatrices, comprenant :

- Un calcul « direct » de la température de l'air à l'intérieur de la cavité (pas de bilan thermique comme ceux effectués pour les autres nœuds du modèle).
- La modélisation de l'influence du vent et du tirage thermique dans le renouvellement d'air de la cavité à partir de constantes imposées par les règles Th-BCE 2012.
- La considération d'une température spatialement homogène dans la cavité au lieu d'un profil de stratification de températures au long de la façade.
- La prise en compte d'un coefficient constant, imposé par les règles Th-BCE 2012, d'échange thermique par convection et rayonnement entre l'air de la cavité et les parois la délimitant, au lieu d'une modélisation en fonction de la vitesse de l'air.

D'autres modélisations plus réalistes de la dynamique thermique d'une façade double peau vitrée sont disponibles dans la littérature (Safer, 2006 ; Poirazis, 2004 ; Schiefer *et al.*, 2008). Néanmoins, ces modèles sont associés à une haute complexité de mise en œuvre et à un temps de calcul considérable. La méthode réglementaire pour la modélisation d'espaces tampons solarisés a donc été considérée en cohérence avec les principes du présent travail, car cette méthode permet un bon équilibre entre simplification de calcul et représentativité des phénomènes en jeu.

Afin de prendre en compte de manière plus complète l'impact des décisions associées à la conception de la façade vitrée dans son comportement thermique, une adaptation au modèle des règles Th-BCE 2012 est proposée dans ce travail en ce qui concerne le rendement de récupération des apports solaires dans la cavité. Ce rendement est défini comme la part du flux thermique solaire qui reste dans l'espace tampon par rapport au flux d'entrée, et est considéré dans les règles Th-BCE 2012 avec une valeur fixe égale à 0.8. Dans ce travail, la valeur de ce rendement est estimée à partir des caractéristiques géométriques et thermiques des protections solaires et de l'enveloppe du bâtiment, de façon à modéliser l'influence de ces éléments dans la dynamique thermique de la façade double peau vitrée.

En outre, le modèle considéré dans ce travail n'intègre pas la possibilité d'utiliser l'air préchauffé dans la cavité de la façade double peau vitrée pour alimenter le système de ventilation, soit de manière directe ou à travers d'un échangeur thermique de type double-flux. La prise en compte de cette possibilité représente une des perspectives de travail de la présente méthode d'évaluation.

Le modèle d'espaces tampons solarisés ainsi retenu ici est relativement simple à mettre en place, cohérent avec les principes de la modélisation thermique par l'analogie électrique-thermique et conforme avec la disponibilité d'information dans les premières phases de conception. Ce modèle a été intégré au cœur de calcul sous la forme d'un module de simulation complémentaire et indépendant, auquel l'outil numérique fait appel seulement en cas de présence d'une façade double peau vitrée.

2.3.4. Modèle de calcul des indicateurs environnementaux

L'évaluation de la performance environnementale est donnée par le calcul de l'ensemble des indicateurs composant le profil environnemental du bâtiment. Cette évaluation permet de quantifier l'impact de l'ouvrage sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie.

Le modèle de calcul du profil environnemental du bâtiment est basé sur les principes d'application définis dans les normes XP P 01-020-3 et EN 15978 du comité technique TC350 du Comité Européen de Normalisation. Ces normes représentent la méthode de calcul de référence suivie par les principales initiatives internationales, y compris les projets SuPerBuildings et OPEN HOUSE, ainsi que le nouveau projet de certification français HQE Performance.

Cette méthode de calcul a été adaptée au contexte de ce travail par le choix des frontières d'étude, plus spécifiquement en ce qui concerne les types de processus associés au cycle de vie du bâtiment à prendre en compte. Comme présenté dans la section 2.3.1.1 de ce travail, les processus ou postes contributeurs composant le périmètre d'analyse retenus sont :

- L'utilisation de produits de construction, dans la phase de construction du bâtiment et dans la phase d'exploitation (en raison du remplacement des composants).
- La consommation de ressources énergétiques par les postes réglementaires, pendant la phase d'exploitation du bâtiment.

D'autres processus de la vie du bâtiment mentionnés dans le cadre normatif, tels que la consommation d'eau ou les autres types de consommations énergétiques, n'ont pas été considérés ici dans le périmètre d'analyse. En effet, ces processus ne sont pas concernés par les décisions associées à la conception énergétique du bâtiment dans les premières phases de projet, et sont ainsi peu pertinents pour l'évaluation de la performance dans le cadre de ce travail.

Le modèle de calcul des indicateurs environnementaux est divisé en deux étapes :

- Une étape de quantification des produits de construction et des ressources énergétiques utilisées dans le bâtiment.
- Le calcul de la contribution de chaque type de produit et de ressource énergétique aux impacts environnementaux du bâtiment dans son ensemble.

Dans la première étape du modèle, le nombre d'unités fonctionnelles de chaque type de produit de construction et de ressource énergétique mis en œuvre pendant la période d'analyse est déterminé. Comme mentionné précédemment, cette première étape du modèle est commune avec le modèle de calcul des indicateurs économiques. Ces résultats sont des entrées pour la deuxième partie du calcul.

D'une part, le nombre d'unités fonctionnelles des produits de construction utilisés est déterminé directement à partir des décisions de conception du bâtiment, y compris la définition de sa géométrie et le choix des matériaux. Dans le cas des systèmes techniques, leur dimensionnement est fait en fonction de la puissance thermique maximale demandée, qui est calculée lors de la simulation thermique dynamique. Ce modèle de quantification prend aussi en compte le remplacement des éléments du bâtiment tout au long de la période d'analyse. Ceci est fait par une approche dite « statique », en considérant le renouvellement des produits de construction à l'identique selon leurs durées de vie typiques.

D'autre part, les valeurs des consommations énergétiques associées aux postes réglementaires sont obtenues à partir des résultats de la modélisation thermique dynamique du bâtiment. Les besoins énergétiques des équipements sont d'abord estimés à partir d'une simulation annuelle de référence.

Ensuite, les consommations énergétiques sont calculées par des modèles de post-calcul, en considérant les caractéristiques techniques des systèmes techniques.

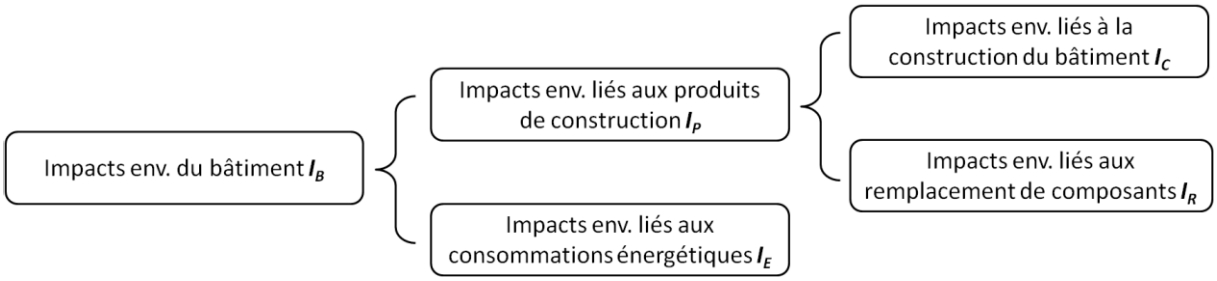

Figure 2.9. Décomposition des impacts environnementaux du bâtiment dans son ensemble.

La figure 2.9 montre la décomposition du calcul des impacts environnementaux du bâtiment. Le périmètre d'analyse comprend d'une part les impacts associés aux consommations énergétiques des postes réglementaires et d'autre part ceux liés aux produits de construction mis en œuvre pendant la période d'analyse. Ces derniers comprennent à la fois les impacts liés aux produits utilisés lors de la construction du bâtiment ainsi que les remplacements nécessaires pendant son exploitation.

Après cette étape de quantification, le profil environnemental du bâtiment est calculé à partir des contributions individuelles des produits de construction et consommations énergétiques.

Conformément aux principes d'application du cadre normatif, chaque type de produit ou ressource énergétique est alors associé à un profil environnemental qui décrit ses impacts environnementaux par unité fonctionnelle. De manière à faciliter sa manipulation mathématique, les valeurs composant le profil environnemental sont structurées sous la forme d'un vecteur d'impacts environnementaux.

La contribution environnementale d'un type de flux associé au cycle de vie du bâtiment ($\vec{I}_{flux-total}$) est alors calculée comme le produit de la quantité du flux utilisé pendant la période d'analyse (Q_{flux}) et le vecteur d'impacts environnementaux respectif ($\vec{I}_{flux}$) :

$$\vec{I}_{flux-total} = Q_{flux} \cdot \vec{I}_{flux}$$

Afin d'évaluer l'impact environnemental à l'échelle du bâtiment, les contributions individuelles de tous les flux considérés dans le périmètre d'analyse sont agrégées.

Finalement, les valeurs des indicateurs composant le profil environnemental du bâtiment sont normalisées en termes de la surface de plancher et de la durée de la période d'analyse du cycle de vie (fixée à 50 ans dans ce travail), afin de faciliter la comparaison entre différentes alternatives de conception du bâtiment.

2.3.5. Modèle de calcul des indicateurs économiques

Dans le cadre de ce travail, la performance économique d'un ouvrage de construction est évaluée à travers le concept du coût global. Tel qu'identifié lors de l'étude de l'état de l'art, la source de

référence pour le calcul de cet indicateur est la norme ISO 15686-5, qui décrit son principe d'application ainsi que le cadre méthodologique dans lequel il est défini. Le présent modèle de calcul des indicateurs environnementaux est construit sur le même principe, en adaptant les frontières du périmètre d'analyse au contexte de la conception énergétique du bâtiment.

De la même manière que dans l'évaluation environnementale, l'application du modèle économique est précédée d'une étape préliminaire de quantification des flux du cycle de vie du bâtiment composant le périmètre d'analyse. Cette partie du modèle de calcul, commune avec le modèle environnemental, a été décrite dans la section précédente. Ainsi, les résultats de la quantification des produits de construction et ressources énergétiques utilisés pendant la période d'analyse du cycle de vie du bâtiment sont aussi des données d'entrée de ce modèle économique.

Selon la norme ISO 15686-5, le calcul du coût global est donné comme la somme de toutes les dépenses associées au bâtiment tout au long de son cycle de vie, compte tenu d'un taux d'actualisation pour la prise en compte des coûts différés dans le temps. Comme présenté dans le section 2.3.1.1 de ce travail, le périmètre d'analyse a été adapté au contexte de la conception énergétique, de façon à intégrer seulement les types de flux qui lui sont pertinents : les consommations énergétiques des postes reglémentaires et l'utilisation de produits de construction.

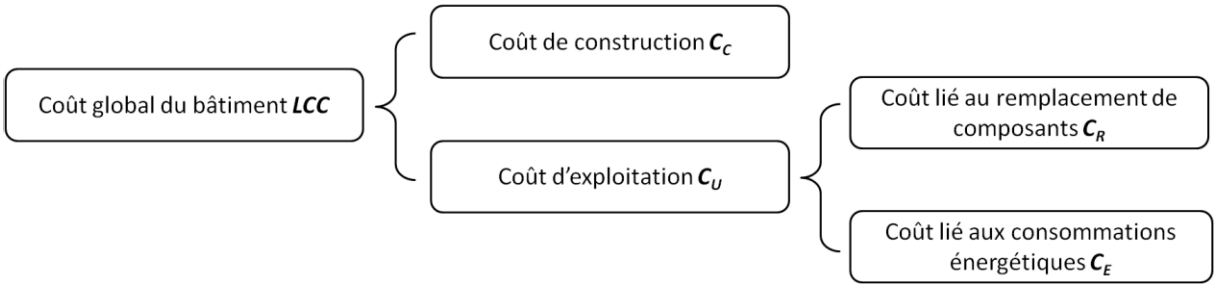

Figure 2.10. Décomposition du coût global du bâtiment.

Conformément au choix du périmètre d'analyse de ce travail, le coût global du bâtiment est calculé par l'agrégation de deux types de dépenses dans la vie du bâtiment :

- Coût de construction, représentant l'investissement initial associé aux produits de construction nécessaires pour la mise à disposition de l'ouvrage.
- Coût d'exploitation, intégrant les dépenses associées à la performance énergétique du bâtiment pendant son occupation, c'est-à-dire les consommations énergétiques et le remplacement de produits de construction.

La figure 2.11 montre ainsi la décomposition du coût global en termes des différents types de coûts considérés.

Selon la norme ISO 15686-5, la contribution d'un type de flux au coût global du bâtiment (C_{flux}) est donnée simplement comme le produit du nombre d'unités fonctionnelles du flux utilisées tout au long de la période d'analyse (Q_{flux}) et son coût unitaire associé (c_{flux}) :

$$C_{flux} = Q_{flux} \cdot c_{flux}$$

Ceci représente le principe de calcul des dépenses composant le coût de construction, lesquelles ont lieu à une date de référence qui est en général la date de livraison du bâtiment.

En revanche, dans le cas du calcul du coût d'exploitation, les dépenses ont lieu à une étape ultérieure à cette date de référence et leurs coûts doivent être actualisés avant d'être pris en compte. L'actualisation est une opération mathématique qui permet de comparer les valeurs économiques différés dans le temps, en ramenant la valeur future d'une dépense à sa valeur équivalente à la date de référence. Ceci est fait par la considération d'un taux d'actualisation (a) comme montre ci-dessous :

$$C_{flux-t} = \frac{q_{flux-t} \cdot c_{flux}}{(1+a)^t}$$

Où « t » est la durée, exprimée en années, entre la date de référence et la date de la dépense d'exploitation concernée.

La norme ISO 15686-5 suggère d'appliquer un taux réel d'actualisation « a » compris entre 0 et 4%, tandis que la norme EN 15643-4 propose une valeur de base de 3%. Dans l'outil numérique développé dans ce travail, la valeur de ce taux est à définir par l'utilisateur.

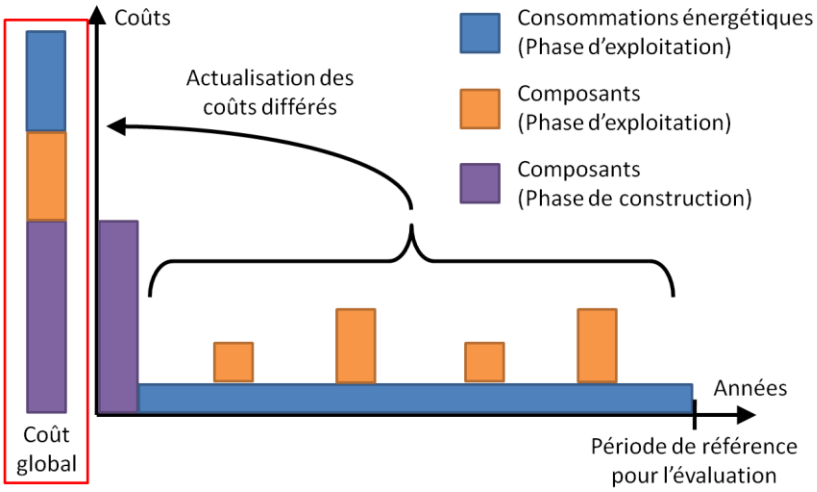

Figure 2.11. Calcul du coût global à partir des coûts différés dans le temps.

Les valeurs des trois indicateurs économiques sont normalisées en termes de la surface de plancher du bâtiment pour faciliter la comparaison entre différentes alternatives de conception.

Le calcul des indicateurs économiques est réalisé à partir des coûts hors taxes (HT), tels qu'ils sont disponibles dans les bases de données économiques identifiées.

2.3.6. Modèle de calcul de l'indicateur de confort hygrothermique

Le pourcentage de temps de confort thermique est décrit comme la proportion de la durée d'occupation pendant lequel les conditions de l'ambiance intérieure sont considérées comme acceptables, selon le modèle de confort thermique choisi. Plusieurs modèles sont proposés dans la littérature, tels que le confort adaptatif et l'approche dite « rationnelle ». Dans le cadre de ce travail, un modèle de confort simple, basé sur la comparaison de la température opérative des espaces avec une fourchette de valeurs acceptables a été retenu.

L'estimation de la température opérative d'un espace (T_{op}) dépend des conditions d'humidité relative et de vitesse de l'air ainsi que du niveau métabolique et de l'habillement des occupants. Néanmoins, dans le cas des bâtiments de bureaux, cette température peut être approximée comme la moyenne de la température de rayonnement des parois entourant un espace ($\bar{T}_{wall-in}$) et de la température de l'air à l'intérieur de l'espace (T_{air-in}) (ASHRAE, 2004) :

$$T_{op} = \frac{T_{air-in} + \bar{T}_{wall-in}}{2}$$

Il est important de noter que cette formulation de la température opérative considère comme hypothèse une répartition uniforme de la température à l'intérieur des zones thermiques. En raison de la différentiation des conditions de température d'air et de parois dans les différents espaces composant le bâtiment, l'évaluation du confort thermique est effectuée au niveau des différentes zones thermiques. La valeur du pourcentage de confort thermique à l'échelle du bâtiment est alors obtenue par intégration des évaluations menées au niveau de chaque zone thermique.

Ainsi, la première étape du calcul de l'indicateur de confort hygrothermique consiste à évaluer la température opérative des zones thermiques d'intérêt pendant la période d'occupation à partir des résultats de la simulation thermique dynamique du bâtiment. Les valeurs horaires des températures opératives sont ensuite comparées avec la fourchette de températures acceptables, pour ainsi déterminer le nombre d'heures de confort en occupation pour chaque zone thermique. Afin d'obtenir le pourcentage de temps de confort, toujours au niveau des zones thermiques d'intérêt, ce dernier résultat est alors divisé par le nombre d'heures d'occupation annuelle du bâtiment.

Enfin, l'évaluation de la performance en confort hygrothermique à l'échelle du bâtiment (n_{conf}) est donnée dans ce travail par l'agrégation des résultats individuels du pourcentage de temps de confort des zones thermiques (n_{conf-i}), pondérés par leurs surfaces de plancher (S_{in-i}) comme montré ci-dessous :

$$n_{conf} = \sum_{i=1}^{N_{BR}} \frac{n_{conf-i} \cdot S_{in-i}}{S_{BR}}$$

Où S_{BR} représente la somme des surfaces de plancher de toutes les zones thermiques d'intérêt dans cette étude (espaces de bureaux et salles de réunion).

2.3.7. Modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel

L'évaluation de la performance en confort visuel du bâtiment est donnée par le pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel. Cet indicateur représente la proportion du temps d'occupation des espaces pendant laquelle les conditions de lumière naturelle sont suffisantes pour satisfaire ses besoins d'éclairement.

Parallèlement au cas de l'évaluation du confort hygrothermique, le calcul de l'indicateur de confort visuel est réalisé dans un premier temps au niveau des différentes zones thermiques d'intérêt avant de passer à l'échelle du bâtiment. Ceci est dû à la différentiation des caractéristiques géométriques dans les espaces en question. Ainsi, la valeur du pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel global du bâtiment est obtenue par l'agrégation des résultats individuels de chaque zone thermique pondérés par leurs surfaces de plancher.

En général, un espace autonome en éclairage naturel n'a pas besoin de faire appel à l'éclairage artificiel pour satisfaire ses besoins d'éclairement. Dans ce travail, on part de l'hypothèse qu'un espace peut être considéré comme autonome si le niveau d'éclairement à l'extérieur, à un instant donné, est supérieur à la valeur minimale nécessaire pour obtenir un niveau d'éclairement intérieur satisfaisant. Cette condition d'autonomie en éclairage naturel est utilisée couramment dans la littérature (Bodart *et al.*, 2003 ; Bouvier *et al.*, 2008), notamment dans la méthode de calcul règlementaire Th-BCE 2012 (CSTB, 2010).

Le Facteur de Lumière du Jour (FLJ) est défini comme suit :

$$FLJ = \frac{E_{int}}{E_{ext}}$$

Où E_{int} est le niveau d'éclairement à l'intérieur d'un espace et E_{ext} est l'éclairement naturel disponible à l'extérieur au même point.

Une valeur de FLJ peut être calculée pour chaque point d'un plan horizontal de référence, comme une fonction continue de la position. Afin de réduire la complexité de la méthode de calcul, chacune des zones thermiques d'intérêt est caractérisée dans ce travail par une valeur moyenne spatiale du Facteur de Lumière du Jour. Il est à noter ici que l'utilisation d'une valeur moyenne pour caractériser un espace représente une hypothèse d'homogénéisation des conditions d'accès à l'éclairement extérieur, à prendre en compte en cas de géométries d'espaces complexes.

En considérant une répartition d'espaces dans le bâtiment telle que présentée dans la figure 2.5 lors de la description de la typologie du bâtiment d'étude, le Facteur de Lumière du Jour moyen (FLJ_m) est estimé à partir de la description géométrique des espaces d'intérêt ainsi que des caractéristiques optiques de leurs parois intérieures et baies vitrées (Université catholique de Louvain, 2014).

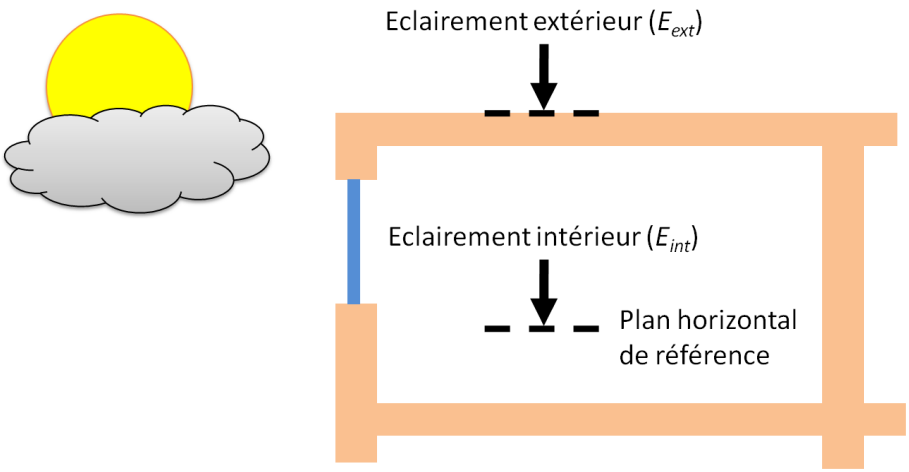

Figure 2.12. Définition du Facteur de Lumière du Jour.

A partir de la définition du Facteur de Lumière du Jour et en définissant un niveau minimum d'éclairement intérieur requis (E_{intmin}), le niveau d'éclairement extérieur minimum (E_{extmin}) à satisfaire pour être autonome en éclairement naturel peut être calculé par chaque zone thermique comme suit :

$$E_{extmin} = \frac{E_{intmin}}{FLJ_m}$$

Le niveau d'éclairement minimum requis E_{intmin} dans les espaces de bureaux et salles de réunion est fixé à 500 lux, comme proposé dans la norme européenne EN 15251 (CEN/TC 156, 2012).

Afin de calculer le nombre d'heures d'autonomie, cette valeur E_{extmin} doit ainsi être comparée avec les conditions d'éclairage extérieur disponibles à chaque pas horaire de la simulation numérique du bâtiment : si, pour une zone thermique donnée, le niveau d'éclairement extérieur dans un instant donné est supérieur à cette valeur minimale identifiée, la zone thermique en question est considérée autonome pour cette période de temps.

D'accord avec le calcul du FLJ, seul l'éclairement solaire diffus a été considéré pour représenter les conditions d'éclairement disponibles à l'extérieur du bâtiment. Cette hypothèse représente une approche de type prudent voire pessimiste, puisque cet éclairement solaire diffus ne représente que la valeur minimale du rayonnement solaire. C'est donc bien ce qui convient pour déterminer l'autonomie en éclairage d'un espace, puisque son emploi introduit une marge de sécurité dans le dimensionnement des baies vitrées de type vertical, susceptibles de recevoir, en plus du rayonnement diffus, une part du rayonnement direct (Bouvier *et al.*, 2008). De cette façon, l'emploi d'un ciel de type couvert dans le dimensionnement d'ouvertures verticales est donc pertinent, quelle que soit la fréquence des ciels couverts dans le site en question. En outre, le fait de prendre en compte l'éclairement diffus permet de considérer une seule valeur d'éclairement extérieur, qui n'est pas donnée en fonction de l'angle d'orientation des ouvertures, et amène ainsi à minimiser la quantité de paramètres d'entrée nécessaires pour le modèle de calcul.

Le nombre d'heures d'autonomie d'une zone thermique est ensuite rapporté au nombre d'heures d'occupation annuelle pour ainsi obtenir le pourcentage d'autonomie en éclairage naturel au niveau de la zone thermique. Comme mentionné précédemment, ces valeurs sont alors intégrées en fonction de leurs surfaces de plancher pour le calcul du l'indicateur à l'échelle du bâtiment, en suivant la même démarche que dans le calcul de l'indicateur de confort hygrothermique.

En outre, quand un espace est estimé comme autonome en éclairage naturel pendant un pas horaire de simulation, sa consommation en éclairage artificiel est considérée comme nulle pour cette période.

En cas de présence d'une façade double peau vitrée, la réduction du potentiel d'accès à la lumière naturelle des espaces affectés est donnée par la prise en compte du facteur de transmission lumineuse de la façade vitrée dans le calcul du Facteur de Lumière du Jour.

2.3.8. Modèle de calcul de l'indicateur de confort acoustique

La performance acoustique d'un bâtiment vis-à-vis des décisions de conception énergétique est caractérisée dans ce travail par l'évaluation de l'isolement acoustique standardisé pondéré des façades, pour un bruit de trafic à l'émission. Cet indicateur quantifie la capacité de l'enveloppe à isoler les espaces intérieurs des bruits venant de l'extérieur, homologués comme des bruits résultants du trafic routier.

De manière générale, chacune des façades du bâtiment peut être associée à une valeur d'isolement acoustique standardisé pondéré. Dans le cadre de ce travail, la valeur de cet indicateur au niveau du bâtiment est la valeur minimale des deux façades principales du bâtiment (façades aux surfaces les plus importantes).

La série de normes européennes EN 12354 (CEN/TC 126, 2002-2004) définissent la méthode de calcul à suivre pour le calcul de l'isolement acoustique standardisé pondéré d'une façade de bâtiment pour un bruit de trafic à l'émission. Néanmoins, cette méthode est assez complexe et de plus présuppose une connaissance des réponses des différentes couches des matériaux composant la façade à la transmission d'un spectre sonore type en fonction de sa fréquence d'émission. C'est pourquoi des logiciels de simulation tels qu'ACOUBAT, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), et BASTIAN, de la société DataKustik, sont normalement utilisés pour mettre en place ce calcul.

Il existe aussi une autre méthode simplifiée mais robuste qui permet de réaliser le calcul de cet indicateur de confort acoustique : la méthode dite « Qualitel » (Qualitel, 2012). Cette méthode est proposée dans le référentiel de la certification française Qualitel « Habitat & Environnement » et reprend la méthode de calcul figurant dans le cahier 1855 du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB, 1983). Au lieu d'utiliser la réponse spectrale, comme proposée dans les normes EN 12354, cette méthode utilise ce qu'on appelle les valeurs globales uniques, qui intègrent le résultat de l'analyse complexe des profils spectraux dans un indicateur unique. Ainsi, la méthode Qualitel a été retenue dans ce travail pour l'évaluation de l'indicateur de confort acoustique.

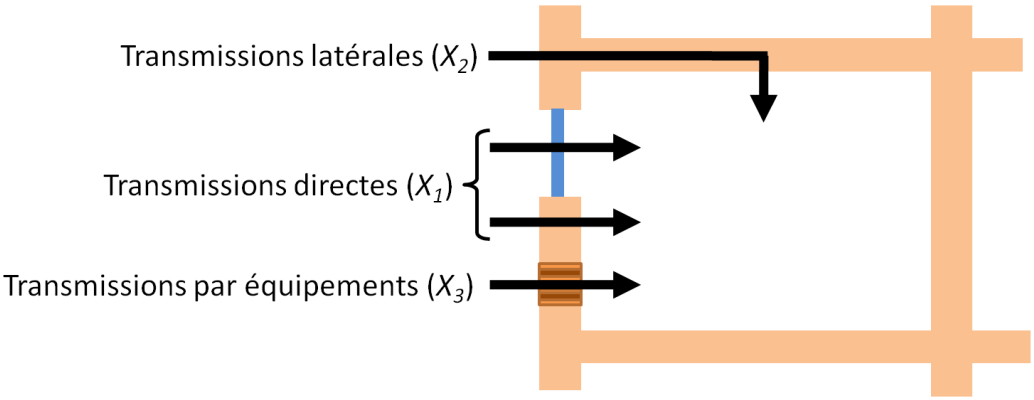

Figure 2.13. Types de transmission acoustique d'un bruit aérien.

Suivant la méthode de calcul Qualitel, l'isolement acoustique standardisé pondéré d'une façade ($D_{nT,A,tr}$) est calculé en considérant trois types de transmissions acoustiques :

- Transmissions directes (X_1) : à travers les éléments constructifs de la façade (vitrages et parois opaques).
- Transmissions latérales (X_2) : à travers les liens rigides avec d'autres façades contigües.
- Transmissions par les équipements (X_3) : à travers des composants tels que les bouches d'entrée d'air et les appareils à gaz avec ventouse.

Ces trois types de transmissions acoustiques sont montrés dans la figure 2.13.

Le calcul de l'isolement acoustique standardisé pondéré est ainsi donné comme suit :

$$D_{nT,A,tr} = 10 \cdot \log\left(\frac{0.32 \cdot V_{space}}{X_1 + X_2 + X_3}\right)$$

Où V_{space} est le volume de l'espace intérieur.

Comme spécifié dans le référentiel d'application de la certification Qualitel, les transmissions latérales sont négligeables quand l'isolement requis est inférieur à 35 dB, ce qui est normalement le cas. En outre, les transmissions acoustiques par les équipements ne sont prises en compte ici car les équipements ne sont pas encore connus lors des phases du projet de conception considérées dans ce travail.

De son côté, les transmissions acoustiques directes par la façade sont données comme la somme des contributions des différentes types de surfaces la composant, y compris les baies vitrées, pondérées par leur surface exposée. Comme proposé dans le référentiel Qualitel, la transmission acoustique à travers les éléments constructifs est caractérisée par une valeur globale unique : l'indice d'affaiblissement acoustique pour un bruit de route ($R_{A,tr}$).

La connaissance de ces valeurs d'indice d'affaiblissement acoustique pour l'ensemble des éléments constitutifs permet d'exprimer la transmission directe par la façade comme suit :

$$X_1 = \sum_{j=1}^{N_F} \left(S_j \cdot 10^{-\left(\frac{R_{A,tr-j}}{10}\right)} \right)$$

Où N_F est le nombre de types de surfaces composant la façade et S_j est l'aire de la surface de type *j*.

Dans le cas des baies vitrées, cet indice est directement donné en utilisant des tableaux de référence ou des données du fabricant, en fonction du nombre et de l'épaisseur des verres et couches d'air composant le vitrage. En ce qui concerne les parois opaques, la méthode Qualitel propose d'approximer l'indice d'affaiblissement du mur ($R_{A,tr-wall}$) à partir de la valeur de la couche structurelle ($R_{A,tr-str}$) et de la valeur de correction due au doublage thermique ($\Delta R_{A,tr}$), comme montré ci-dessous :

$$R_{A,tr-wall} = R_{A,tr-str} + \Delta R_{A,tr}$$

Cette hypothèse simplificatrice permet d'obtenir l'indice d'un mur doublé sans faire appel à l'analyse complexe de la réponse spectrale, ceci à condition de connaître les valeurs de correction appropriées. Le référentiel Qualitel propose une liste assez exhaustive de valeurs de correction dû au doublage, qui dépendent de l'épaisseur et le positionnement (côté intérieur ou extérieur) et du matériau constituant ce doublage.

Les valeurs des indices d'affaiblissement acoustique des couches structurelles peuvent être obtenues soit à partir de données matériaux, soit à partir de la Loi de masse expérimentale. Cette loi, uniquement valable dans le cas des parois lourdes, permet de calculer l'indice d'affaiblissement acoustique en fonction de la masse surfacique des parois.

En outre, en présence d'une façade double peau vitrée, la méthode de calcul Qualitel propose de calculer l'isolement acoustique standardisé pondéré de la façade concernée comme la somme des isolements de la façade vitrée extérieure et de la façade traditionnelle intérieure.

2.3.9. Modèle de calcul de l'indicateur de qualité de l'air intérieur

Le modèle de calcul du pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur représente une généralisation de la classification des niveaux de confort proposée dans la norme EN 15251 (CEN/TC 156, 2012).

Dans cette norme, quatre catégories de confort liées à la qualité de l'air intérieur sont proposées, en fonction du débit de renouvellement d'air par occupant. A chaque catégorie correspond un pourcentage du nombre d'usagers du bâtiment insatisfaits avec la qualité de l'air. L'indicateur sélectionné dans ce travail représente la quantité complémentaire de ce pourcentage, c'est-à-dire le ratio des occupants conformes avec l'état de l'air intérieur.

Cette classification de catégories de confort, montrée dans le tableau 2.9, considère seulement la pollution due à l'émission de bioeffluents par les occupants : transpiration, odeurs et dioxyde de carbone. L'autre source de pollution à l'intérieur du bâtiment, les émissions dues aux produits de construction, n'est pas prise en compte dans la définition de ces valeurs du débit de ventilation.

Cette approche représente la pratique actuelle dans l'industrie du bâtiment et a été considérée pertinente dans le cadre de ce travail.

Tableau 2.9. Catégories de niveaux de confort en qualité d'air (adapté de la norme EN 15251).

Catégorie de confort	Pourcentage attendu d'insatisfaits [%]	Pourcentage attendu de satisfaits [%]	Débit d'air par occupant [m^3/h·occupant]
I	15	85	36
II	20	80	25.2
III	30	70	14.4
IV	>30	<70	<14.4

Afin de généraliser l'assignation d'un pourcentage de satisfaction pour toute valeur du débit de renouvellement d'air par occupant ($\dot{q}$), une équation définissant le rapport entre ces deux quantités a été obtenue à partir d'une analyse par régression des valeurs du tableau 2.9. En considérant un comportement de type puissance et une valeur maximale possible de 100% d'occupants satisfaits, le pourcentage attendu de satisfaits (n_{sat}) peut être estimé comme suit :

$$n_{sat} = 100 - 224.9 \cdot \dot{q}^{-0.75}$$

A titre de simplification mais de manière conforme à la pratique courante, un même débit de ventilation est considéré pour tous les espaces du bâtiment : un débit d'air neuf est introduit par les espaces de vie et la même quantité d'air vicié est extraite par les zones humides telles que les espaces sanitaires. Le débit de renouvellement d'air par occupant est ainsi calculé à partir du débit total au niveau du bâtiment et de son niveau d'occupation.

2.3.10. Base de connaissance d'éléments du bâtiment

Afin de simplifier la saisie d'information par le concepteur dans la mise en œuvre de la méthode d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment, une base de connaissance des composants et sources d'énergie a été construite. Cette base de connaissance intègre les différents types de données nécessaires pour alimenter les modèles de calcul des indicateurs de performance :

- Les données environnementales, économiques et techniques des produits de construction composant les différents éléments du bâtiment, y compris matériaux et systèmes techniques.
- Les données environnementales et économiques des ressources énergétiques employées par les systèmes techniques.

Comme montré dans la figure 2.14, la base de connaissance d'éléments du bâtiment (entourée en rouge) permet de fournir à la méthode d'évaluation des indicateurs de performance les paramètres décrivant les choix de conception déclarés suivant la logique de progression des décisions.

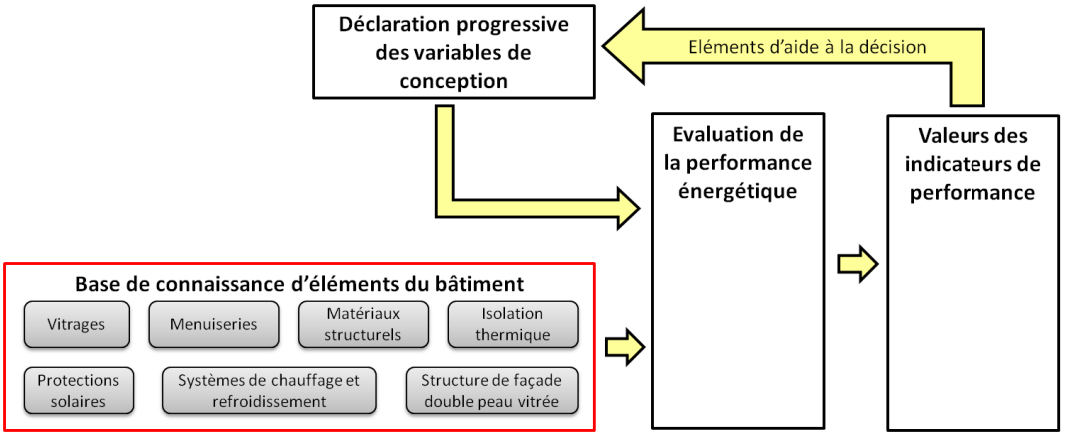

Figure 2.14. Catégories de composants du bâtiment constituant la base de connaissance.

Dans la présente section, les différents types de paramètres formant la structure de la base de connaissance ainsi que leurs sources sont présentés. Une présentation générale des entrées de la base de données construite dans ce travail, dans le but d'être intégrée à l'outil d'évaluation, est ultérieurement proposée dans la section 3.3.

2.3.10.1. Données environnementales

Les données environnementales contenues dans la base de connaissance correspondent aux profils environnementaux des produits de construction et des ressources énergétiques. D'autres informations complémentaires sont données : l'unité fonctionnelle et la durée de vie typique dans le cas des produits, et l'unité fonctionnelle dans le cas des ressources. L'ensemble des données environnementales listées dans la base de connaissance pour chaque type d'élément est montré dans les tableaux 2.10 et 2.11.

Les profils environnementaux, qui regroupent les contributions individuelles d'un produit de construction ou d'une ressource énergétique pour chacun des indicateurs concernés, sont donnés par unité fonctionnelle (UF).

Tableau 2.10. Données environnementales pour les produits de construction.

Paramètre	**Unités**
Unité fonctionnelle	-
Durée de vie typique	années
Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	kWh/UF
Consommation d'eau	L/UF
Potentiel de réchauffement climatique	kg CO_2-eq./UF
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg SO_2-eq./UF
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg C_2H_4-eq./UF
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC 11-eq./UF
Déchets dangereux éliminés	kg/UF
Déchets non dangereux éliminés	kg/UF
Déchets radioactifs éliminés	kg/UF

Tableau 2.11. Données environnementales pour les ressources énergétiques.

Paramètre	**Unités**
Unité fonctionnelle	-
Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	kWh/UF
Consommation d'eau	L/UF
Potentiel de réchauffement climatique	kg CO_2-eq./UF
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg SO_2-eq./UF
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg C_2H_4-eq./UF
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC 11-eq./UF
Déchets dangereux éliminés	kg/UF
Déchets non dangereux éliminés	kg/UF
Déchets radioactifs éliminés	kg/UF

Trois sources d'information ont été consultées pour la collecte des données environnementales :

- Les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de la base de données INIES (INIES, 2014) : utilisées pour la majorité des produits de construction, à exception de certains types de composants encore absents dans cette base de données.
- Les fiches environnementales génériques du logiciel d'analyse de cycle de vie des bâtiments ELODIE (CSTB, 2014) : consultées dans le cas de la structure porteuse de la façade double peau vitrée, les systèmes techniques, une partie des matériaux structurels et les ressources énergétiques.
- Les fiches environnementales de la base de données du programme Profils Environnemental Produit (PEP ecopassport, 2014) : utilisées pour définir le profil environnemental du système de chauffage électrique.

En règle générale, l'utilisation des fiches de déclaration disponibles dans la base INIES a été favorisée dans la collecte de données environnementales. Ces fiches, élaborées par les fabricants ou syndicats professionnels des produits de construction en France, sont représentatives des produits actuellement disponibles sur le marché. En cas d'absence de données pertinentes, les fiches génériques de l'outil ELODIE, préparées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment à partir de valeurs moyennes courantes, ont été considérées comme point de référence.

2.3.10.2. Données économiques

En ce qui concerne la dimension économique, la base de connaissance regroupe les coûts d'acquisition par unité fonctionnelle des produits de construction et des ressources énergétiques.

Dans le cas des produits de construction, plusieurs bases de données de prix sont disponibles en France. Quelques exemples sont les catalogues proposés par Batiprix (Batiprix, 2011), l'Office des Prix du Bâtiment (OFB, 2014) et l'Annuel des Prix BTP (APBTP, 2014). Dans ce travail, la base de données Batiprix du Groupe Moniteur a été sélectionnée dû à l'exhaustivité de son catalogue et son utilisation répandue dans le domaine du bâtiment. La version 2012 de cette base de données économiques a été utilisée.

Le coût d'acquisition des produits de construction a été pris égal au prix de vente indicatif hors taxes, qui est obtenu de la manière suivante :

1. Dans un premier temps, le Déboursé sec est calculé comme la somme de deux types de coût de base :
    a. Coût de la main d'œuvre, égal au nombre d'heures nécessaires pour la réalisation de l'ouvrage multiplié par le coût de la main d'œuvre par heure, charges sociales incluses.
    b. Coût des fournitures, donné comme la somme des coûts des matériaux utilisés dans la réalisation de l'ouvrage multipliée par leur quantité.
2. Ensuite, le Prix de revient est calculé comme la majoration du Déboursé sec par un coefficient multiplicateur de frais généraux spécifique à chaque corps d'état.
3. Enfin, le Prix de vente indicatif hors taxes est obtenu comme le Prix de revient majoré par un coefficient multiplicateur représentant les bénéfices et aléas avec une marge bénéficiaire égale à 10%.

De leur côté, les prix des ressources énergétiques correspondent aux dernières valeurs disponibles dans la base de données française Pégase (acronyme de Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie) du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, 2014). Comme dans le cas des produits de construction, les prix des ressources énergétiques sont disponibles hors taxes.

2.3.10.3. Données techniques

Les caractéristiques techniques à déclarer dans la base de connaissance sont données en fonction du type de produit de construction en question. Sept catégories de composants du bâtiment ont été identifiées dans la méthode d'évaluation :

- Vitrages : pour les fenêtres et la façade double peau vitrée.
- Menuiseries : pour les fenêtres.
- Structure porteuse : pour la façade double peau vitrée.
- Protections solaires : pour les fenêtres.
- Matériaux structurels : pour les murs de l'enveloppe, les planchers intermédiaires, les cloisons verticales, le toit et le plancher bas.
- Matériaux d'isolation thermique : pour les murs de l'enveloppe, le toit et le plancher bas.
- Systèmes de production de chaleur et de froid : pour les systèmes de chauffage et de refroidissement respectivement.

Les données techniques à inclure pour chacune des différentes catégories de produits de construction sont regroupées dans le tableau 2.12. En ce qui concerne les systèmes de production de chaleur et de froid, aucune information technique n'est nécessaire pour la méthode d'évaluation. Le modèle de calcul des consommations énergétiques pris en compte pour ces systèmes de production, proposé par la réglementation thermique française, calcule leur rendement à partir de valeurs de référence prédéfinies.

Tableau 2.12. Données techniques pour les différentes catégories de produits de construction.

Produit de construction	Paramètre	Unités
Matériaux structurels	Conductivité thermique	W/m·K
	Indice d'affaiblissement acoustique	dB
	Capacité thermique massique	J/kg·K
	Masse volumique	kg/m^3
Isolants thermiques	Conductivité thermique	W/m·K
	Correction de l'indice d'affaiblissement acoustique, si isolé par l'extérieur	dB
	Correction de l'indice d'affaiblissement acoustique, si isolé par l'intérieur	dB
	Capacité thermique massique	J/kg·K
	Masse volumique	kg/m^3
Vitrages	Coefficient de transmission thermique surfacique	W/m^2·K
	Facteur solaire	-
	Facteur de transmission lumineuse	-
	Indice d'affaiblissement acoustique	dB
Protections solaires	Facteur solaire	-
	Facteur de transmission lumineuse	-
Menuiseries des fenêtres et structure porteuse de la façade vitrée	Coefficient de transmission thermique surfacique	W/m^2·K

En raison de la grande diversité de données concernées, plusieurs sources d'information ont été consultées pour la collecte des paramètres techniques. De manière générale, les trois types de sources considérées peuvent se résumer comme suit :

- Des valeurs déclarées par le fabricant dans les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire, si disponibles.
- Des valeurs représentatives de produits comparables sur le marché en France, consultées dans les catalogues des fabricants.
- Des valeurs typiques des composants venant de documents de référence, tels que le cadre réglementaire thermique français ou le référentiel Qualitel.

2.3.11. Discussion

Les modèles de calcul composant la méthode d'évaluation présentée précédemment permettent de calculer tous les indicateurs sélectionnés dans ce travail pour caractériser la performance énergétique d'un bâtiment dans les premières phases de conception. La sélection et adaptation de ces modèles respectent les trois principes énoncés au début de cette section : compatibilité avec l'information disponible dans les premières phases de projet, simplicité dans l'algorithme de calcul et représentativité des résultats.

Afin de concilier représentativité des résultats et simplicité dans l'algorithme de calcul, le choix des modèles de calcul a favorisé les sources officielles, telles que les normes internationales et la réglementation thermique française. Le fait de bâtir la méthode d'évaluation sur un cadre de référence porté sur un consensus normatif garantit la validité de la modélisation du bâtiment ainsi que la fiabilité des résultats des indicateurs.

Dans le cas de la modélisation thermique du bâtiment, les modèles de simulation thermique dynamique des zones thermiques et de la façade double peau vitrée ont été adaptés pour leur mise en œuvre dans ce travail. D'une part, des ajustements ont été effectués pour assurer leur compatibilité, surtout en ce qui concerne à l'échange thermique entre ces deux types d'espaces. D'autre part, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été introduites afin de réduire le temps de simulation requis par cet aspect central de la modélisation du bâtiment.

En outre, une typologie simple mais représentative des bâtiments de bureaux a été choisie pour valider la méthodologie d'évaluation dans sa première application. Le choix de cette typologie du bâtiment, décrivant la forme du plan de plancher et la répartition d'espaces intérieurs, a permis de simplifier la modélisation thermique ainsi que le nombre de paramètres à déclarer par le concepteur dans la description géométrique du bâtiment.

Dans le but de faciliter la saisie d'information par le concepteur, la structure d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment a été proposée pour son intégration à la méthode d'évaluation. Cette base de connaissance contient des données environnementales, économiques et techniques des produits de construction et des ressources énergétiques à utiliser dans les modèles de calcul.

En récapitulant, la méthode d'évaluation résultante représente une approche intégrale pour l'évaluation de tous aspects liés à la performance énergétique des bâtiments dans les premières phases d'un projet de conception : de la phase d'Esquisse à la phase d'Avant-Projet Détaillé.

Un des critères du choix des modèles de calcul dans ce travail a été la compatibilité entre les paramètres d'entrée des modèles et le niveau de précision de l'information disponible dans les phases de projet concernées, ce dernier étant dicté par la prise de décisions de conception. Comme présenté dans l'étude de l'état de l'art, la prise de décisions évolue du général au spécifique au long du processus de conception du bâtiment. Afin de guider le concepteur dans le phasage de décisions de conception au long de ce processus, une logique de progression de décisions a été définie dans ce travail et sera présentée dans la section suivante.

2.4. Progression des décisions de conception dans les premières phases de projet

La méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables proposée dans ce travail a été construite en prenant en compte la progression de la précision de la définition du bâtiment dans les premières phases de projet de deux manières différentes :

- Des indicateurs de performance et leurs modèles de calcul ont été sélectionnés de façon à assurer leur compatibilité avec les niveaux limités d'information qui caractérisent ces phases de projet, comme présenté dans la section 2.3.
- L'avancement de la connaissance dans le processus de conception a été incorporé dans la prise de décisions par la proposition d'une logique de progression des décisions décrivant la conception énergétique du bâtiment, qui sera présentée dans la présente section.

La proposition de la prise en compte de la progression de l'information au cours du processus de décision est développée ici en deux parties dans cette section. Dans un premier temps, les principes de la construction de la logique de progression des décisions de conception seront décrits. D'en suit une présentation des différents types des décisions identifiées pour chacune des trois phases de projet concernées. Dans un deuxième temps, une configuration de bâtiment de base est proposée. Celle-ci correspond à la définition de valeurs par défaut, utilisées pour l'ensemble des paramètres définissant le projet non décidés à une phase donnée de conception de ce projet.

2.4.1. Présentation de la logique de progression des décisions de conception

La conception d'un bâtiment du point de vue énergétique a été définie dans ce travail comme l'ensemble de décisions à prendre pour la sélection et le dimensionnement des éléments du bâtiment ayant une influence déterminante sur sa performance énergétique. La prise de ces décisions n'a pas lieu dans un instant unique, mais elle est répartie en plusieurs étapes au long du processus de conception. Le niveau de précision des décisions à prendre dans ce processus évolue alors du général au spécifique : du choix de la stratégie énergétique du projet au dimensionnement des composants individuels.

Comme présenté dans la section 1.2 de ce travail, l'avancement d'un projet de construction en France répond en règle générale aux dispositions spécifiées dans le cadre normatif relatif aux missions d'ouvrages publiques réalisées par des prestataires privés (JORF, 1994). Parmi les différentes phases de projet identifiées dans ce cadre normatif, c'est essentiellement dans les trois premières que les décisions critiques vis-à-vis de la conception énergétique du bâtiment sont prises :

- Phase d'Esquisse (ESQ)
- Phase d'Avant-Projet Sommaire (APS)
- Phase d'Avant-Projet Détaillé (APD)

Afin de faciliter sa mise en œuvre dans une démarche de conception dans un contexte français, la logique de progression des décisions de conception reprend cette même structure de projet et propose un phasage de décisions adapté à l'avancement de la connaissance au long de ce processus.

La logique de progression ici proposée prend ainsi la forme d'un modèle de répartition séquentielle des décisions au long des trois premières phases d'un projet de construction. A chacune de ces phases, le concepteur est confronté à un certain nombre de décisions dont le niveau de précision est donné en fonction de l'avancement du processus de conception. Ce phasage de décisions permet ainsi au concepteur d'explorer de manière échelonnée l'espace de décision associé à chaque étape du processus, en structurant sa démarche de prise de décisions.

Une représentation graphique de la logique de progression de décisions est donnée dans la figure 2.15. La progression de la connaissance des quatre catégories d'éléments du bâtiment du point de vue énergétique (Géométrie, Enveloppe, Matériaux et Systèmes) est représentée par la tonalité des carrés : claire pour un aspect peu défini et foncée pour un aspect plus détaillé. A chaque étape du processus, des décisions sont prises majoritairement pour un ou deux de ces aspects du bâtiment, ici entourés en rouge. Après la prise de décisions à chaque étape, les valeurs des indicateurs de

performance énergétique sont calculées grâce à la méthode d'évaluation, donnant ainsi au concepteur des arguments pour valider ses choix de conception.

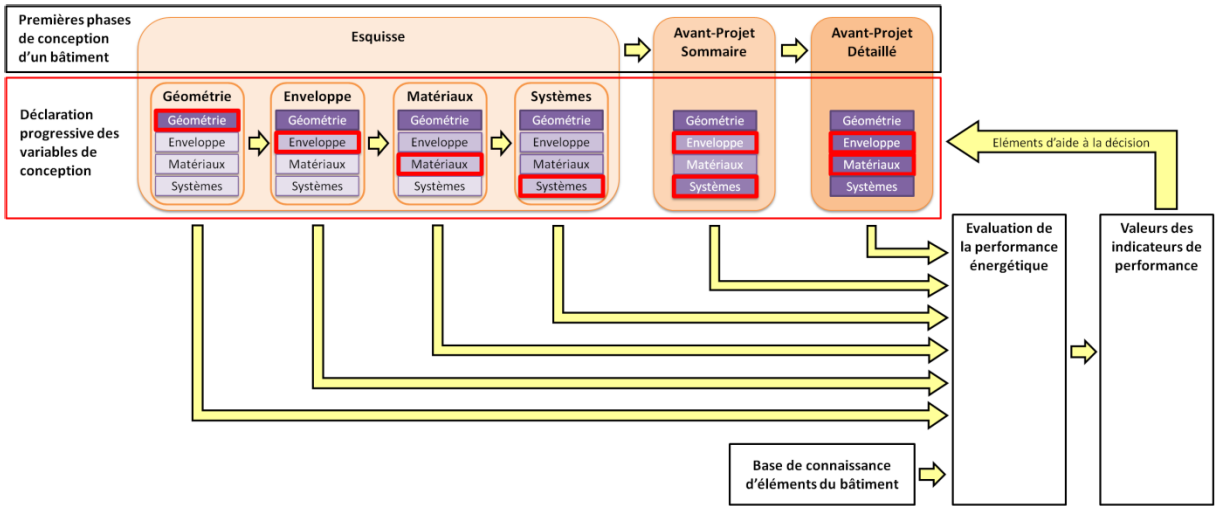

Figure 2.15. Logique de progression des décisions de conception dans les premières phases de projet.

La logique de décision ici proposée tient compte du fait que les décisions prises dans ces premières phases d'un projet de construction deviennent des contraintes dans les étapes ultérieures du processus de conception. Autrement dit, les choix faits réduisent systématiquement l'espace de décision disponible pour le concepteur en fixant ou en bornant une partie des variables de conception.

Dans chaque phase et sous-phase du processus de conception, aucune hiérarchie ou priorité n'est proposée dans la prise des décisions identifiées. Toutes les décisions sont considérées au même niveau d'importance, et c'est au concepteur de définir sa propre stratégie dans l'exploration de possibilités de choix. Le concepteur peut ainsi décider de quelle manière structurer sa démarche d'exploration de l'espace de choix correspondant à la phase ou sous-phase en question : il peut par exemple commencer par un type de décision qu'il considère influant sur ses objectifs de conception, combiner deux types de décision pour explorer plus en détail leur complémentarité, etc.

Trois types de choix peuvent être proposés au concepteur à chaque décision de conception :

- Type d'élément : choix d'un type spécifique d'élément parmi les composants identifiés dans la base de données intégrée à la méthode d'évaluation.
- Typologie de valeurs : choix d'un intervalle prédéfini de valeurs numériques d'une variable de conception, représenté par sa valeur moyenne.
- Valeur spécifique : assignation d'une valeur précise pour la variable de conception en question.

L'utilisation de typologies de valeurs dans cette démarche permet au concepteur par exemple de déclarer la valeur de certaines variables de conception uniquement en ordre de grandeur dans une

étape préliminaire de conception. De cette façon, le niveau de précision dans la prise de décisions est adapté à la progression de la connaissance dans la conception du bâtiment.

Il faut noter que les possibilités de choix proposées dans cette première version de l'outil d'évaluation ne sont pas exhaustives. Néanmoins, elles représentent les pratiques les plus représentatives d'une démarche de conception durable dans un contexte français. Ces choix ont été identifiées à travers d'une étude de la base de données de l'Observatoire BBC (Collectif Effinergie, 2014). Cette base de données compile des statistiques de projets à hautes performances énergétiques, avec les certifications Haute Qualité Environnementale (HQE) et Bâtiment à Basse Consommation (BBC) ainsi que d'autres bâtiments exemplaires en France. Tous les projets de bâtiments à usage de bureaux, documentés dans cette base de données en février 2013 (un total de 63 projets), ont été considérés pour l'identification des possibilités de choix dans ce travail.

Les conclusions de cette étude statistique ont été enrichies à travers des échanges avec des experts du centre de ressources technologiques Nobatek afin d'intégrer les nouvelles tendances en termes de solutions énergétiques performantes. En outre, la sélection de composants à considérer dans ces choix a été conditionnée par la disponibilité des valeurs environnementales et économiques nécessaires pour leur description dans la base de données intégrée à l'outil.

Les décisions de conception identifiées dans ce modèle de décision se limitent à la faculté d'action de la maîtrise d'œuvre dans les phases de projet ici considérées, vis-à-vis de la performance énergétique du bâtiment. Dans la conception d'un ouvrage de construction, la maîtrise d'œuvre est confrontée à une variété d'autres types de décisions, notamment en ce qui concerne les aspects structurels et fonctionnels du bâtiment. Nonobstant, ces exigences sont considérées hors objectifs de ce travail et ne sont pas traitées ici car elles sont considérées comme des pré-requis liés à la qualité de l'ouvrage.

Comme discuté dans la section 1.2.3.1 de ce travail, l'évolution actuelle des exigences en termes de performance énergétique dans l'industrie du bâtiment ont motivé un renforcement des missions de base confiées à la maîtrise d'œuvre. Le phasage de décisions de conception proposé dans ce travail prend compte de l'avancement des tâches résultant par rapport au déroulement traditionnel.

Dans les sous-sections suivantes, les différents types de décisions de conception identifiées pour chaque étape de projet (Esquisse, Avant-Projet Sommaire, Avant-Projet Détaillé) sont présentés en fonction du type d'élément du bâtiment qu'elles affectent. En raison de la grande quantité d'information, les possibilités de choix identifiées pour chaque type de décision sont précisées en détail dans l'annexe B.

2.4.1.1.Phase d'Esquisse (ESQ)

Lors de la phase d'Esquisse, le concepteur définit une première proposition de conception complète du bâtiment en ordre de grandeurs. Tous les aspects du bâtiment sont traités, au moins de manière très générale, de façon à définir les grandes lignes de la stratégie énergétique du bâtiment suivant une vision d'ensemble. Ceci correspond à la prestation de niveau « Esquisse + » proposé par la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP, 2011).

Afin d'introduire une logique plus linéaire dans le processus de conception, la phase d'Esquisse est divisée dans ce travail en quatre sous-étapes séquentielles, comme montré dans la figure 2.16. Dans chacune de ces sous-étapes, les décisions de conception se centrent majoritairement sur un des quatre aspects du bâtiment (entourés en rouge).

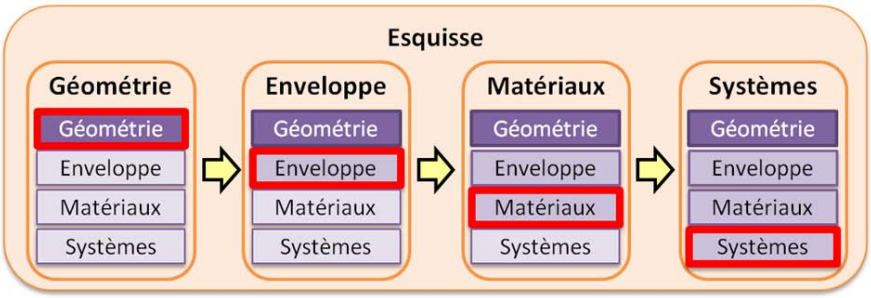

Figure 2.16. Les quatre sous-étapes dans la phase d'Esquisse.

Dans la sous-étape « Géométrie », les décisions de conception associées à la déclaration des paramètres géométriques du bâtiment sont prises. Ceci comprend les dimensions extérieures du bâtiment, son orientation par rapport au sud ainsi que son agencement vertical. Les types de décisions de conception à prendre dans cette sous-étape sont donnés dans le tableau 2.13.

Il est important de rappeler que dans cette première version de l'outil d'évaluation, une typologie de bâtiment a été définie pour simplifier la description géométrique de l'ouvrage, comme discuté dans la section 2.3.2 de ce travail. Le fait de partir d'une typologie de bâtiment, donnée par une forme du plan de plancher et un modèle de répartition des espaces intérieurs, a permis de réduire le nombre de paramètres géométriques à déclarer dans la sous-étape « Géométrie ». Dans le cas d'une généralisation de cette démarche de progression de la connaissance, le plan du plancher et l'agencement intérieur du bâtiment représenteraient également des variables de conception à définir par le concepteur dans cette sous-étape.

Tableau 2.13. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Géométrie » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment.

Esquisse : Géométrie	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Bâtiment dans son ensemble	Largeur du bâtiment
	Longueur du bâtiment
	Orientation par rapport au sud
	Hauteur sous dalle

Dans la sous-étape « Enveloppe », le concepteur est confronté aux décisions associées à la composition des surfaces du bâtiment en contact avec le milieu extérieur. Ces décisions de conception sont données principalement par le type et niveau d'isolation des éléments composant

l'enveloppe : murs, baies vitrées, toiture et plancher base. Les types de décisions de conception identifiées dans cette sous-étape sont donnés dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Enveloppe » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment.

Esquisse : Enveloppe	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Mur de l'enveloppe	Type de matériau structurel
	Typologie d'épaisseur si béton
	Typologie de niveau d'isolation thermique
Baie vitrée	Typologie de taux de vitrage par façade
Protection solaire	Présence de protections solaires
Toiture	Typologie de niveau d'isolation thermique
Plancher bas	Typologie de niveau d'isolation thermique
Façade double peau vitrée	Présence d'une façade vitrée

Dans la sous-étape « Matériaux », les décisions de conception à prendre concernent les matériaux des composants. Le positionnement de l'isolation thermique par rapport au matériau structurel ainsi que les types de composants du cloisonnement intérieur sont à spécifier dans cette sous-étape. Les types de décisions de conception à prendre dans cette sous-étape sont donnés dans le tableau 2.15.

Tableau 2.15. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Matériaux » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment.

Esquisse : Matériaux	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Mur de l'enveloppe	Côté de l'isolation thermique
Baie vitrée	Famille de type de vitrage
Paroi intérieure	Type de mur cloison
Toiture	Côté de l'isolation thermique
Plancher bas	Côté de l'isolation thermique
Façade double peau vitrée	Famille de type de vitrage de la façade vitrée
	Typologie d'épaisseur de la cavité

Dans la sous-étape « Systèmes », les premières décisions de conception associées aux types d'équipements techniques de ventilation mécanique et de chauffage sont à prendre. Les types de décisions de conception identifiées dans cette sous-étape sont donnés dans le tableau 2.16.

Tableau 2.16. Décisions de conception à prendre dans la sous-phase « Systèmes » de la phase d'Esquisse en fonction du type d'élément du bâtiment.

Esquisse : Systèmes	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Système de ventilation mécanique	Présence d'un système de récupération de chaleur
	Mise en œuvre d'une sur-ventilation nocturne en été
Système de chauffage	Famille de système de production de chaleur

En suivant cette proposition de phasage de décisions, à fin de la phase d'Esquisse, le concepteur a défini en ordre de grandeur une première solution d'ensemble en ce qui concerne la conception énergétique du bâtiment, ce qui lui permet de passer à la phase suivante.

2.4.1.2.Phase d'Avant-Projet Sommaire (APS)

Dans la phase d'Avant-Projet Sommaire, la proposition initiale du bâtiment définie en phase d'Esquisse est complémentée en augmentant le niveau de précision, principalement dans la composition de l'enveloppe et le choix des systèmes techniques (entourés en rouge dans la figure 2.17). Les décisions de conception identifiées dans cette phase concernent le choix des isolants thermiques, des vitrages, des menuiseries ainsi que des équipements de ventilation et production de chaleur et de froid.

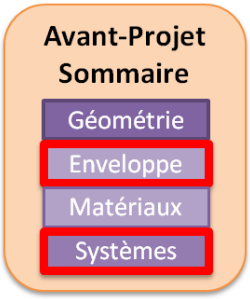

Figure 2.17. La phase d'Avant-Projet Sommaire.

Le tableau 2.17 montre les décisions de conception identifiées dans la phase d'Avant-Projet Sommaire en fonction du type d'élément affecté.

Tableau 2.17. Décisions de conception à prendre dans la phase d'Avant-Projet Sommaire en fonction du type d'élément du bâtiment.

Avant-Projet Sommaire	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Mur de l'enveloppe	Type de matériau d'isolation thermique
Baie vitrée	Taux de vitrage spécifique par façade
	Typologie des verres
	Matériau des menuiseries
Protection solaire	Type de protection solaire
Toiture	Type de matériau d'isolation thermique
Plancher bas	Type de matériau d'isolation thermique
Système de ventilation mécanique	Typologie de débit de renouvellement d'air par occupant
	Efficacité du système de récupération de chaleur
Système de chauffage	Type de système de production de chaleur
Système de climatisation	Type de système de production de froid
Façade double peau vitrée	Typologie de verres de la façade vitrée
	Typologie de pourcentage des ouvertures de ventilation
	Positionnement des protections solaires

2.4.1.3.Phase d'Avant-Projet Détaillé (APD)

La phase d'Avant-Projet Détaillé se caractérise par un niveau plus élevé de précision dans la déclaration des variables de conception par rapport aux deux étapes précédentes. Dans cette troisième phase, le concepteur prend des décisions spécifiques pour le dimensionnement des éléments du bâtiment, principalement en ce qui concerne la composition de l'enveloppe et le choix de matériaux (entourés en rouge dans la figure 2.18).

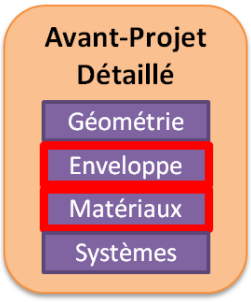

Figure 2.18. La phase d'Avant-Projet Détaillé.

Comme montré dans le tableau 2.18, les décisions dans cette phase sont données surtout par la déclaration des épaisseurs des matériaux structurels et des isolants thermiques, le choix de la composition exacte des verres des vitrages et des débits de renouvellement d'air pour la gestion du système de ventilation.

Tableau 2.18. Décisions de conception à prendre dans la phase d'Avant-projet Détaillé en fonction du type d'élément du bâtiment.

Avant-Projet Détaillé	
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**
Mur de l'enveloppe	Epaisseur spécifique du matériau structurel
	Epaisseur spécifique de l'isolation thermique
Baie vitrée	Composition exacte des verres
	Type de gaz intercalaire
Protection solaire	Tonalité de la protection solaire
Paroi intérieure	Epaisseur spécifique si béton banché
Plancher intermédiaire	Epaisseur spécifique de la dalle
Toiture	Epaisseur spécifique de la dalle
	Epaisseur spécifique de l'isolation thermique
Plancher bas	Epaisseur spécifique de l'isolation thermique
Système de ventilation mécanique	Débit spécifique de renouvellement d'air par occupant
	Débit spécifique en non-occupation en hiver
	Débit spécifique de sur-ventilation nocturne en été
Système de chauffage	Pourcentage de temps de satisfaction de besoins de chauffage
Système de refroidissement	Pourcentage de temps de satisfaction de besoins de refroidissement
Façade double peau vitrée	Composition exacte des verres de la façade vitrée
	Type de gaz intercalaire de la façade vitrée
	Epaisseur spécifique de la cavité d'air
	Pourcentage spécifique des ouvertures de ventilation
	Pourcentage spécifique de couverture des protections solaires

A la fin de la phase d'Avant-Projet Détaillé, toutes les décisions associées à la conception énergétique du bâtiment sont essentiellement prises, donnant comme résultat une configuration de bâtiment complète et détaillée.

2.4.2. Définition de la configuration de bâtiment de base

Une des principales difficultés dans l'évaluation de la performance énergétique dans les premières phases de conception est la description des aspects du bâtiment qui n'ont pas encore été totalement décidés. Les modèles de calcul composant la méthode d'évaluation nécessitent une déclaration complète des variables de conception comme entrée pour pouvoir calculer les indicateurs de performance énergétique. Néanmoins, une description complète et définitive du bâtiment n'est possible que lorsque toutes les décisions de conception sont prises à la fin du processus de conception. Ainsi apparait un besoin de définition par défaut des valeurs des paramètres non définis à une étape donnée d'avancée des décisions de conception.

Pour répondre à ce besoin, une configuration de bâtiment de base a été définie à partir des bonnes pratiques et de valeurs courantes dans une démarche de conception durable. Les valeurs des paramètres définissant cette configuration de base sont considérées comme des hypothèses par défaut pour les variables de conception qui n'ont pas encore été décidées dans une phase donnée du processus de conception. Ces valeurs par défaut sont alors progressivement remplacées par les choix faits par le concepteur à mesure que le processus de conception avance. Les valeurs des décisions de conception décrivant les dispositions architecturales et les systèmes techniques de la configuration de bâtiment de base sont montrées respectivement dans les tableaux 2.19 et 2.20.

Comme pour les possibilités de choix des décisions de conception, l'identification des valeurs par défaut des variables de conception est le résultat d'une étude de la base de données de l'Observatoire BBC, enrichie par des échanges avec les experts du centre de ressources technologiques Nobatek.

Tableau 2.19. Valeurs des décisions de conception décrivant les dispositions architecturales de la configuration du bâtiment de base.

	Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**	**Valeur de la configuration de bâtiment de base**
Dispositions architecturales	Mur de l'enveloppe	Matériau structurel	Béton armé
		Epaisseur du matériau structurel si béton	Moyen (20 cm)
		Matériau de l'isolation thermique	Laine de verre
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'extérieur (ITE)
		Niveau d'isolation thermique	Isolé (12 - 20 cm) - 16 cm
	Baie vitrée	Taux de vitrage de la façade nord	Moyennement vitrée (30 - 50%) - 40%
		Taux de vitrage de la façade sud	Moyennement vitrée (30 - 50%) - 40%
		Taux de vitrage de la façade est	Peu vitrée (10 - 30%) - 20%
		Taux de vitrage de la façade ouest	Peu vitrée (10 - 30%) - 20%
		Composition du vitrage	Double vitrage peu émissif (4+16+4)
		Matériau de la menuiserie	Aluminium
		Gaz intercalaire	Argon
	Protection solaire	Type de protection solaire	Avec protection solaire (Brise-soleil orientable)
		Couleur de la protection solaire	Claire
	Paroi intérieure	Type de cloisonnement	Moyen (Parpaing - 20 cm)
	Plancher intermédiaire	Epaisseur du plancher en béton	20 cm
	Toiture	Epaisseur de la toiture en béton	20 cm
		Matériau de l'isolation thermique	Polystyrène expansé
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'extérieur (ITE)
		Niveau d'isolation thermique	Isolé (20 - 25 cm) - 22.5 cm
	Plancher bas	Matériau de l'isolation thermique	Polystyrène expansé
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'intérieur (ITI)
		Niveau d'isolation thermique	Peu isolé (3 - 7 cm) - 5 cm

Tableau 2.20. Valeurs des décisions de conception décrivant les systèmes techniques de la configuration du bâtiment de base.

Systèmes techniques	Système de ventilation mécanique	Débit de renouvellement d'air par occupant	Réglementaire (18 m^3/(h.occ))
		Efficacité de la récupération de chaleur	Avec récupération de chaleur (50 - 70%) - 60%
		Débit de ventilation en non-occupation en hiver	Réduit en non-occupation (10% du débit de base)
		Sur-ventilation nocturne en été	Sans sur-ventilation nocturne
	Système de chauffage	Technologie de production de chaleur	Pompe à chaleur air/air
		Puissance thermique à installer	Satisfaisant 100% du temps de besoins
	Système de climatisation	Technologie de la production de froid	Pompe à chaleur air/air
		Puissance thermique à installer	Satisfaisant 100% du temps de besoins

Dans le cas de la conception d'une façade double peau vitrée, les valeurs des décisions décrivant la configuration par défaut ont été obtenues de l'analyse d'une étude sur 55 réalisations de façades

vitrées associées à bâtiments de bureaux dans dix pays différents (Poirazis, 2004). Ces valeurs de décisions de conception sont montrées dans le tableau 2.21.

Tableau 2.21. Valeurs des décisions de conception décrivant la configuration de base pour la façade double peau vitrée.

Façade double peau vitrée	Façade vitrée dans son ensemble	Présence d'une façade double peau vitrée	Sans façade vitrée
	Vitrage de la façade vitrée	Composition du vitrage	Simple vitrage clair (6 mm)
		Gaz intercalaire si double vitrage	Air
	Cavité entre façades	Epaisseur de la cavité d'air	Assez large (0.4 m - 0.8 m) - 0.6 m
	Ouvertures de ventilation	Pourcentage d'ouverture de la façade	Assez ouverte (10% - 20%) - 15%
	Protection solaire	Positionnement des protections solaires	A l'intérieur de la cavité

2.4.3. Illustration de la logique de progression des décisions de conception

Pour montrer la démarche du phasage des décisions de conception, voyons un exemple ponctuel : le choix du niveau d'isolation thermique des murs composant l'enveloppe du bâtiment. Le phasage des décisions associées à ce choix ainsi que la valeur de la configuration de base sont donnés dans le tableau 2.22.

Tableau 2.22. Phasage des décisions de conception pour le niveau d'isolation thermique des murs de l'enveloppe du bâtiment.

	Décision de conception	**Valeur de la configuration de base**	**Décisions de conception par phase de projet**					
			Esquisse				**Avant-Projet Sommaire**	**Avant-Projet Détaillé**
			Géométrie	**Enveloppe**	**Matériaux**	**Systèmes**		
Mur de l'enveloppe	**Niveau d'isolation thermique**	Isolé (12 - 20 cm) - 16 cm		Peu isolé (8 - 12 cm) - 10 cm Isolé (12 - 20 cm) - 16 cm Très isolé (20 - 28 cm) - 24 cm				Epaisseur spécifique [cm]

Dans le calcul de la performance énergétique lors de la première sous-étape de la phase d'esquisse (« Géométrie »), les murs de l'enveloppe sont considérés par défaut comme « isolés » avec une épaisseur de 16 cm d'isolant thermique. Dans la sous-étape suivante (« Enveloppe »), le niveau d'isolation est à choisir par le concepteur à partir de trois typologies proposées (« peu isolé », « isolé », « très isolé »), chacune associée à une valeur différente d'épaisseur d'isolation thermique. La valeur choisie dans cette sous-étape est utilisée dans la méthode d'évaluation jusqu'à la phase d'Avant-Projet Détaillé, où le concepteur doit alors spécifier une valeur d'épaisseur précise, pour ainsi arrêter le choix du niveau d'isolation thermique des murs de l'enveloppe.

2.4.4. Discussion

La logique de progression des décisions de conception présentée dans cette section permet d'intégrer l'avancement de la connaissance au cours des premières phases de projet dans la prise de décisions associées à sa performance énergétique. Donnée sous la forme d'un modèle de répartition séquentielle de décisions et d'une configuration de bâtiment de base, cette logique est proposée comme un guide support pour structurer la prise de décisions dans la conception de bâtiments de bureaux durables.

Comme mentionné précédemment, les décisions de conception et les possibilités de choix identifiées dans la logique de progression ne sont pas données à titre exhaustif. D'autres types de décisions ayant une influence considérable sur la performance énergétique du bâtiment n'ont pas été pris en compte dans la première version de cette logique de progression, dû à l'indisponibilité de données économiques et/ou environnementales pertinentes. C'est le cas par exemple des décisions associées à la sélection et le dimensionnement du système d'éclairage artificiel ou des émetteurs des systèmes de chauffage et de refroidissement, pour lesquels le manque de profils environnementaux a empêché leur inclusion.

Un autre aspect important qui n'a pas été considéré dans cette première version de la logique de progression des décisions est la description géométrique du bâtiment. Ceci pourrait être abordé de manière simplifiée par la proposition d'autres typologies de forme du plan de plancher (carré, circulaire, en forme de L, avec un atrium, etc.) ainsi que des modèles typiques de répartition des espaces intérieurs associés à chacune de ces typologies. De cette manière, le concepteur aurait la possibilité de décrire avec plus de détail la géométrie du bâtiment dans les premières phases de conception sans complexifier la saisie de données géométriques.

Il est important de mentionner que les valeurs des décisions de conception décrivant la configuration de base du bâtiment peuvent évoluer dans le temps, notamment par le renforcement des exigences réglementaires ou l'introduction de produits de construction innovants. De cette manière, une telle configuration de base doit être mise à jour régulièrement afin de rester une hypothèse valide dans la mise en œuvre de la présente méthodologie d'aide à la décision.

2.5. Conclusions

Dans ce chapitre, une méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables a été proposée. Cette méthodologie a été construite sur 2 principes de base : l'analyse de la performance énergétique du bâtiment à travers le concept de la durabilité et son adaptation au niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases de conception.

Comme présenté de manière schématique dans la figure 2.19, cette méthodologie est composée de quatre parties fondamentales :

- La sélection de seize indicateurs de performance énergétique pour la caractérisation du bâtiment selon les trois dimensions du concept de la durabilité : économique, environnementale et sociale (cf. section 2.2).
- Une méthode d'évaluation pour le calcul des indicateurs de performance énergétique, composé de sept modèles de calcul compatibles avec le niveau de précision de l'information disponible dans les premières phases de conception du bâtiment (cf. section 2.3).
- La structure d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment, compilant les données économiques, environnementales et techniques des produits de construction et des ressources énergétiques nécessaires pour la méthode d'évaluation (cf. section 2.3.10).
- Une logique de progression des décisions de conception permettant d'encadrer la mise en œuvre de la méthode d'évaluation, en structurant la prise de décisions au long des trois phases considérées du processus de conception du bâtiment (cf. section 2.4).

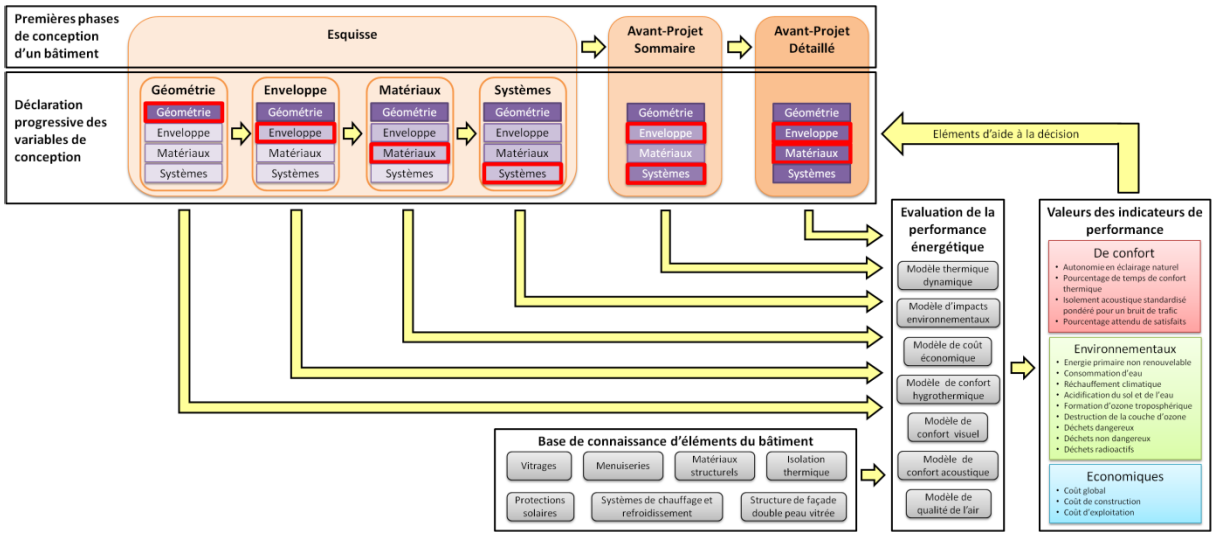

Figure 2.19. Méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique dans les premières phases de projet.

Afin de valider la démarche proposée par la méthodologie ainsi que d'étudier son intérêt pour guider la prise de décisions, un outil numérique a été développé comme une première application de la méthodologie ici proposée. La construction de cet outil d'aide à la décision est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 Vers un outil d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables

Dans le chapitre précédent, une méthodologie pour l'aide à la prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments durables adaptée aux premières phases de projet a été présentée. Afin de valider la démarche proposée par cette méthodologie ainsi que d'étudier son intérêt pour accompagner la prise de décisions de conception, un outil numérique d'évaluation a été mis en place dans ce travail et sera présenté dans le présent chapitre.

3.1. Présentation de l'outil d'évaluation de la performance énergétique

La construction du présent outil numérique d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments représente une première application de la méthodologie d'aide à la décision proposée dans ce travail, et, en tant que telle, répond aux mêmes principes de base.

L'objectif de l'outil numérique est de donner au concepteur des éléments pour guider sa prise de décisions par la comparaison des possibilités de choix disponibles selon l'avancement du processus de conception. Ceci est fait par l'évaluation des effets des décisions de conception sur la performance énergétique du bâtiment, caractérisée par l'ensemble d'indicateurs proposés dans la section 2.2, sous la forme d'études paramétriques.

Ainsi, les entrées de l'outil sont les décisions qui définissent les alternatives de conception à évaluer, données selon la phase du projet, tandis que les sorties sont les valeurs des indicateurs de performance énergétique du bâtiment.

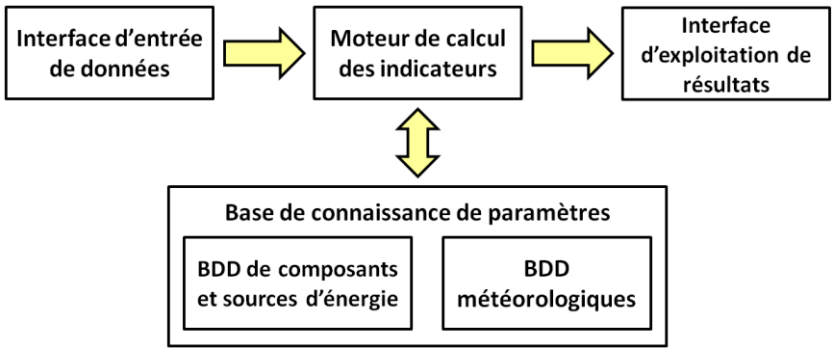

Figure 3.1. Les quatre modules composant l'outil d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment.

Comme montré dans la figure 3.1, l'outil numérique d'évaluation ici proposé est composé de quatre modules, suivant la même structure de la méthodologie telle que présentée dans la figure 2.19 :

- Une interface d'entrée de données, qui permet de traduire les choix de conception en termes des paramètres nécessaires pour la modélisation des alternatives de conception.
- Une base de connaissance, composée de deux bases de données différentes compilant les paramètres nécessaires pour la modélisation : une sur les composants et sources d'énergie à mettre en œuvre dans le bâtiment et une autre sur les conditions météorologiques du site d'implantation.
- Un moteur de calcul, qui permet d'évaluer les indicateurs de performance énergétique des alternatives de conception définies par l'utilisateur de l'outil.
- Une interface d'exploitation de résultats, qui facilite leur traitement et interprétation afin de guider la prise de décisions de conception.

3.2. Interface d'entrée de données

L'interface d'entrée de données est, avec celle d'exploitation de résultats, un des deux éléments avec lesquels le concepteur interagit de manière directe pendant l'utilisation de l'outil d'évaluation. A travers de cette interface, le concepteur déclare les configurations du bâtiment qui seront évaluées par l'outil numérique en tant qu'alternatives de conception. Ces configurations du bâtiment sont données par les choix de sélection et de dimensionnement des éléments ayant une influence déterminante sur la performance énergétique du bâtiment.

Afin de proposer un environnement de travail simple et adaptable, l'interface d'entrée de données de l'outil a été développée sous la forme d'un classeur en format Excel. Les feuilles de calcul composant ce classeur sont classifiées en deux catégories selon leur fonction : feuilles de saisie d'entrées et feuilles d'exportation au moteur de calcul.

Dans les feuilles de saisie d'entrées, deux types de données sont à déclarer par l'utilisateur :

- Les paramètres de simulation.
- Les variables de conception.

3.2.1. Déclaration de paramètres de simulation

Les paramètres de simulation représentent la description générale du contexte du projet de conception, donc ils ne font pas partie des décisions de conception identifiées dans ce travail. Ces paramètres concernent le site d'implantation, les consignes d'opération des équipements techniques, l'intervalle de températures de confort, la répartition d'espaces intérieurs, le débit des infiltrations, la période de chauffage et l'actualisation des dépenses.

Le tableau d'entrée des paramètres de simulation est montré dans la figure 3.2, avec les cellules à remplir par l'utilisateur marquées en jaune.

	Paramètres de simulation	Valeurs	Unités
Site d'implantation	Emplacement du site d'implantation	Bordeaux	-
	Angle de ciel ouvert	80	°
Consignes de température	Température de consigne de chauffage en occupation	19	°C
	Température de consigne de chauffage hors occupation	15	°C
	Température de consigne de climatisation	26	°C
Modèle de confort thermique	Température représentant la borne inférieure de l'intervalle de confort thermique	17	°C
	Température représentant la borne supérieure de l'intervalle de confort thermique	28	°C
Répartition d'espaces intérieurs	Ratio entre la surface des bureaux et le total de la surface habitable	48.25	%
	Ratio entre la surface des salles de réunion et le total de la surface habitable	4.63	%
	Ratio entre la surface des circulations et le total de la surface habitable	31.11	%
	Ratio entre la surface des autres espaces et le total de la surface habitable	16.01	%
	Nombre de bureaux dans le bâtiment	100	Bureaux
Système de ventilation	Débit de renouvellement d'air par infiltrations	0.1	vol/h
	Jour de l'année représentant la fin de la période de fonctionnement du système de ventilation double flux	105	Jour
	Jour de l'année représentant le début de la période de fonctionnement du système de ventilation double flux	289	Jour
Actualisation des dépenses	Taux réel d'actualisation	3	%

Figure 3.2. Tableau d'entrée des paramètres de simulation.

3.2.2. Déclaration des variables de conception

Les variables de conception représentent la faculté d'action de la maîtrise d'œuvre dans les premières phases de projet et sont données par les choix de conception du bâtiment du point de vue énergétique. L'interface d'entrée intègre la logique de progression de décisions proposée dans la section 2.4 de ce travail, par la structuration séquentielle de l'entrée de données en fonction de l'avancement du projet.

Les décisions de conception identifiées pour chacune des étapes de projet sont présentées au concepteur sous la forme de tableaux d'entrée individuels, comme celui présenté dans la figure 3.3 pour la phase d'Avant-Projet Sommaire. Les choix à faire par le concepteur sont donnés soit par la sélection dans une liste déroulante de choix, soit par la déclaration d'une valeur numérique spécifique.

Avant-Projet Sommaire			
Type d'élément du bâtiment	**Décision de conception**	**Choix**	**Unités**
Mur de l'enveloppe	Type de matériau d'isolation thermique	Laine de verre	-
Baie vitrée	Taux de vitrage spécifique de la façade sud	40	%
	Taux de vitrage spécifique de la façade est	20	%
	Taux de vitrage spécifique de la façade nord	40	%
	Taux de vitrage spécifique de la façade ouest	20	%
	Typologie des verres	Si DV : Peu émissif (4+16+4)	-
	Matériau des menuiseries	Aluminium	-
Protection solaire	Type de protection solaire	Brise-soleil orientable	-
Toiture	Type de matériau d'isolation thermique	Polystyrène expansé	-
Plancher bas	Type de matériau d'isolation thermique		-
Système de ventilation mécanique	Typologie de débit de renouvellement d'air par occupant		^{3}/(h.occ)
	Efficacité du système de récupération de chaleur	Moyenne (50 - 70%) - 60%	%
Système de chauffage	Type de système de production de chaleur	Si PAC : Pompe à chaleur air/air	-
Système de climatisation	Type de système de production de froid	Pompe à chaleur air/air	-
Façade double peau vitrée	Typologie de verres de la façade vitrée	Si SV : Clair (6 mm)	-
	Typologie de pourcentage des ouvertures de ventilation	Assez ouverte (10% - 20%) - 15%	%
	Positionnement des protections solaires	A l'intérieur de la cavité	-

Laine de verre
Polystyrène expansé
Polystyrène extrudé
Polyuréthane

Figure 3.3.Tableau d'entrée pour la prise de décisions de conception de la phase d'Avant-Projet Sommaire.

Afin de pouvoir être interprétées par le moteur de calcul, les entrées déclarées dans les feuilles de saisie sont converties automatiquement dans les feuilles d'exportation au système de codes et valeurs numériques utilisé dans la base de connaissance de l'outil. Un extrait d'une des feuilles d'exportation de données est montré dans la figure 3.4. De cette manière, les données d'entrées représentant les décisions de conception prises par l'utilisateur sont prêtes à être importées par le moteur de calcul au début de l'exécution de la simulation.

INPUT (entrée)						
noms	Altenative 1	Alternative 2	Alternative 3			
mur type	str5	str5	str5			
mur epaisseur	0.2	0.2	0.2			
extmur type	iso1	iso1	iso1			
extmur epaisseur	0.16	0.16	0.16			
intmur type	str5	str5	str5			
intmur epaisseur	0	0	0			
toit type	str4	str4	str4			
toit epaisseur	0.225	0.225	0.225			
exttoit type	iso3	iso3	iso3			
exttoit epaisseur	0.24	0.24	0.24			
inttoit type	str4	str4	str4			
inttoit epaisseur	0	0	0			
plancher type	str6	str6	str6			
plancher epaisseur	0.2	0.2	0.2			
intplancher type	iso3	iso3	iso3			
intplancher epaisseur	0.05	0.05	0.05			
cloison type	str3	str3	str3			
cloison epaisseur	0.2	0.2	0.2			
interm type	str4	str4	str4			
interm epaisseur	0.2	0.2	0.2			
fenetre cadre	cad2	cad2	cad2			
fenetre vitrage	vit7	vit7	vit7			
fenetre opaque	0.3	0.3	0.3			
fenetre largeur	1.48	1.48	1.48			
fenetre longueur	1.85	1.85	1.85			
protection solaire	pro5	pro5	pro5			
protsol gestion	1	1	1			

Figure 3.4. Extrait d'une feuille d'exportation de données au moteur de calcul.

L'interface d'entrée de données permet de déclarer plusieurs alternatives de conception à la fois pour leur évaluation dans une même exécution du moteur de calcul, par exemple pour comparer plusieurs possibilités de choix pour une même décision de conception. Après avoir fait ses choix dans la feuille de saisie d'entrées correspondante, le concepteur peut déclarer d'autres alternatives de conception directement dans les feuilles d'exportation de données, en dupliquant les colonnes de valeurs des variables de conception et en les modifiant au besoin.

3.3. Base de connaissance de paramètres de simulation

La base de connaissance de paramètres de simulation intégrée à l'outil d'évaluation est composée de deux bases de données indépendantes :

- Une base de données de composants et sources d'énergie.
- Une base de données météorologiques.

3.3.1. Base de données de composants et sources d'énergie

Après avoir récupéré les variables de conception déclarées dans l'interface d'entrée, le moteur de calcul procède à l'importation des caractéristiques des éléments associées à partir de la base de données de composants et sources d'énergie. Construite suivant la structure proposée dans la section 2.3.10 de ce travail, cette base de données recueille les données techniques, économiques et environnementales des produits de construction composant le bâtiment et des ressources énergétiques utilisées par les équipements techniques.

La base de données de composants et sources d'énergie a été construite sous la forme d'un classeur en format Excel. Ce choix répond au besoin de permettre une mise à jour simple : soit pour modifier des entrées déjà existantes, soit pour ajouter des nouveaux produits de construction ou ressources énergétiques. Un extrait de la fiche de données des vitrages est donné dans la figure 3.5 à titre d'exemple.

Id	Type de vitrages	Type de verres	Composition	Epaisseur total	Gaz intercalaire	Transmission Thermique (U) [W/m2.K]	Facteur solaire (g) [-]	Facteur de transmission lumineuse (TL) [-]	Indice d'affaiblissement acoustique (Rw) [dB]	Prix [euros]	Durée de vie typique (DVT) [ans]	Utilisation d'énergie primaire non renouvelable (EPNR) [kWh]	Consommation d'eau (FWC) [L]
vit1	Simple	Clair	6	6		5.7	0.82	0.89	29	77.59	30	82.91666667	171.5
vit2	Simple	Teinté	6	6		5.7	0.61	0.49	29	108.86	30	82.91666667	171.5
vit3	Simple	Feuilleté	4+0,76+4	9		5.7	0.81	0.9	34	130.69	30	129.4444444	244
vit4	Simple	Trempé	8	8		5.7	0.8	0.87	30	193.44	30	107.5	229
vit5	Double	Clair	6+12+6	24	Air	2.8	0.72	0.79	30	135.54	30	165.8333333	343
vit6	Double	Teinté	6+12+6	24	Air	2.8	0.5	0.44	30	161.34	30	165.8333333	343
vit7	Double	Peu émissif	4+16+4	23	Air	1.5	0.63	0.76	27	120	30	128.6111111	244
vit8	Double	Peu émissif	6+16+6	27	Air	1.5	0.61	0.74	28	150.72	30	172.5	348
vit9	Double	Peu émissif	4+15+4	23	Argon	1.3	0.63	0.76	28	125.82	30	128.6111111	244
vit10	Double	Peu émissif	6+16+6	27	Argon	1.3	0.61	0.74	29	161.77	30	172.5	348
vit11	Triple	Peu émissif	4+10+4+10+4	32	Argon	0.8	0.51	0.72	30	184.59	30	185.2777778	355
vit12	Triple	Peu émissif	4+12+4+12+4	36	Argon	0.7	0.51	0.72	30	184.59	30	213.0555556	410
vit13	Triple	Peu émissif	4+16+4+16+4	44	Argon	0.6	0.51	0.72	27	195.05	30	218.3333333	380

Figure 3.5. Extrait de la fiche des vitrages dans la base de données de composants et sources d'énergie.

Les types d'entrées définissant le format des fiches de la base de données dépendent du type d'élément en question. De manière générale, le format des fiches comprend les catégories de paramètres suivantes :

- Code identifiant : composé de trois lettres et un chiffre, ce code est utilisé pour faire référence à l'élément lors de la déclaration des données dans l'interface d'entrée et lors de son importation dans le moteur de calcul.
- Nom et description : comprenant les caractéristiques principales permettant de décrire l'élément dans la base de données.
- Données techniques : uniquement présents dans le cas des composants du bâtiment, les paramètres techniques sont donnés selon la catégorie du composant, comme présenté dans le tableau 2.12.

- Données économiques : correspondant aux valeurs du coût d'acquisition par unité fonctionnelle des éléments.
- Données environnementales : comprenant l'unité fonctionnelle, le profil environnemental et la durée de vie typique des éléments, ce dernier uniquement dans le cas des composants, comme présenté dans les tableaux 2.10 et 2.11.
- Sources : compilant la liste spécifique de références consultées pour chacun des éléments dans la base de données.

Tableau 3.1. Liste de produits de construction et de ressources énergétiques dans la base de données de l'outil d'évaluation.

Vitrages	Simple vitrage clair 6 mm
	Simple vitrage teinté 6 mm
	Simple vitrage feuilleté 9 mm
	Simple vitrage trempé 8 mm
	Double vitrage clair air (6+12+6)
	Double vitrage teinté air (6+12+6)
	Double vitrage peu émissif air (4+16+4)
	Double vitrage peu émissif air (6+16+6)
	Double vitrage peu émissif argon (4+16+4)
	Double vitrage peu émissif argon (6+16+6)
	Triple vitrage peu émissif argon (4+10+4+10+4)
	Triple vitrage peu émissif argon (4+12+4+12+4)
	Triple vitrage peu émissif argon (4+16+4+16+4)
Menuiseries	Acier
	Aluminium
	Bois
	PVC
	Structure de façade vitrée
Matériaux structurels	Brique monomur (37.5 cm)
	Brique de terre cuite (20 cm)
	Parpaing/bloc de béton (20 cm)
	Béton armé pour dalles
	Béton armé pour voiles
	Béton armé pour plancher
Matériaux d'isolation thermique	Laine de verre
	Polyuréthane
	Polystyrène expansé
	Polystyrène extrudé
Protections solaires	Store à rouleau clair
	Store à rouleau noir
	Brise-soleil orientable clair
	Brise-soleil orientable noir
Systèmes techniques	Pompe à chaleur eau/eau
	Pompe à chaleur air/air
	Pompe à chaleur air/eau
	Chaudière à fioul
	Chaudière à gaz
	Radiateurs électriques
Ressources énergétiques	Electricité (mix énergétique français)
	Gaz naturel
	Fioul

Dans cette première version de l'outil d'évaluation, la base de données contient trente-huit entrées de produits de construction et trois entrées de ressources énergétiques. Ces entrées représentent les choix identifiées dans la logique de progression des décisions de conception proposée dans la section 2.4 de ce travail. La liste de produits de construction et de ressources énergétiques dans la base de données est montrée dans le tableau 3.1.

La construction d'une base de données rassemblant trois catégories de paramètres (techniques, économiques et environnementales) exige une attention particulière pour assurer la compatibilité des données venant d'un éventail de sources d'information. Les principales hypothèses et considérations prises en compte pour la construction de la présente base de données sont présentées dans l'annexe C de ce travail. Egalement, une description générale des sources d'information consultées selon le type de paramètres est donnée dans la section 2.3.10.

3.3.2. Base de données météorologiques

Les données météorologiques nécessaires pour la modélisation du bâtiment sont fournies par une base de données météorologique intégrée à l'outil d'évaluation. Cette base de données est composée de fiches individuelles en format Excel qui recueillent les données décrivant les conditions météorologiques de différents emplacements géographiques.

Chaque fiche dans la base de données contient les valeurs horaires de sept paramètres météorologiques pour une année type de référence :

- Le rayonnement global reçu par une surface horizontale, donné en W/m^2, utilisé dans le calcul de l'absorption du flux solaire par les éléments du bâtiment.
- Le rayonnement global reçu par les surfaces verticales orientées vers les quatre points cardinaux, donné en W/m^2, utilisé dans le calcul de l'absorption du flux solaire par les éléments du bâtiment.
- La température de l'air ambiant, donnée en °C, utilisée dans le calcul des échanges thermiques du bâtiment avec l'environnement extérieur.
- L'éclairement diffus, donné en lux, utilisé dans le calcul de l'autonomie en éclairage naturel des espaces intérieurs.
- La vitesse de l'air extérieur, donnée en m/s, utilisé pour le calcul du renouvellement d'air à l'intérieur de la cavité de la façade double peau vitrée.

Les fiches météorologiques ont été obtenues avec l'aide du logiciel Meteonorm de la société Meteotest, qui représente la référence internationale en termes de l'estimation de la ressource solaire (Meteotest, 2014). Un extrait de la fiche météorologique pour la ville de Bordeaux est donné à titre d'exemple dans la figure 3.6.

G_Gh	G_GvE	G_GvS	G_GvW	G_GvN	Ta	LD	Vwind	Hour in year
[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[W/m²]	[°C]	[lux]	[m/s]	1-8760
0	0	0	0	0	12.4	0	2.3	1
0	0	0	0	0	12.1	0	1.7	2
0	0	0	0	0	11.8	0	1.4	3
0	0	0	0	0	11.7	0	1.7	4
0	0	0	0	0	11.5	0	1.7	5
0	0	0	0	0	11.4	0	2	6
0	0	0	0	0	11.3	0	1.6	7
0	0	0	0	0	11.2	0	2.4	8
0	0	0	0	0	11.2	44	2	9
46	91	83	23	23	12.1	4991	3.6	10
120	149	183	53	53	13.4	11694	3.1	11
171	131	209	73	73	14.5	16258	2.9	12
188	102	206	83	83	15.3	18836	3.3	13
185	82	197	94	82	15.8	18820	3.8	14
159	72	168	108	72	16	16520	3.1	15
109	52	93	79	52	15.9	11472	4.5	16
48	24	40	41	24	15.4	5213	3.3	17
1	1	0	0	1	14.7	130	3.8	18
0	0	0	0	0	14.1	0	2.9	19
0	0	0	0	0	13.5	0	2.9	20
0	0	0	0	0	12.9	0	3.1	21
0	0	0	0	0	12.3	0	2.3	22
0	0	0	0	0	11.7	0	1.7	23
0	0	0	0	0	11.2	0	1.5	24
0	0	0	0	0	10.4	0	1.6	25
0	0	0	0	0	9.9	0	2.9	26
0	0	0	0	0	9.2	0	4	27
0	0	0	0	0	8.8	0	3.6	28
0	0	0	0	0	8.4	0	4.5	29
0	0	0	0	0	8	0	3.6	30

Figure 3.6. Extrait de la fiche météorologique pour la ville de Bordeaux.

Dans cette première version de l'outil d'évaluation, les données météorologiques de neuf villes réparties sur le territoire français ont été documentées dans la base de données :

- Bordeaux
- Brest
- Lille
- Lyon
- Marseille
- Nantes
- Paris
- Perpignan
- Strasbourg

L'utilisateur de l'outil a la possibilité d'augmenter le nombre d'emplacements géographiques documentés dans la base de données par l'ajout de fiches météorologiques additionnelles en respectant le format présenté ci-dessus.

3.4. Moteur de calcul des indicateurs de performance énergétique

Le moteur de calcul des indicateurs représente la pièce centrale du présent outil numérique d'évaluation. Il permet d'évaluer la performance énergétique des alternatives de conception définies par l'utilisateur dans l'interface d'entrée de données. Ce moteur de calcul a été développé suivant les principes de la méthode de calcul des indicateurs de performance définie précédemment dans la section 2.3 de ce travail.

Le modèle de simulation thermique dynamique utilisé comme base de la méthode d'évaluation est une adaptation et extension du code de simulation CHAMAN, développé par le centre de ressources technologiques Nobatek. Construit sur l'environnement de développement MATLAB, de l'éditeur Mathworks, ce code permettait à la base de calculer les besoins thermiques d'une configuration de bâtiment à partir d'une modélisation par l'analogie électrique-thermique, dont le principe a été présenté dans la section 2.3.3 de ce travail.

```
1     % FICHIER PRINCIPAL DE COMMANDE (LANCEMENT DES SIMULATIONS)
2 -   clear all; close all; clc;
3
4     %_____________________________________________________________
5     % DECLARATION variables globales du probleme
6 -   global actuel reno Text Gv Gn Gh nt t Tterrain LD admin nbat parc gains clim occultation ...
7         tbase_hiver tbase_hiver_nuit tbase_ete tbase_ete_noclim Tinconfort vol Nbureaux FLJ tautonomie
8         besoinschauff besoinsclim Pchauff Pclim Plimit FDPV Vwind facade fenetre mur plancher Taircav P
9
10    %_____________________________________________________________
11    % CHARGEMENT DES DONNEES METEOROLOGIQUES et de l'option des
12    % gains/occultations
13 -  [Text Gn Gh Tterrain nt t LD Vwind]=meteo();
14    % Text : données horaires de la temperature exterieure
15    % Gv : ensoleillement vertical horaire (structure)
16    % Gh : ensoleillement horizontal horaire (vecteur)
17    % nt : nombre d'heures étudiées (1 an = 8760 h)
18    % t= heures*secondes
19    % gains : option de simulation 1=avec, 0=sans (internes+solaires)
20 -  dt=t(1);%pas de temps en s
21
22    % CHARGEMENT OPTIONS
23 -  [actuel reno gains occultation graphe tbase_hiver tbase_hiver_nuit clim tbase_ete tbase_ete_noclim
24
25    %_____________________________________________________________
26    % CHARGEMENT DES VARIABLES DU PROBLEME
27    % charge les caracteristiques des batiments
28 -  [parc nbat]=batiments();
29    % nbat%nombre de batiments constituant le parc
30    % parc : structure donnant l'ensemble des caractéristiques du parc
31 -  Ubat=zeros(1,nbat);
32    %UbatRT=zeros(1,nbat);
33    %UbatRTref=zeros(1,nbat);
34    %vsRT2005=zeros(1,nbat);
35    %_____________________________________________________________
36    % SIMULATION avant rénovation
37 -  switch actuel
38 -      case 1
39
40    % chargement parametres materiaux (variables à optimiser !)
41 -  materiaux;
```

Figure 3.7. Extrait du code de modélisation en MATLAB.

Initialement conçu comme un outil d'aide à la décision pour la rénovation énergétique patrimoniale (Hénon *et al.*, 2012), le code CHAMAN a été adapté dans ce travail pour traiter la conception de bâtiments neufs. Ceci a été fait notamment par la prise en compte de variables de conception additionnelles, telles que l'orientation du bâtiment et les taux de vitrage des façades. En outre, des modules complémentaires ont été créés et intégrés au code pour le calcul des indicateurs de performance énergétique proposés dans ce travail. Un extrait du code de modélisation est montré dans la figure 3.7 à titre d'exemple.

De manière générale, l'exécution du moteur de calcul suit les étapes suivantes :

1) Importation des paramètres de simulation et des variables de conception décrivant les alternatives du bâtiment définies par l'utilisateur, à partir des feuilles d'exportation de l'interface d'entrée.
2) Importation des données météorologiques décrivant les conditions du site d'implantation, à partir de la base de données correspondante.

3) Importation des données techniques, économiques et environnementales des composants et sources d'énergie mis en œuvre dans les alternatives de conception, à partir de la base de données correspondante.
4) Simulation thermique dynamique de chacune des alternatives de conception du bâtiment.
5) Calcul des indicateurs de performance énergétiques, à partir des variables de conception et des résultats de la simulation thermique dynamique.
6) Exportation des résultats de l'évaluation de la performance énergétique des alternatives de conception vers l'interface d'exploitation.

3.5. Interface d'exploitation de résultats

Les résultats du moteur de calcul sont présentés sous la forme d'un tableau en format Excel, contenant les valeurs calculées des seize indicateurs de performance énergétique pour chacune des alternatives de conception définies par l'utilisateur. Le choix du format de l'interface d'exploitation répond au besoin d'un traitement simple de données et une représentation graphique flexible, pour ainsi faciliter l'interprétation des résultats.

Trois types de présentation des résultats sont proposés dans la première version de l'interface d'exploitation :

- Les valeurs calculées des indicateurs de performance, avec trois niveaux de valeurs de référence.
- La variation en pourcentage des indicateurs par rapport à une configuration de bâtiment de référence.
- Un découpage détaillé des indicateurs environnementaux et économiques en fonction des processus du cycle de vie ou des postes de consommation énergétique.

La méthodologie proposée dans ce travail a comme objectif de donner au concepteur des éléments de décision par la comparaison des alternatives de conception en fonction de leur performance énergétique. Néanmoins, afin de donner à l'utilisateur des points de repère généraux pour l'interprétation des valeurs des indicateurs, le tableau de résultats propose trois types de valeurs de référence, chacun correspondant à un certain niveau de performance :

- Un niveau dit « acceptable », associé à la valeur minimale permise par le cadre réglementaire français.
- Un niveau « moyen », représentatif des bonnes pratiques actuelles dans les projets de construction en France.
- Un niveau « performant », donné par des valeurs « idéales » ou associées aux plus hauts niveaux de performance dans le cadre réglementaire.

Le tableau de résultats de l'évaluation des indicateurs de performance énergétique, intégrant les valeurs de référence mentionnées ci-dessus, est montré dans la figure 3.8.

	Indicateur de performance	Unités	Niveau acceptable	Niveau moyen	Niveau performant	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
Impacts environnementaux	Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	$kWh_{EP}/(m^2_{plancher}\cdot année)$		135				
	Consommation d'eau	$L/(m^2_{plancher}\cdot année)$		300				
	Déchets dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$		1.02E-01				
	Déchets non dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$		11.7				
	Déchets radioactifs éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$		5.20E-03				
	Potentiel de réchauffement climatique	$kg\ CO_2\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$		16				
	Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	$kg\ SO_2\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$		7.10E-02				
	Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone trophosphérique	$kg\ C_2H_4\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$		3.75E-02				
	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	$kg\ CFC\ 11\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$		9.96E-06				
Coûts économiques	Coût global	$€/m^2_{plancher}$						
	Coût de construction	$€/m^2_{plancher}$		1827				
	Coût d'exploitation	$€/m^2_{plancher}$						
Confort de l'usager	Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel	$\%_{temps\text{-}occupation}$			100			
	Pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur	$\%_{occupants}$	74.26	80	85			
	Isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission	dB	30		45			
	Pourcentage de temps de confort thermique	$\%_{temps\text{-}occupation}$		98	100			

Figure 3.8. Tableau de résultats de l'évaluation des indicateurs de performance énergétique du bâtiment.

Dans le cas des indicateurs environnementaux, les valeurs de référence correspondent aux résultats de l'étude de modélisation HQE Performance 2012 (CSTB, 2013), ayant comme objectif d'identifier les ordres de grandeurs des impacts environnementaux des bâtiments performants en France. Les valeurs ici sélectionnées pour le niveau moyen représentent la somme des médianes des impacts des postes réglementaires de consommation d'énergie et de mise en œuvre de produits de construction.

En ce qui concerne les indicateurs économiques, seulement une valeur est donnée à titre de comparaison : le coût de construction moyen pour un bâtiment de bureaux en France. La source de cette valeur est la base de données de l'Observatoire des Prix Constatés d'Opérations de Construction en France (OPCOC, 2014).

Pour l'indicateur de confort visuel, la valeur identifiée pour le niveau performant correspond à une couverture totale des besoins en éclairage naturel des espaces intérieurs.

En ce qui concerne l'indicateur de qualité de l'air intérieur, trois valeurs de référence ont été identifiées :

- Le niveau dit acceptable correspond au débit minimal de renouvellement d'air par occupant donné pour les bâtiments de bureaux dans le Règlement Sanitaire Départemental Type (Legifrance, 1995), égal à 18 m^3/(h.occ).
- Le niveau moyen est donné par le débit minimal de renouvellement d'air par occupant pour les bureaux précisé dans le Code du Travail dans son article R4222-6 (Legifrance, 2015), égal à 25 m^3/(h.occ).
- Le niveau performant correspond au débit de renouvellement d'air par occupant proposé dans la norme EN 15251 pour la plus haute catégorie de confort des occupants (CEN/TC 350, 2012), égal à 36 m^3/(h.occ), comme montré dans le tableau 2.9 de ce travail.

Dans le cas du confort acoustique, la valeur de niveau acceptable correspond à l'exigence de base de la démarche HQE (Certivéa, 2011), tandis que le niveau performant est caractérisé par l'exigence maximale du cadre réglementaire, donné par l'arrêté du 30 mai 1996 (MELTT, 1996).

Enfin, pour le confort hygrothermique, le niveau moyen correspond à la valeur moyenne des exigences de la démarche HQE (Certivéa, 2011), tandis que le niveau performant est donné par une couverture totale des besoins de confort thermique.

Comme mentionné précédemment, le principe d'aide à la prise de décisions de la méthodologie ici proposée est donné par la comparaison des alternatives de choix disponibles au concepteur en fonction de leur performance énergétique. Afin de simplifier la comparaison de ces résultats, l'interface de sortie propose également de les présenter sous la forme de la variation en pourcentage des indicateurs par rapport à une configuration de référence. Cette configuration de référence est définie librement par l'utilisateur.

Le calcul de la variation en pourcentage (ΔX_1) de la valeur d'un indicateur pour une alternative de conception donnée (X_1) par rapport à la valeur de la configuration de référence (X_0) est donné comme suit :

$$\Delta X_1 = \frac{(X_1 - X_0)}{X_0} \cdot 100\%$$

Le choix de la variation en pourcentage par rapport à une référence comme stratégie de comparaison permet ainsi de mettre en valeur la différence relative entre alternatives de conception. Cette approche permet également de normaliser les résultats par rapport à cette référence, en simplifiant leur visualisation de manière simultanée.

Pour faciliter leur interprétation, l'interface d'exploitation propose de représenter graphiquement ces résultats de deux façons différentes :

- Avec des courbes d'évolution d'indicateurs : recommandé pour l'étude de variables de conception de type quantitatif, comme l'orientation du bâtiment, le taux de vitrage des façades ou l'épaisseur de l'isolation thermique de l'enveloppe.
- Avec des graphes de type « radar » : recommandé pour l'étude de variables de conception de type catégoriel ou qualitatif, comme le type de vitrages, le côté de l'isolation thermique de l'enveloppe ou la présence d'une façade double peau vitrée.

Ces deux types de visualisation des résultats sont montrés dans la figure 3.9.

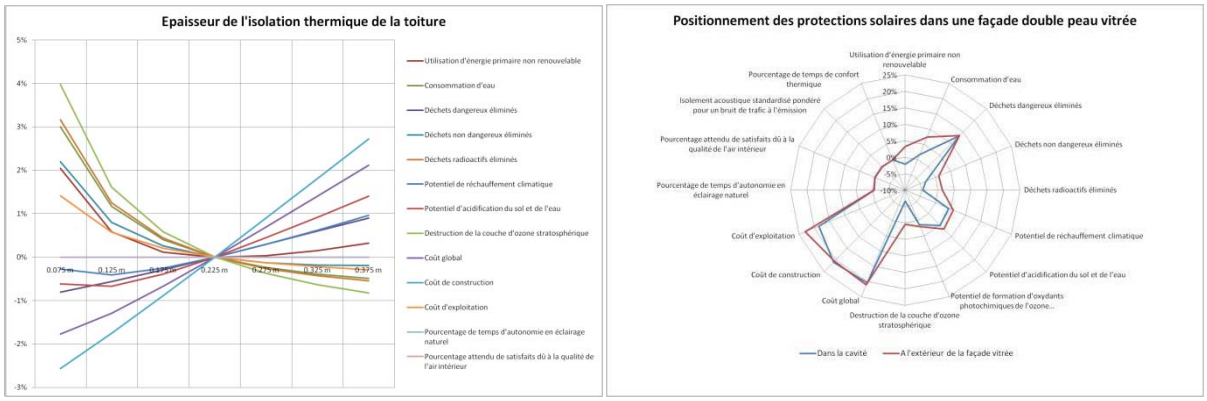

Figure 3.9. Exemples des courbes d'évolution d'indicateurs et de graphes de type « radar ».

De manière complémentaire, l'outil d'évaluation fournit également un découpage détaillé des valeurs des indicateurs environnementaux et de coût des alternatives de conception de deux manières différentes. Le premier découpage décompose les valeurs de ces indicateurs selon le type de processus du cycle de vie du bâtiment :

- Construction du bâtiment
- Remplacement de composants
- Consommations énergétiques des postes réglementaires

Les consommations énergétiques peuvent être subséquemment décomposées en fonction du poste de consommation :

- Chauffage
- Refroidissement
- Ventilation
- Eclairage

La figure 3.10 montre le tableau de découpage détaillé par type de poste de consommation d'énergie et par type de processus du cycle de vie.

		Alternative 1						
Indicateur de performance	Unités	Chauffage	Climatisation	Ventilation	Eclairage	Consommations	Construction	Remplacement
Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	$kWh_{ep}/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Consommation d'eau	$L/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Déchets dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Déchets non dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Déchets radioactifs éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Potentiel de réchauffement climatique	$kg\ CO_2\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	$kg\ SO_2\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone trophosphérique	$kg\ C_2H_4\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	$kg\ CFC\ 11\text{-eq.}/(m^2_{plancher}\cdot année)$							
Coût	$€/m^2_{plancher}$							

Figure 3.10. Tableau montrant le découpage détaillé par type de poste de consommation d'énergie et par type de processus du cycle de vie.

Ce découpage des indicateurs environnementaux et économiques permet d'étudier de manière plus précise les impacts des décisions de conception sur les différents aspects composant la performance énergétique du bâtiment. Ceci apporte au concepteur des éléments de décision additionnels pour la définition d'une stratégie d'amélioration de la performance énergétique.

3.6. Conclusions

La méthodologie d'aide à la décision pour la conception énergétique de bâtiments durables dans les premières phases de projet proposée dans ce travail a été mise en œuvre sous la forme d'un outil numérique d'évaluation d'alternatives de conception.

L'objectif de cet outil est de donner au concepteur des éléments de choix pour guider sa prise de décisions par la comparaison d'alternatives de conception à chaque étape du processus de conception. Pour cela, l'outil numérique propose au concepteur :

- Une saisie de données d'entrée simple et adaptée à la progression des décisions au long des trois premières phases du processus de conception d'un bâtiment.
- Une évaluation intégrale des indicateurs de performance énergétique avec un temps de simulation réduit, pour permettre une exploration effective de l'espace de décision disponible à chaque phase de projet.
- Deux bases de connaissance intégrées à l'outil d'évaluation, qui peuvent être aisément mises à jour par l'utilisateur.
- Une présentation des résultats de la modélisation adaptée aux besoins des utilisateurs ciblés par l'outil : architectes et ingénieurs de bureaux d'études.

Dans le prochain chapitre, l'outil numérique proposé dans ce travail sera mis en œuvre à travers de divers cas d'études, afin d'étudier ce qu'il peut apporter au concepteur comme éléments d'aide à la prise de décisions dans la conception énergétique dans les premières phases de projet.

Chapitre 4 Validation de la méthodologie d'évaluation

La construction de l'outil numérique d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment présenté dans le chapitre précédent permet de valider la logique de la méthodologie d'aide à la décision proposée dans ce travail. L'objectif de ce chapitre est maintenant d'étudier l'intérêt de la mise en œuvre de la méthodologie par son application dans divers cas d'étude, afin d'identifier ce qu'elle peut apporter au concepteur comme éléments d'aide à la prise de décisions.

La méthode d'évaluation ici développée permet d'étudier l'impact des décisions de conception à prendre tout au long des premières phases de projet sur la performance énergétique des bâtiments. L'outil numérique permet de présenter les résultats de l'évaluation de différentes manières afin de faciliter leur interprétation par l'utilisateur. Afin d'illustrer les différentes représentations des résultats ainsi que le phasage de décisions de conception ici proposé, le présent chapitre est structuré en quatre parties :

- Dans un premier temps, la performance énergétique de la configuration de bâtiment de base, définie dans la section 2.4.2, sera évaluée et mise en contexte. Pour ce faire, les résultats de l'évaluation seront comparés avec les valeurs de référence proposées dans l'interface d'exploitation et présentées dans la section 3.5.
- Ensuite, l'intérêt de l'utilisation de l'outil sera discuté à travers l'étude de l'effet de deux décisions de conception ayant un potentiel d'impact majeur sur la performance du bâtiment : l'orientation du bâtiment et le taux de vitrage de la façade sud. Cette analyse aura lieu sous la forme d'études paramétriques, caractérisant la performance des alternatives de conception dans l'espace de possibilités identifié pour chaque décision.
- Dans une troisième section, l'effet de la présence d'une façade double peau vitrée sur la performance énergétique du bâtiment sera étudié. La configuration de la façade vitrée à considérer dans cette analyse est celle donnée dans la configuration de base, définie dans la section 2.4.2.
- Finalement, un exemple de scénario de conception suivant la logique de progression des décisions sera présenté, de manière à illustrer la démarche progressive de prise de décisions. Ceci permettra d'adapter la configuration de base de la façade double peau vitrée au contexte climatique de Bordeaux.

Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'approche favorisée pour la présentation des résultats dans l'outil d'évaluation est la variation en pourcentage des indicateurs de performance par rapport à une configuration de référence. Afin de simplifier la comparaison de résultats au long de ce chapitre, la configuration de bâtiment de base sera utilisée comme point de référence. Ainsi, avant de passer à l'étude de l'effet des décisions de conception mentionnées ci-dessus, il est important d'évaluer et mettre en contexte la performance énergétique de cette configuration de bâtiment.

4.1. Evaluation de la configuration du bâtiment de base

La configuration de bâtiment de base représente les valeurs par défaut des choix de conception dans la logique de progression de décisions proposée dans ce travail. Ces valeurs de choix par défaut sont considérées pour les variables de conception avant qu'elles soient décidées, et couvrent les décisions à prendre à partir de la deuxième étape de cette logique. Par contre, les choix à effectuer lors de la première étape de la logique (la sous-phase « Géométrie » de la phase d'Esquisse) ne sont pas définis dans la configuration de base. Au long de ce chapitre, les valeurs à considérer pour ces premières décisions de conception, représentatives d'un bâtiment de bureaux de taille moyenne, sont données dans le tableau 4.1

Tableau 4.1. Choix de conception à considérer pour la sous-phase « Géométrie » de la phase d'Esquisse.

Type d'élément du bâtiment	Décisions de conception	Valeurs
Bâtiment dans son ensemble	Largeur du bâtiment	14 m
	Longueur du bâtiment	95 m
	Orientation par rapport au sud	0°
	Nombre de niveaux	4 niveaux
	Hauteur sous dalle	3 m

En plus des choix de conception, les données d'entrée nécessaires pour l'évaluation du bâtiment par l'outil numérique incluent les paramètres de simulation. Dans cette analyse, les valeurs de ces paramètres ont été choisies de manière à représenter un bâtiment typique de bureaux pour sa construction à Bordeaux. Les consignes de température et l'intervalle de confort thermique sont des valeurs standards identifiés dans le cadre normatif français (Legifrance, 2015) et la démarche HQE (Certivéa, 2011). La répartition d'espaces intérieurs est basée sur une étude des bâtiments de l'Université de Bordeaux réalisée par le centre de ressources technologiques Nobatek. La gestion du système de ventilation est donnée par des pratiques courantes dans l'industrie du bâtiment. Le taux d'actualisation considéré est proposé comme une valeur de base dans la norme EN 15643-4 (CEN/TC 350, 2012). L'ensemble des valeurs choisies pour les paramètres de simulation est montré dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Paramètres de simulation considérés pour l'évaluation de la configuration du bâtiment de base.

	Paramètres de simulation	Valeurs
Site d'implantation	Emplacement du site d'implantation	Bordeaux
	Angle de ciel ouvert	80°
Consignes de température	Température de consigne de chauffage en occupation	19 °C
	Température de consigne de chauffage hors occupation	15 °C
	Température de consigne de climatisation	26 °C
Modèle de confort thermique	Température représentant la borne inférieure de l'intervalle de confort thermique	17 °C
	Température représentant la borne supérieure de l'intervalle de confort thermique	28 °C
Répartition d'espaces intérieurs	Ratio entre la surface des bureaux et le total de la surface habitable	48.25%
	Ratio entre la surface des salles de réunion et le total de la surface habitable	4.63%
	Ratio entre la surface des circulations et le total de la surface habitable	31.11%
	Ratio entre la surface des autres espaces et le total de la surface habitable	16.01%
	Nombre de bureaux dans le bâtiment	100 bureaux
Système de ventilation	Débit de renouvellement d'air par infiltrations	0.1 vol/h
	Jour de l'année représentant la fin de la période de fonctionnement du système de ventilation double flux	Jour 105
	Jour de l'année représentant le début de la période de fonctionnement du système de ventilation double flux	Jour 289
Actualisation des dépenses	Taux réel d'actualisation	3%

Les résultats de l'évaluation des indicateurs de performance énergétique de la configuration de bâtiment de base, ainsi que les valeurs de référence présentées dans la section 3.5, sont montrés dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5.

Tableau 4.3. Evaluation des indicateurs environnementaux de la configuration du bâtiment de base.

	Indicateur de performance	Unités	Niveau moyen	Configuration de référence
Impacts environnementaux	Utilisation d'énergie primaire non renouvelable	$kWh_{EP}/(m^2_{plancher}\cdot année)$	135	46.69
	Consommation d'eau	$L/(m^2_{plancher}\cdot année)$	300	100.82
	Déchets dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$	1.02E-01	2.27E-02
	Déchets non dangereux éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$	11.7	7.10E-01
	Déchets radioactifs éliminés	$kg/(m^2_{plancher}\cdot année)$	5.20E-03	2.19E-03
	Potentiel de réchauffement climatique	kg CO_2-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$	16	4.52
	Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg SO_2-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$	7.10E-02	2.27E-02
	Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg C_2H_4-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$	3.75E-02	1.92E-03
	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC 11-eq./$(m^2_{plancher}\cdot année)$	9.96E-06	1.67E-07

Tableau 4.4. Evaluation des indicateurs économiques de la configuration du bâtiment de base.

	Indicateur de performance	Unités	Niveau moyen	Configuration de référence
Coûts économiques	Coût global	$€/m^2_{plancher}$	-	516.44
	Coût de construction	$€/m^2_{plancher}$	1827	414.02
	Coût d'exploitation	$€/m^2_{plancher}$	-	102.42

En ce qui concerne les dimensions environnementale et économique, les valeurs résultantes de l'évaluation sont toutes considérablement inférieures aux niveaux de référence. Dans le cas de la dimension environnementale, les valeurs des indicateurs représente en moyenne autour de 23% des niveaux identifiés lors de l'étude de modélisation HQE Performance, avec une variabilité importante entre les différents indicateurs. Par exemple, la valeur calculée de l'indicateur sur les déchets radioactifs représente autour de 42% du résultat de l'étude, tandis que pour l'indicateur sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique ce pourcentage est inférieur à 2%. Similairement, l'indicateur évalué pour le coût de la construction dans la configuration de référence représente environ de 23% de la valeur moyenne des bâtiments de bureaux en France.

Cette différence entre les résultats de l'évaluation de la configuration de base et les niveaux de référence ici considérés s'explique par deux raisons. D'une part, le périmètre d'analyse de l'évaluation dans le présent travail a été limité aux éléments du bâtiment fortement liés à la performance énergétique et qui sont définis dans les premières phases de conception. Les éléments non considérés incluent notamment les équipements techniques associés à l'installation électrique, la ventilation et la plomberie, ainsi que les composants de second œuvre liés au revêtement de sols, les plafonds suspendus et les états de surface. Ces éléments sont par contre pris en compte dans le périmètre d'analyse des valeurs de référence, ce qui explique en partie cette différence de résultats.

D'une autre part, la configuration du bâtiment de base, issue d'une analyse de la base de projets de l'Observatoire BCC et enrichi par des échanges avec le centre de ressources technologiques Nobatek, représente des valeurs typiques de projets performants en France. Ainsi, il semble logique que cette configuration exhibe un niveau de performance énergétique favorable, en combinant des bonnes pratiques courantes dans le domaine.

Tableau 4.5. Evaluation des indicateurs de confort des usagers de la configuration de bâtiment de base.

	Indicateur de performance	**Unités**	**Niveau acceptable**	**Niveau moyen**	**Niveau performant**	**Configuration de référence**
Confort de l'usager	Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel	$\%_{temps\text{-}occupation}$	-	-	100	97.27
	Pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur	$\%_{occupants}$	74.26	80	85	74.26
	Isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission	dB	30	-	45	33
	Pourcentage de temps de confort thermique	$\%_{temps\text{-}occupation}$	-	98	100	100

Ce même raisonnement peut expliquer les bons résultats de cette configuration de base en ce qui concerne les indicateurs de confort des usagers. La configuration de base permet d'assurer un confort thermique dans la totalité du temps d'occupation, ainsi qu'une partie majoritaire des besoins d'éclairage naturel dans les espaces d'intérêt (bureaux et salles de réunion). La valeur obtenue pour l'indicateur de confort acoustique est aussi assez pertinente, avec trois décibels au dessus du niveau réglementaire, surtout en considérant qu'il est exprimé dans une échelle logarithmique. Par ailleurs, la valeur calculée de l'indicateur de qualité de l'air intérieur pour la configuration de base est placée à l'extrême bas de l'intervalle des valeurs de référence. Ceci s'explique par le fait que la valeur du

taux de renouvellement d'air de cette configuration est considérée égale à la valeur minimale définie par le cadre réglementaire, qui est généralement le cas dans la pratique courante.

De manière générale, les valeurs calculées des indicateurs environnementaux et économiques pour la configuration de bâtiment de base semblent être des résultats raisonnables et cohérents avec les valeurs de référence. Néanmoins, les différences dans la définition du périmètre d'analyse entre la méthode d'évaluation ici proposée et les sources de ces valeurs de référence limitent la validité de leur comparaison. Ainsi, en raison du manque d'études de référence compatibles en termes de la définition du périmètre d'analyse, l'approche comparative proposée dans ce travail, à travers l'étude de la variation en pourcentage par rapport à une configuration de référence, représente la solution la plus pertinente pour l'aide à la prise de décisions. Les valeurs des résultats pour la configuration de base seront alors utilisées en tant que référence pour le calcul de la variation en pourcentage des indicateurs, afin de faciliter leur présentation et interprétation au long de ce chapitre.

4.2. Effet de l'orientation du bâtiment

Dans la phase d'Esquisse, une des premières décisions à prendre dans la conception d'un bâtiment est son orientation par rapport au sud. Ce choix de conception, apparemment simple, a un rôle déterminant dans la performance énergétique du bâtiment, notamment dans la répartition des apports solaires incidents sur les façades (Liébard *et al.*, 2005).

L'orientation du bâtiment, aussi appelé azimut (α), est généralement donnée en termes de la différence angulaire entre la perpendiculaire d'une des façades principales et la direction sud ou nord, selon l'hémisphère. Par exemple, un bâtiment dans l'hémisphère nord dont une des façades principales est orientée plein sud est associé à un angle d'orientation égal à zéro degré, comme montré sur la figure 4.1.

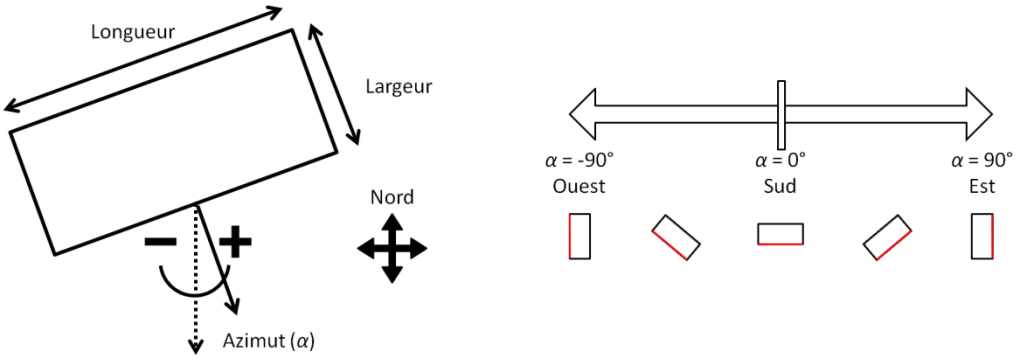

Figure 4.1. L'angle d'orientation du bâtiment par rapport au sud.

Comme présenté dans la figure 4.2, le choix de l'orientation selon la logique de progression des décisions ici proposée est à effectuer tout au début du processus de conception, dans la sous-phase

« Géométrie » de la phase d'Esquisse. En fonction des contraintes du site d'implantation, le concepteur peut orienter le bâtiment avec n'importe quelle valeur d'azimut comprise entre -90° et 90°, avec la façade principale orientée à l'ouest et à l'est respectivement. Comme montré dans le tableau 4.1, l'angle d'orientation de la configuration de référence est considéré égal à 0°, c'est-à-dire avec une des façades principales orientée plein sud.

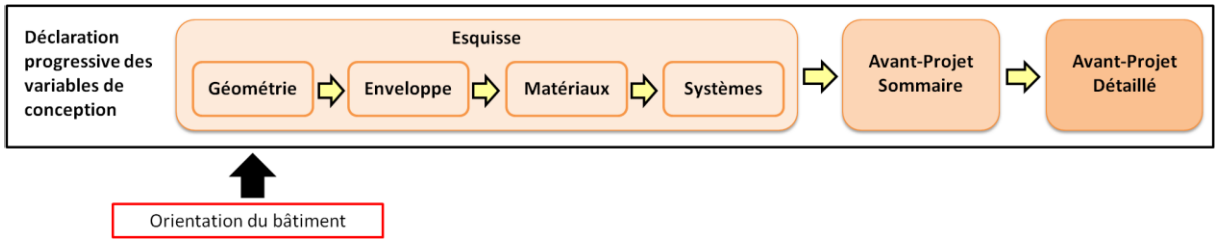

Figure 4.2. Positionnement du choix de l'orientation du bâtiment selon la logique de progression de décisions proposée.

Dans un premier temps, une étude paramétrique sur tout l'espace de décision a été faite pour identifier les tendances générales des indicateurs de performance. Les résultats, présentés en termes de la variation en pourcentage par rapport à la configuration de bâtiment de base, sont montrés sur la figure 4.3.

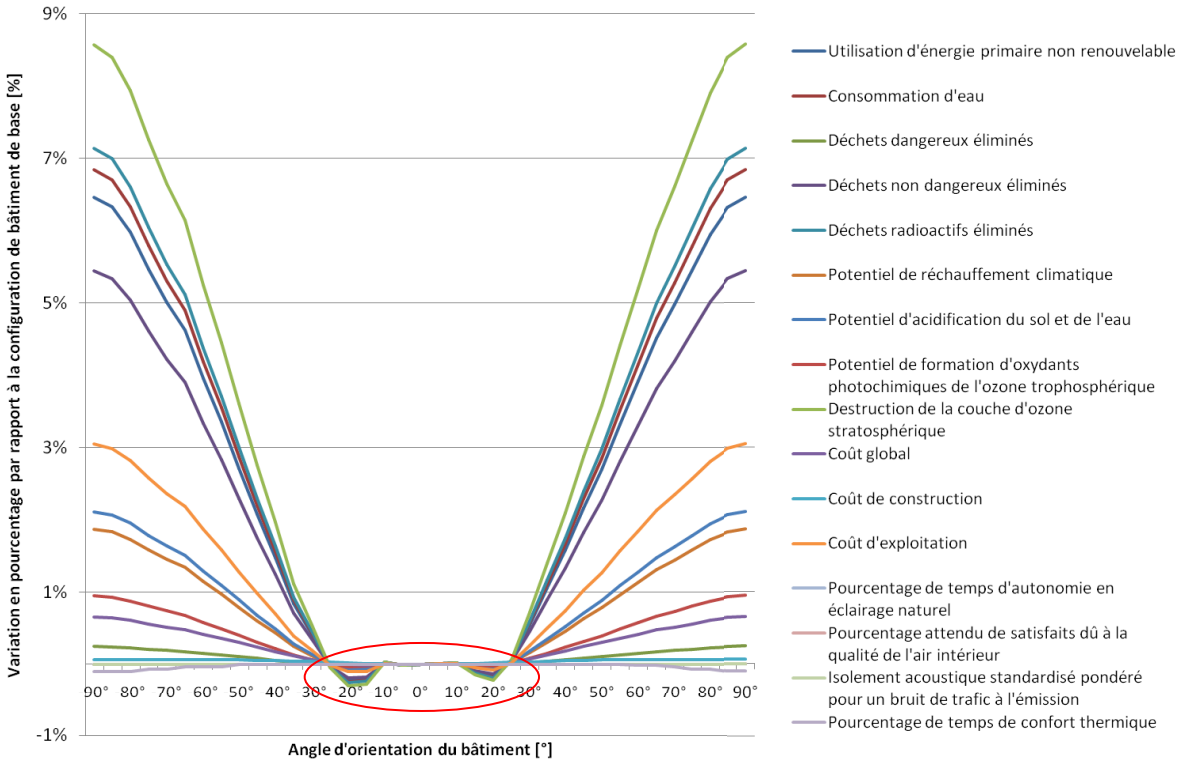

Figure 4.3. Variation en pourcentage de tous les indicateurs de performance pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation.

Lors de cette première analyse de l'espace complet de décision, un intervalle de variation minimale des indicateurs est identifié de manière assez symétrique entre les valeurs d'azimut -30° et 30° (entouré en rouge dans la figure 4.3). La performance énergétique du bâtiment n'est pas considérablement impactée dans cet intervalle, à part une légère diminution d'une partie des indicateurs près des extrêmes. Par contre, au-delà de cette zone une augmentation importante de la majorité des indicateurs environnementaux et économiques peut être observée.

L'importance de l'effet du choix de l'orientation du bâtiment dans sa performance énergétique varie d'un indicateur à l'autre. Cette influence sur la performance résultante est caractérisée par la sensibilité de chaque indicateur à la variation de la variable de conception en question. D'un côté, une partie des indicateurs environnementaux et économiques présentent un comportement très sensible à la variation de l'angle d'orientation. Ces indicateurs sont, en ordre décroissant de degré de sensibilité :

- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique
- Déchets radioactifs éliminés
- Consommation d'eau
- Utilisation d'énergie primaire non renouvelable
- Déchets non dangereux éliminés

D'autres indicateurs sont également affectés par la variation de cette variable de conception, mais à un degré moins prononcé. C'est le cas des indicateurs suivants, encore une fois nommés en ordre décroissant de degré de sensibilité :

- Coût d'exploitation
- Potentiel d'acidification du sol et de l'eau
- Potentiel de réchauffement climatique
- Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique
- Coût global

D'autre part, trois indicateurs présentent un degré minimum de sensibilité par rapport à la variation de l'azimut : les déchets dangereux éliminés, le coût de construction et le pourcentage de temps de confort thermique. Finalement, le reste des indicateurs de confort des usagers (visuel, acoustique et de qualité de l'air) n'ont pas montré des effets à cause de la variation de l'orientation du bâtiment.

Vis-à-vis de ces observations sur la sensibilité des indicateurs, l'orientation du bâtiment joue un rôle très important dans la performance énergétique du bâtiment. Le choix de l'angle d'orientation a des effets considérables sur la majorité des indicateurs, en fonction du degré de sensibilité de chacun par rapport à cette décision de conception.

Afin d'identifier les valeurs d'azimut du bâtiment avec des effets désirables dans sa performance, une visualisation par type de critère de performance sera présentée en se limitant à l'intervalle d'intérêt compris entre -30° et 30°.

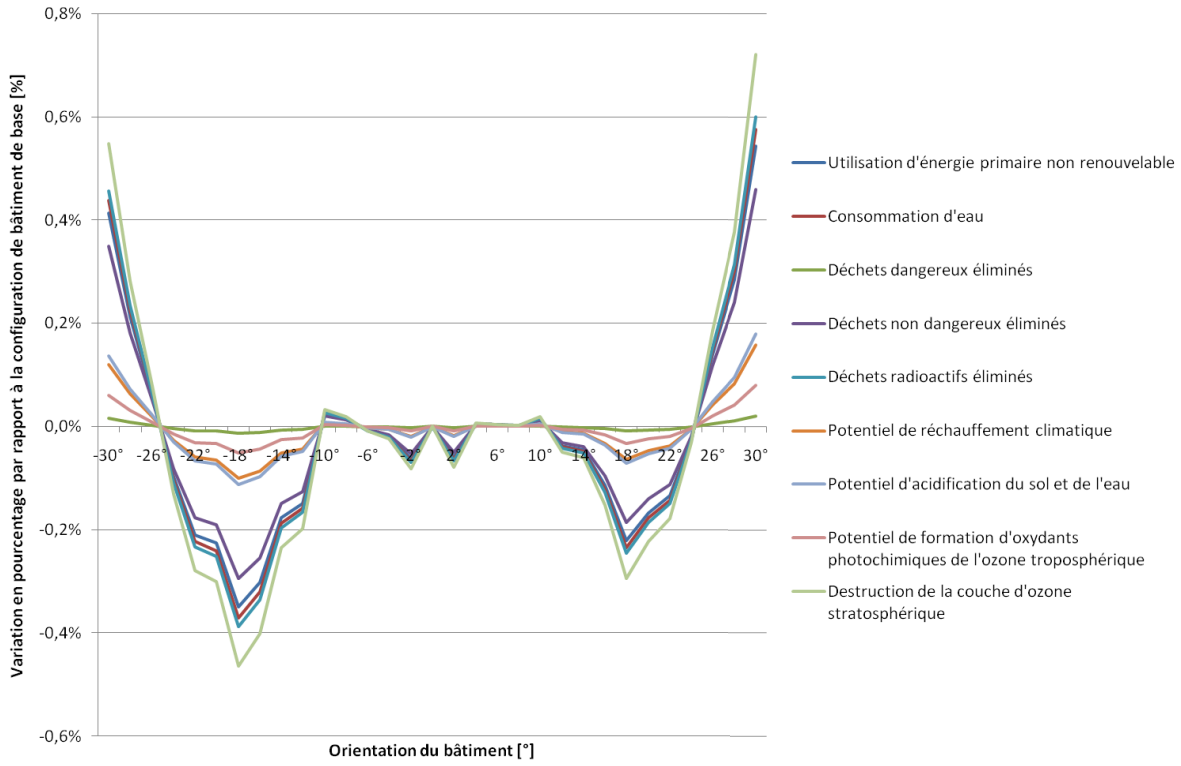

Figure 4.4. Variation en pourcentage des indicateurs environnementaux pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation pour valeurs entre -30° et 30°.

En ce qui concerne la dimension environnementale, représentée dans la figure 4.4, une légère réduction de la valeur de la totalité de ces indicateurs peut être observée autour des azimuts -18° et 18°. Ceci est dû notamment à, respectivement, une diminution de l'ordre de 2% et 1.5% des besoins annuels de refroidissement par rapport à l'orientation plein sud. Les indicateurs les plus affectés dans ce cas sont alors ceux associés à la consommation d'énergie électrique du fait de l'utilisation d'une pompe à chaleur dans la configuration de base.

Une légère asymétrie peut être observée dans les courbes d'évolution des indicateurs autour de l'orientation sud. Ce comportement peut être expliqué par la combinaison de deux facteurs : la disponibilité irrégulière du rayonnement solaire et les différences entre zones thermiques en termes des besoins en confort thermique et des scénarios d'occupation. Dans le présent cas d'étude, les zones thermiques sont réparties de manière homogène entre les deux façades (comme montré dans la figure 2.5), ce qui limite l'amplitude de cette asymétrie. Néanmoins, ce phénomène pourrait être utilisé de manière positive dans la conception du bâtiment, en adaptant l'orientation du bâtiment en fonction de la répartition d'espaces intérieurs au long des façades, ce qui représenterait un élément de décision utile pour le concepteur.

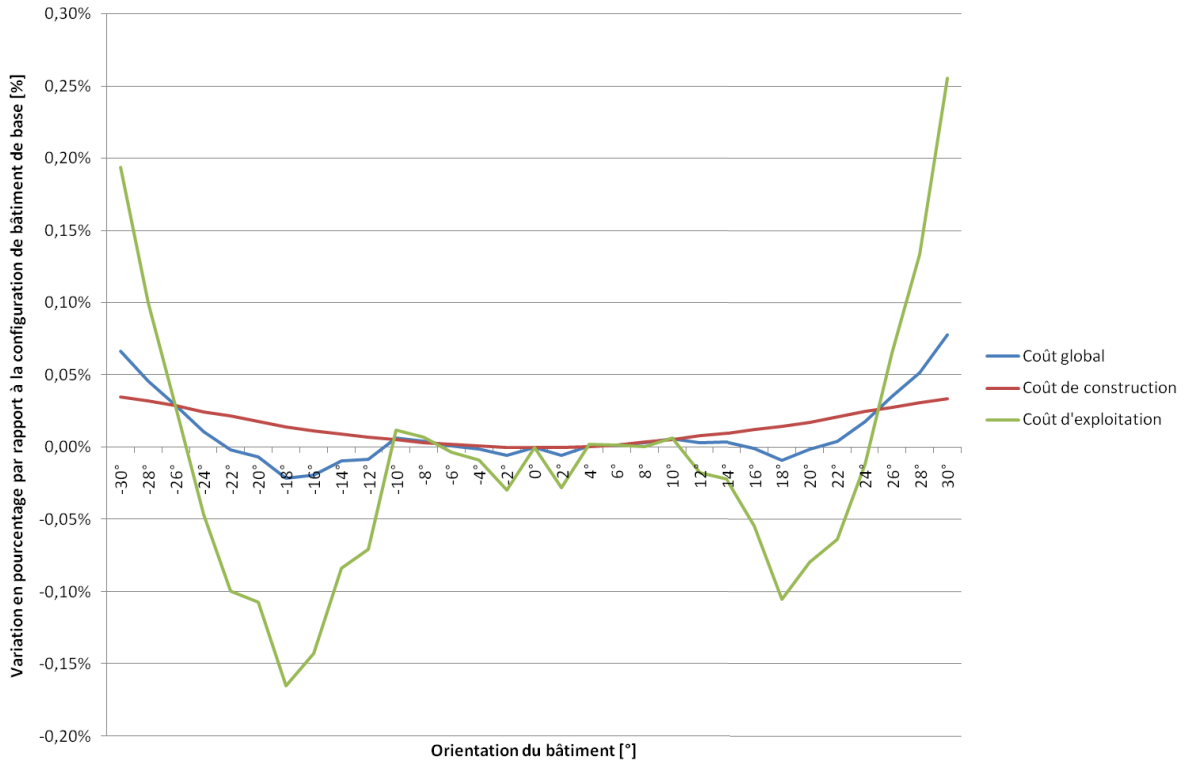

Figure 4.5. Variation en pourcentage des indicateurs économiques pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation pour valeurs entre -30° et 30°.

La diminution des besoins de refroidissement commenté précédemment entraîne logiquement une réduction du coût d'exploitation autour des mêmes valeurs de l'azimut, comme montré sur la figure 4.5. En outre, une légère augmentation du coût de construction peut être observée à mesure qu'on s'éloigne d'une orientation plein sud. Ceci s'explique par une augmentation dans le dimensionnement du système de chauffage, en raison de la réduction des apports solaires récupérés en hiver par le bâtiment. La variation du coût global reste ainsi intermédiaire entre les tendances des coûts d'exploitation et de construction.

En ce qui concerne les indicateurs de confort des occupants, la variation de l'orientation du bâtiment a un effet limité sur la performance de la configuration de base. D'une part, les indicateurs de performance acoustique et de qualité de l'air intérieur ne sont pas évidemment affectés par le changement d'orientation. D'autre part, le temps d'autonomie en éclairage naturel n'a pas été impacté non plus, en raison d'un taux de vitrage suffisant pour les façades principales, égal à 40% de leurs surfaces dans la configuration de base. Par contre, une légère diminution du pourcentage de temps de confort thermique peut être observée dans la figure 4.6 à partir de valeurs d'azimut supérieures à -55° et 60° Ceci est dû à l'apparition de surchauffes dans les zones thermiques en période estivale.

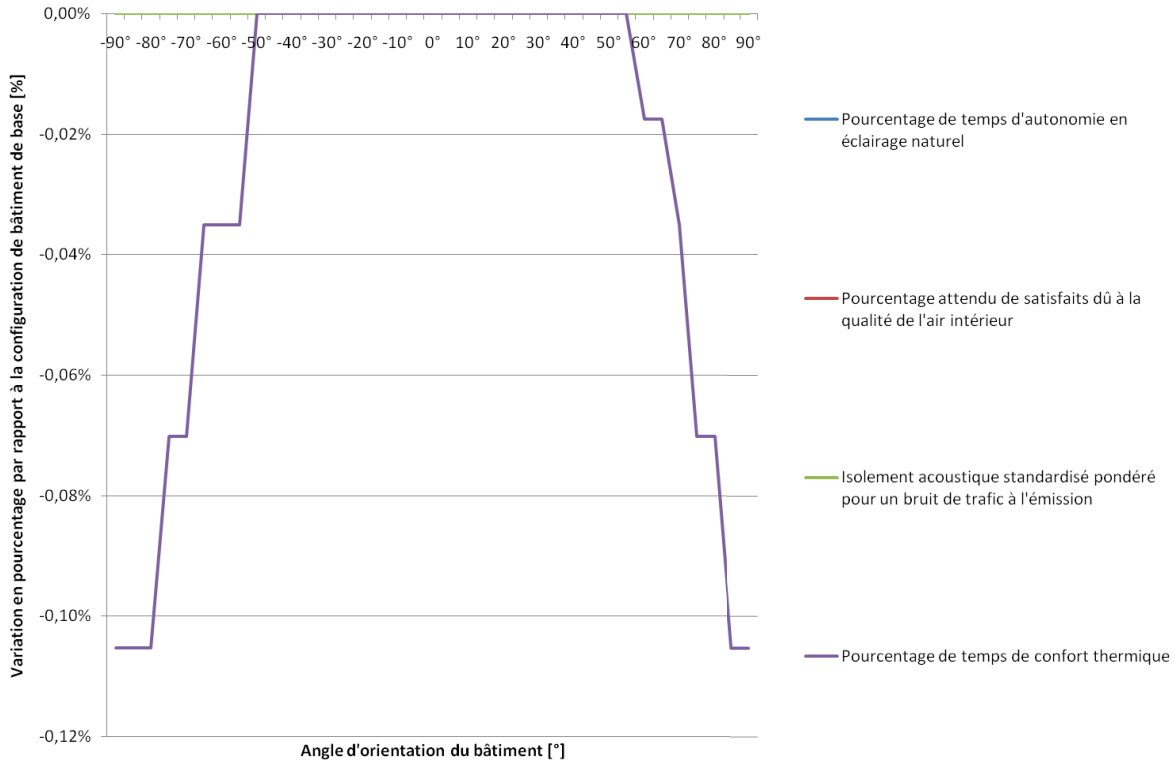

Figure 4.6. Variation en pourcentage des indicateurs de confort des usagers pour la configuration de bâtiment de base en fonction de l'angle d'orientation.

Deux conclusions peuvent être tirées de ce premier cas d'étude. D'une part, des valeurs d'orientation du bâtiment ont été identifiées qui permettent de minimiser les impacts environnementaux et économiques sans affecter de manière défavorable les conditions de confort des occupants. D'autre part, le choix de l'orientation peut être effectué en fonction de la répartition des espaces au long des façades, en tenant compte de leurs besoins en confort thermique et leurs scénarios d'occupation. Ces deux conclusions représentent des éléments de décision importants dans le choix de l'angle d'orientation du bâtiment.

4.3. Effet du taux de vitrage des façades

De manière générale, une façade de type traditionnelle est composée de surfaces opaques (murs de l'enveloppe) et des surfaces vitrées (baies vitrées, y compris menuiseries). Le ratio entre les surfaces vitrées et la surface totale d'une façade quelconque est appelé le taux de vitrage. Ce paramètre peut être choisi de manière indépendante pour chacune des façades du bâtiment afin de maîtriser les apports solaires entrants dans les espaces et les pertes thermiques du bâtiment par son enveloppe.

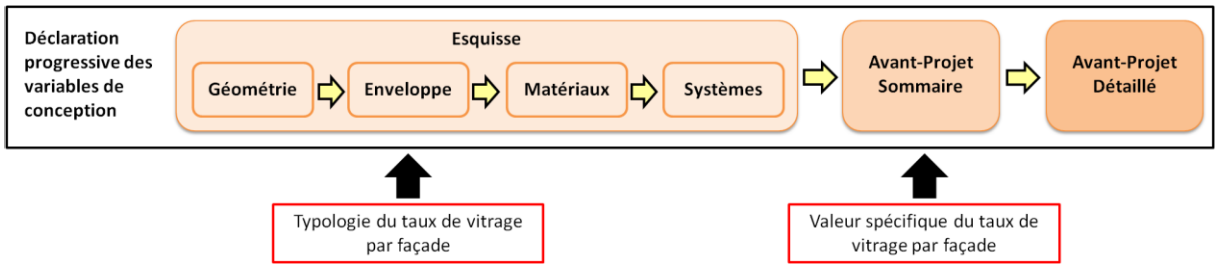

Figure 4.7. Positionnement du choix du taux de vitrage des façades du bâtiment selon la logique de progression de décisions proposée.

Comme montré dans la figure 4.7, le choix du taux de vitrage des façades est fait en deux étapes dans la logique de progression des décisions de conception :

- Par typologie de taux de vitrage : dans un premier temps, dans la sous-phase « Enveloppe » de la phase d'Esquisse, le concepteur peut sélectionner entre 5 valeurs de taux de vitrage, représentant des typologies de choix typiques. Chaque typologie est associée à une fourchette de valeurs du taux de vitrage.
- En valeur spécifique : dans la phase d'Avant-Projet Sommaire, le concepteur peut choisir de manière plus précise le taux de vitrage sous la forme d'une valeur spécifique.

Dans une première analyse des différentes combinaisons de ce paramètre pour les 4 façades du bâtiment, l'influence du taux de vitrage des façades étroites (est et ouest) sur la performance énergétique a été déterminée comme très limitée par rapport à celle associée aux façades principales (nord et sud). Ceci est dû simplement au rapport de surface entre ces 2 types de façades : les façades avec des surfaces plus importantes jouent un rôle plus déterminant dans la performance du bâtiment.

Pour cette raison et afin de simplifier la présentation de résultats dans ce travail, l'étude paramétrique de cas se limitera à l'analyse de l'effet du taux de vitrage de la façade principale orientée au sud. Pour ce faire, les cinq valeurs de typologies du taux de vitrage proposées par l'outil dans la sous-phase « Enveloppe » de la phase d'Esquisse seront analysées :

- Façade peu vitrée : taux de vitrage compris entre 10 et 30%, assimilée à une valeur moyenne de 20%.
- Façade moyennement vitrée : taux de vitrage compris entre 30 et 50%, assimilée à une valeur moyenne de 40%.
- Façade très vitrée : taux de vitrage compris entre 50 et 70%, assimilée à une valeur moyenne de 60%.
- Façade majoritairement vitrée : taux de vitrage compris entre 70 et 90%, assimilée à une valeur moyenne de 80%.
- Façade totalement vitrée : taux de vitrage d'autour de 100%.

Dans la configuration de bâtiment de base, le taux de vitrage des façades nord et sud est considéré égal à 40%, tandis que pour les façades est et ouest est pris à 20%. Dans cette étude de cas, ces valeurs par défaut sont maintenues pour les façades est, ouest et nord.

Comme montré sur la figure 4.8, une augmentation pratiquement linéaire de tous les indicateurs environnementaux est observée à mesure que le taux de vitrage est augmenté. Ceci est lié à deux effets différents. D'une part, une surface vitrée de la façade, composée de vitrages, menuiseries et protections solaires, est associée à un impact environnemental plus important que celui donné par une surface opaque, dans ce cas un mur en béton. D'autre part, la résistance thermique des fenêtres est inférieure à celle d'un mur en béton, ce qui entraine des pertes thermiques plus élevées en période de chauffage.

La majorité des indicateurs environnementaux présente un degré de sensibilité très similaire à la variation du taux de vitrage des façades, sauf dans deux cas spécifiques : les déchets dangereux éliminés et le potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique. Les degrés de sensibilité de ces deux indicateurs se démarquent des autres à cause de la différence d'impacts entre les fenêtres et les murs en béton : particulièrement haute pour le premier cas et relativement base pour le deuxième.

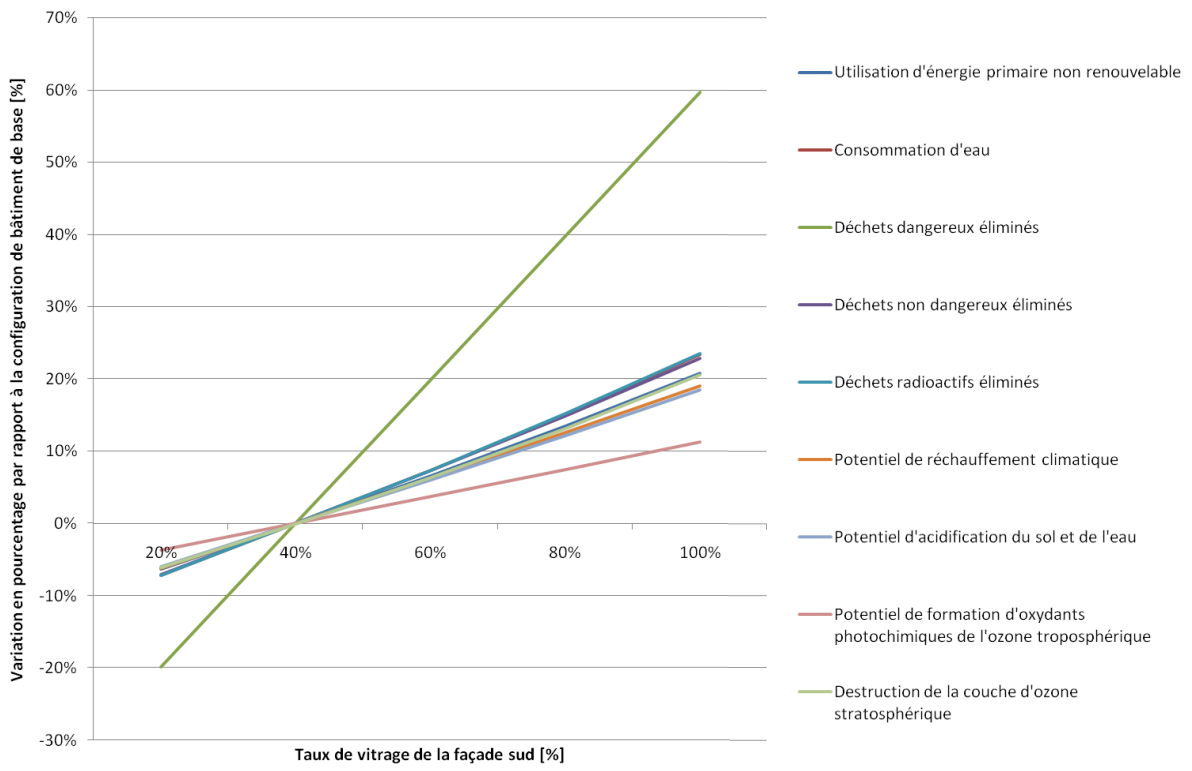

Figure 4.8. Variation en pourcentage des indicateurs environnementaux en fonction du taux de vitrage de la façade sud.

L'effet du taux de vitrage sur les pertes thermiques par les façades est plus évident dans la variation du coût d'exploitation. Comme montrée dans la figure 4.9, une augmentation de cet indicateur est observée à mesure que les façades deviennent de plus en plus vitrées. De façon générale, les besoins de refroidissement sont les plus affectées à cause du risque croissant de surchauffes. Par ailleurs, les

besoins de chauffage sont moins impactés grâce aux apports solaires additionnels arrivant sur les espaces intérieurs.

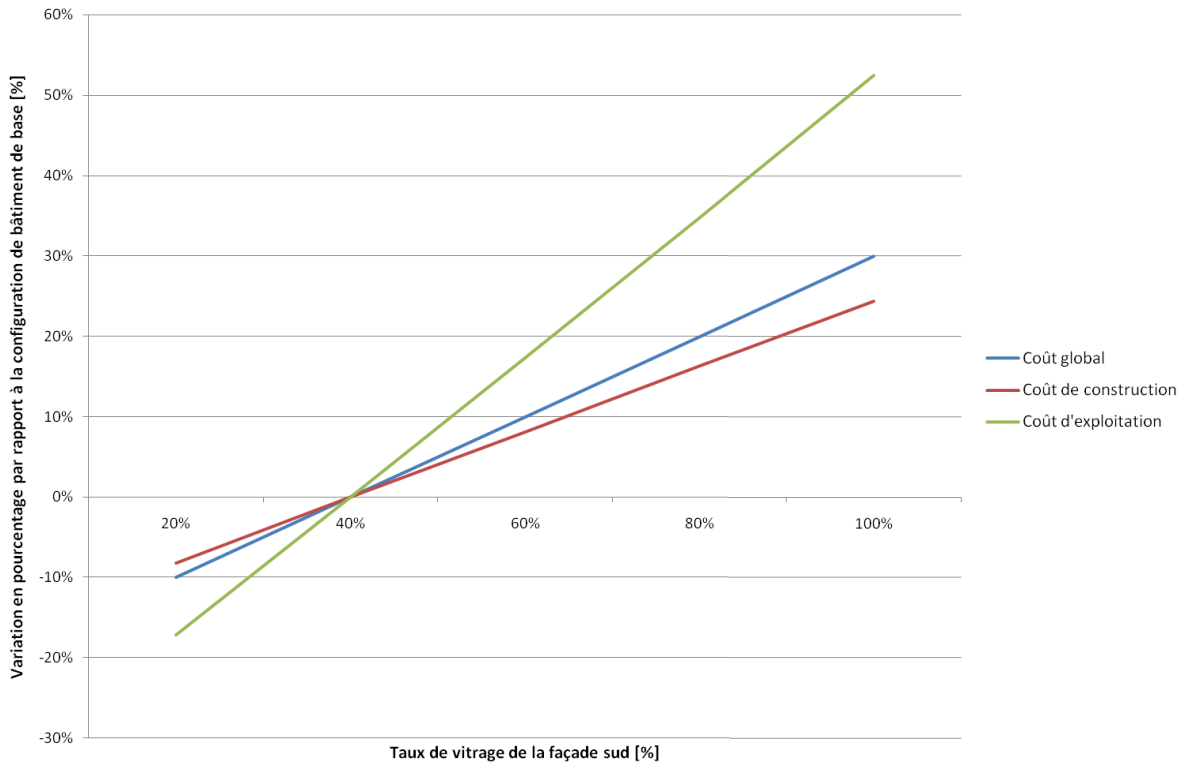

Figure 4.9. Variation en pourcentage des indicateurs économiques en fonction du taux de vitrage de la façade sud.

Le rôle déterminant de la contribution des fenêtres à la performance énergétique du bâtiment est encore une fois remarqué en analysant l'indicateur du coût de construction. Cet indicateur est aussi notablement sensible à la variation du taux de vitrage des façades dû à la différence importante de prix entre les fenêtres et les murs en béton. Par conséquent, la combinaison des effets du taux de vitrage sur les coûts d'exploitation et de construction explique une valeur aussi prononcée du degré de sensibilité du coût global.

Le taux de vitrage a également une influence décisive sur les indicateurs de confort des usagers, dont leurs variations en pourcentage par rapport à la configuration de base sont montrées sur la figure 4.10. Dans cette catégorie, l'indicateur le plus sensible est l'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission. La performance acoustique des surfaces vitrées étant notamment inférieure à celui des murs en béton, l'effet de l'augmentation du taux de vitrage se traduit par une diminution importante de l'isolement acoustique. Dans le cas des façades totalement vitrées, cet indicateur peut descendre en dessous de la valeur minimum réglementaire de 30 dB, ce qui nécessiterait d'un effort de renforcement acoustique complémentaire.

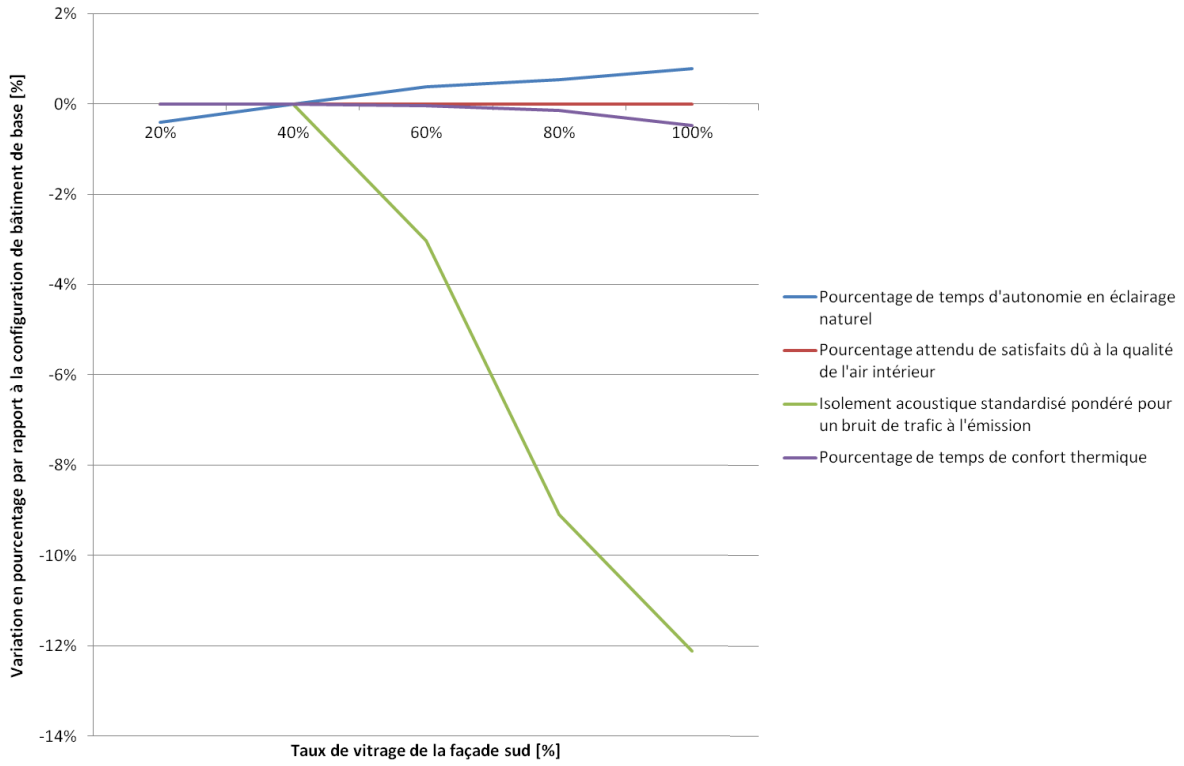

Figure 4.10. Variation en pourcentage des indicateurs de confort des usagers en fonction du taux de vitrage de la façade sud.

Le degré de sensibilité des autres indicateurs de confort est moins prononcé. En ce qui concerne l'indicateur de confort visuel, une augmentation assez limitée peut être observée à mesure que le taux de vitrage prend des valeurs plus importantes. Ceci est un comportement logique, puisque les besoins en éclairage naturel étaient déjà presque totalement couverts dans la configuration de bâtiment de base, avec un temps d'autonomie supérieur à 97%. En outre, l'effet du taux de vitrage sur le pourcentage de confort thermique n'est pas considérable, puisque les variations sur les besoins thermiques sont compensées par une augmentation de la consommation énergétique des systèmes de refroidissement et de chauffage. L'indicateur de qualité de l'air intérieur n'est pas affecté par la variation du taux de vitrage.

Le taux de vitrage représente alors un facteur déterminant sur la majorité des indicateurs caractérisant la performance énergétique du bâtiment. De manière générale, un bâtiment avec des faibles taux de vitrage dans ses façades principales est associé à des impacts environnementaux et coûts économiques relativement bas par rapport au cas d'un bâtiment fortement vitré. Néanmoins, un taux de vitrage faible réduit est associé à des valeurs d'autonomie en éclairage naturel légèrement plus bas. Il faudrait commenter ici que la diminution limitée de cet indicateur s'explique par l'utilisation de la moyenne spatiale du Facteur de Lumière du Jour (FLJ), qui ne prend pas en compte les possibles hétérogénéités dans la répartition de l'éclairement dans les espaces intérieurs.

4.4. Effet de la présence d'une façade double peau vitrée

La façade double peau vitrée peut être définie comme une façade essentiellement vitrée qui double la façade traditionnelle par l'extérieur. La création d'un espace intermédiaire entre les espaces intérieurs et l'environnement présente des compromis à faire entre les multiples objectifs de conception : par exemple, du point de vue thermique, l'augmentation potentielle dans la captation d'énergie solaire peut apporter une diminution des besoins de chauffage en hiver, mais aussi des surchauffes en période estivale. Dans la majorité de cas, ce type de façade est associé uniquement à la façade orientée la plus au sud. Cela est dû à l'intérêt de la récupération des apports solaires incidents (Poirazis, 2014).

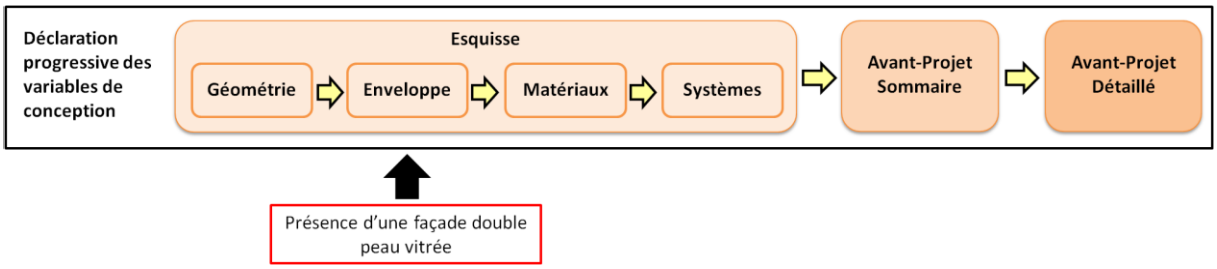

Figure 4.11. Positionnement du choix de la présence d'une façade double peau vitrée selon la logique de progression de décisions proposée.

Comme montré dans la figure 4.11, le choix de la mise en œuvre d'une façade double peau vitrée est à effectuer dans la sous-phase « Enveloppe » de la phase d'Esquisse selon la logique de progression des décisions ici proposée. L'intérêt de ce choix de conception doit être étudié lors des premières décisions de conception de l'enveloppe, dû au rôle déterminant que ce système énergétique a à priori sur le comportement thermique du bâtiment.

L'analyse ici présentée est faite sur la base de la configuration de base de la façade double peau vitrée, telle que définie dans la section 2.4.2 de ce travail. Il faut prendre en compte que cette configuration n'est pas nécessairement adaptée à tout contexte d'implantation et reflète simplement les valeurs typiques identifiées lors de l'étude de l'état de l'art de ce système énergétique. La figure 4.12 montre la variation en pourcentage de tous les indicateurs de performance par rapport au bâtiment de base dû à la présence de cette configuration de façade double peau vitrée.

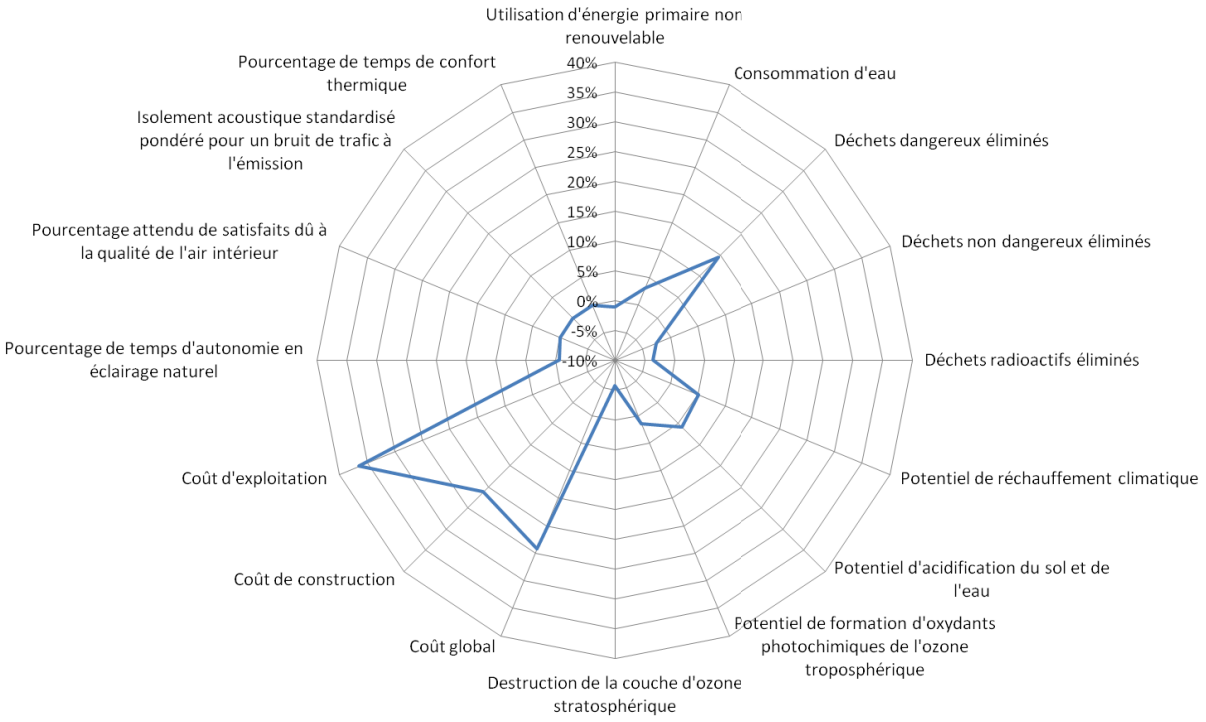

Figure 4.12. Variation en pourcentage des indicateurs de performance dû à la présence de la configuration de base de la façade double peau vitrée.

En termes généraux, la présence de la façade double peau vitrée a deux effets différents sur la performance énergétique du bâtiment. Comme prévu, elle permet une réduction des besoins de chauffage du bâtiment d'environ 20% par rapport à la configuration du bâtiment de base. Ceci s'est traduit par une diminution des indicateurs environnementaux associés à la consommation d'énergie électrique, montrés ci-dessous par ordre décroissant de degré de sensibilité :

- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique
- Déchets radioactifs éliminés
- Déchets non dangereux éliminés
- Utilisation d'énergie primaire non renouvelable

Néanmoins, l'utilisation à grande échelle des vitrages et de la structure métallique porteuse constituant la façade vitrée, tous les deux étant des composants associés à des impacts environnementaux forts et à des coûts élevés, a des effets très négatifs sur la performance du bâtiment. Les indicateurs les plus affectés sont les trois indicateurs économiques, à cause de l'augmentation des matériaux de construction mis en œuvre. Il est important rappeler que le coût d'exploitation considère, en plus des consommations énergétiques, le remplacement de composants pendant toute la durée de vie du bâtiment, ce qui explique la forte augmentation de la valeur de cet indicateur. En ce qui concerne les impacts environnementaux, l'indicateur le plus affecté par la présence de la façade double peau vitrée est l'indicateur des déchets dangereux éliminés. Comme présenté précédemment dans le cas de l'effet de la variation du taux de vitrage de la façade sud, cet indicateur est particulièrement sensible à l'augmentation de la surface vitrée dans un bâtiment.

Les autres indicateurs environnementaux affectés négativement par la présence de la façade vitrée sont, par ordre décroissant de degré de sensibilité :

- Potentiel d'acidification du sol et de l'eau
- Potentiel de réchauffement climatique
- Consommation d'eau
- Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique

En ce qui concerne les indicateurs de confort des usagers, seulement l'indicateur d'autonomie en éclairage naturel a été affecté par la mise en place de la façade vitrée. Une légère réduction de cet indicateur est ici observée, en raison de l'augmentation du facteur de transmission lumineuse induit par l'addition de la façade vitrée dans l'orientation sud du bâtiment. Par contre, les autres indicateurs de confort des usagers n'ont pas été modifiés.

La présence d'une façade double peau vitrée telle que définie pour la configuration de base ne semble pas alors particulièrement intéressante dans le contexte du projet de construction ici considéré. La réduction des consommations énergétiques liée à la maîtrise des besoins de chauffage est considérablement éclipsée par la forte augmentation des impacts environnementaux et coûts dus à la construction et remplacement de composants de la façade vitrée. Par conséquent, l'intérêt de la mise en œuvre de ce système énergétique semble limité. Nonobstant, les valeurs des choix de conception décrivant la configuration de la façade vitrée de référence n'ont pas été adaptées au contexte climatique et d'usages du bâtiment de l'application en question.

Dans la section suivante, une adaptation de la configuration de base de la façade double peau vitrée sera proposée à travers un exemple de scénario de conception.

4.5. Exemple de scénario de conception d'une façade double peau vitrée

Après avoir étudié les effets des décisions de conception de manière indépendante, un exemple de scénario de conception d'une façade double peau vitrée est ici présenté. L'objectif de cette section est d'illustrer l'application de la logique de progression des décisions dans la conception de ce système énergétique innovant, pour ainsi identifier ses apports et limites actuelles.

Dans cet exemple de scénario de conception, on assumera le rôle d'un concepteur dans sa démarche de prise de décisions pour la conception d'une façade double peau vitrée. Tout au long de cette démarche, le concepteur prendra de manière séquentielle des décisions de conception de plus en plus précises, en étudiant à chaque fois l'espace de décision proposé pour chaque décision. En partant au début de la configuration de la façade vitrée de base, chaque décision prise remplacera progressivement les valeurs par défaut de cette configuration. De façon générale, cette prise de décisions de conception est faite à partir des préférences particulières du concepteur ou du cahier de charges vis-à-vis des critères de performance du bâtiment.

Dans la section précédente, on a constaté l'effet peu favorable de la mise en œuvre de la façade double peau vitrée dans la performance énergétique du bâtiment de base. L'objectif de cet exemple de scénario de conception est alors d'améliorer l'effet de ce système énergétique par son adaptation au contexte particulier du projet d'application. Il faut prendre en compte que les valeurs des décisions de conception composant la configuration de base de la façade vitrée représentent les pratiques actuelles telles qu'identifiées dans l'état de l'art. Néanmoins, ces valeurs typiques

proviennent d'une étude considérant une grande diversité de contextes climatiques et d'usages du bâtiment. Par conséquent, l'adaptation des éléments décrivant la façade vitrée au contexte climatique de Bordeaux et à la configuration du bâtiment de base peut permettre d'améliorer la performance énergétique de l'ensemble.

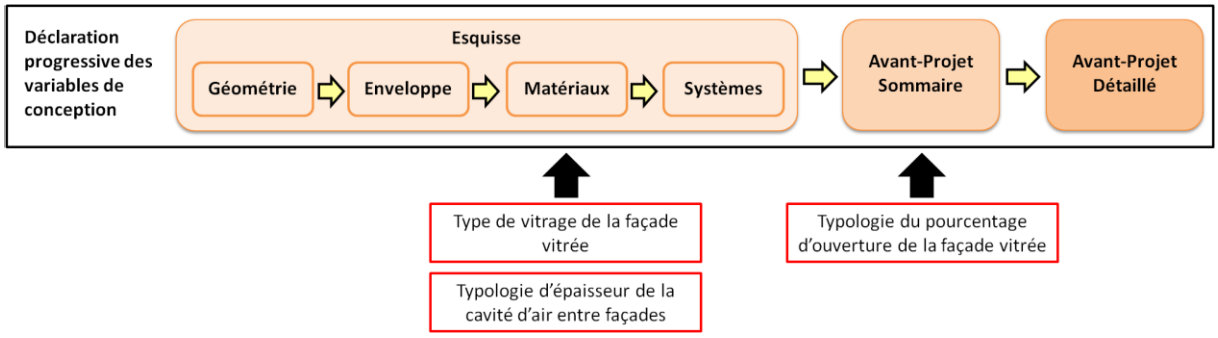

Figure 4.13. Positionnement des choix de conception du scénario de conception d'une façade double peau vitrée selon la logique de progression de décisions proposée.

Afin de simplifier la description de la démarche, cet exemple de scénario de conception se limitera à trois des premières décisions à prendre lors de la conception d'une façade double peau vitrée :

- Le type de vitrage de la façade vitrée.
- La typologie d'épaisseur de la cavité d'air entre les façades.
- La typologie du pourcentage d'ouverture de la façade pour l'aération de cette cavité.

Le positionnement de ces trois choix de conception dans la logique de progression de décisions proposée dans ce travail est montré dans la figure 4.13.

En outre, la prise de décisions pour la conception d'une façade double peau vitrée doit être normalement faite de manière parallèle avec celle de tous les autres éléments du bâtiment, ceci afin de pouvoir tenir compte des effets d'interactions entre tous les éléments du système. A titre de simplification, les décisions concernant la conception de ce système énergétique sont prises dans cet exemple en considérant la configuration du bâtiment comme fixée aux valeurs de base.

4.5.1. Effet du type de vitrage de la façade vitrée

Comme montré dans la figure 4.13, le concepteur est d'abord confronté à deux décisions de conception dans la sous-phase « Matériaux » de la phase d'Esquisse : le type de vitrage de la façade vitrée et l'épaisseur de la cavité entre façades. Le concepteur peut commencer sa prise de décisions par n'importe quelle de ces deux options. Considérons qu'il décide de commencer par le type de vitrage de la façade vitrée. Dans ce cas, deux typologies de vitrages lui sont proposées à ce stade du projet :

- Simple vitrage : assimilé à un verre clair de 6 mm d'épaisseur. Cette typologie est la valeur prise par défaut dans la configuration de base de la façade double peau vitrée.
- Double vitrage : assimilé à un assemblage de type 4+16+4, c'est-à-dire constitué de deux feuilles de verre de 4 mm d'épaisseur, séparées par un espace rempli d'air d'une épaisseur égale à 16 mm. Une fine couche métallique dite « de basse émissivité » est appliquée à l'intérieur du double vitrage pour réduire son coefficient de transmission thermique.

La figure 4.14 montre les résultats de l'évaluation de la performance énergétique de ces deux alternatives de conception. On peut observer qu'une partie des indicateurs environnementaux répond plus favorablement à une façade avec un simple vitrage, tandis qu'une autre partie montre des meilleurs résultats pour le cas avec un double vitrage. Pour comprendre ce comportement des indicateurs, il faut considérer les deux effets différents qui sont en jeux. D'une part, un double vitrage permet la réduction des besoins thermiques, en raison de l'augmentation de la performance thermique de l'enveloppe. Néanmoins, la mise en œuvre d'un tel type de vitrage induit en même temps des impacts environnementaux et des investissements plus importants. Ainsi, le choix d'un double vitrage permet de réduire les indicateurs plus sensibles à la consommation énergétique des systèmes thermiques, tandis que le choix d'un vitrage simple limite ceux plus sensibles à l'utilisation des matériaux de construction dans la façade vitrée.

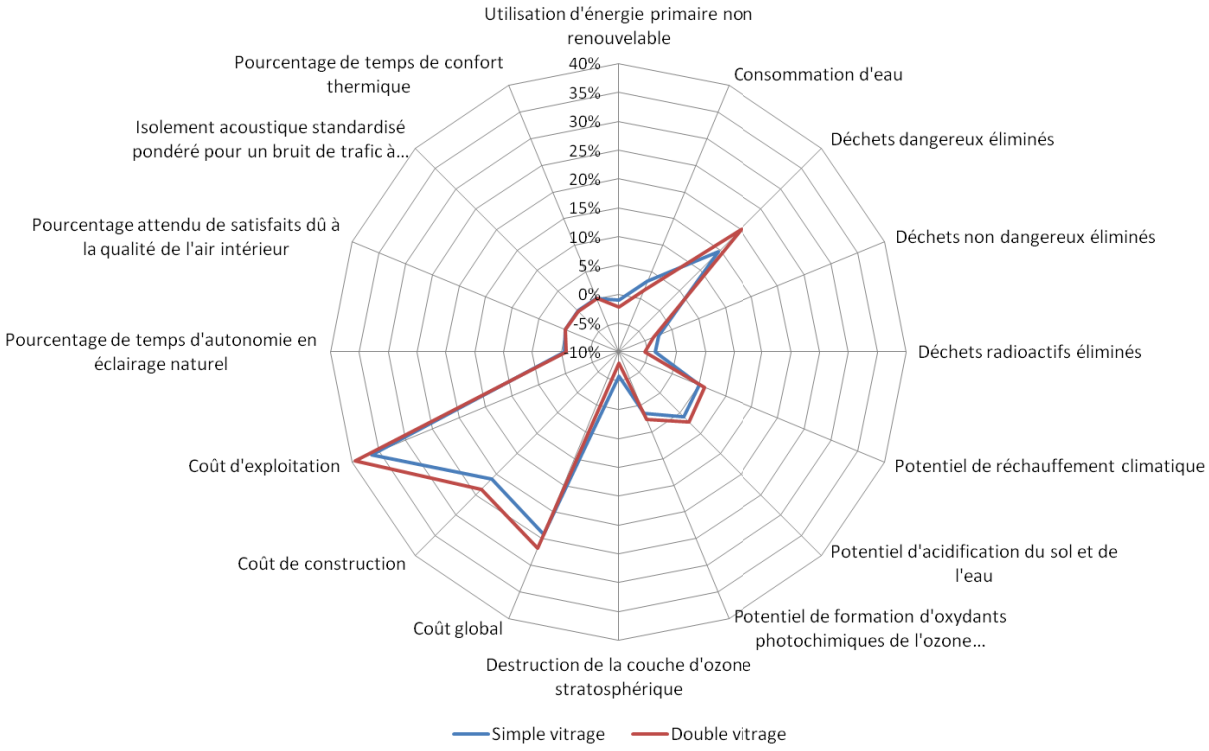

Figure 4.14. *Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction du type de vitrage de la façade double peau vitrée.*

Considérons dans cet exemple que le concepteur cherche surtout à améliorer l'intérêt économique de son projet de construction. Etant donné que l'alternative avec un vitrage de type double présente

un investissement initial et des coûts de remplacement de composants plus importants, le concepteur décide ainsi de favoriser l'alternative donnée par un vitrage de type simple.

Après avoir décidé la typologie du vitrage à mettre en place, la valeur choisie pour cette décision sera fixée et remplacera la valeur par défaut qui avait été considérée jusqu'à ce point pour décrire la configuration du bâtiment. Dans ce cas, le concepteur a choisi la typologie donnée par défaut dans la configuration de base de la façade double vitrée. Ce principe de prise progressive de décisions permettra ainsi au concepteur de préciser de plus en plus la définition du bâtiment, à mesure que le processus de conception avance.

4.5.2. Effet de la typologie de l'épaisseur de la cavité d'air entre les façades

Une deuxième décision de conception est encore à prendre dans la sous-phase « Matériaux » : le choix de l'épaisseur de la cavité d'air entre les façades. Ce paramètre intervient dans le comportement thermique du bâtiment vis-à-vis de ses pertes thermiques par la façade double peau vitrée.

Pour cette décision de conception quatre typologies de valeurs d'épaisseur sont proposées :

- Cavité étroite : épaisseur de la cavité comprise entre 0 et 0.4 m, assimilée à une valeur moyenne de 0.2 m.
- Cavité assez large : épaisseur de la cavité comprise entre 0.4 et 0.8 m, assimilée à une valeur moyenne de 0.6 m. Cette typologie est la valeur prise par défaut dans la configuration de base de la façade double peau vitrée.
- Cavité large : épaisseur de la cavité comprise entre 0.8 et 1.2 m, assimilée à une valeur moyenne de 1 m.
- Cavité très large : épaisseur de la cavité comprise entre 1.2 et 1.6 m, assimilée à une valeur moyenne de 1.4 m.

Comme il peut être observé dans la figure 4.15, l'effet de la variation de l'épaisseur de la cavité entre façades semble être assez limité sur la performance énergétique du bâtiment. Les indicateurs de performance les plus affectés par cette variation sont les coûts économiques, principalement en raison de l'augmentation de la quantité de matériaux à mettre en œuvre pour la construction et remplacement de composants de la façade vitrée.

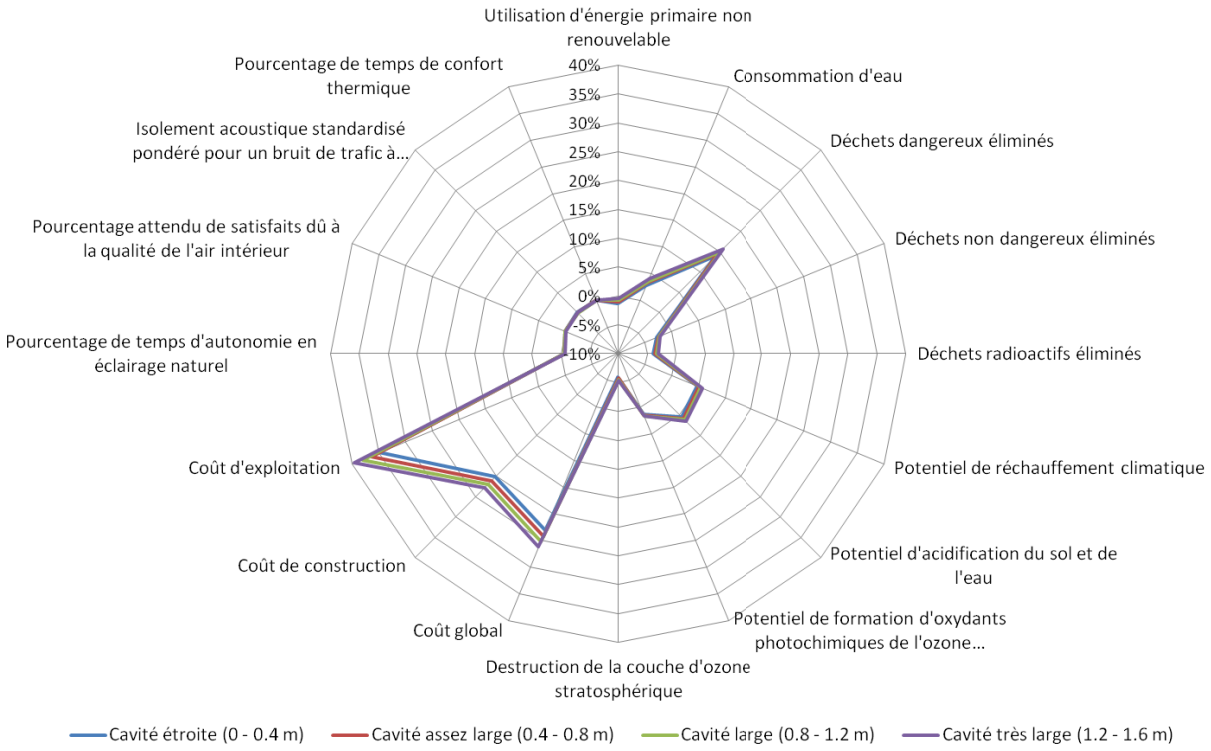

Figure 4.15. Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air entre façades.

Considérons que le concepteur, toujours intéressé par une réduction de l'investissement requis, choisit l'alternative de conception associé aux coûts moins importants : une cavité étroite entre façades, inférieure à 0.4 m. Comme dans le cas de la décision de conception précédente, la valeur par défaut dans la configuration de base pour l'épaisseur de la cavité d'air (cavité assez large, entre 0.4 et 0.8 m) sera remplacée dans les étapes suivantes par la valeur ici sélectionnée par le concepteur.

Un exemple de façade double peau vitrée avec une faible épaisseur de cavité entre façades est le siège du journal « Le Monde » à Paris. Comme montré dans la figure 4.16, une double peau en verre sérigraphié avec une page du quotidien est installée à environs 20 cm de distance du bâtiment.

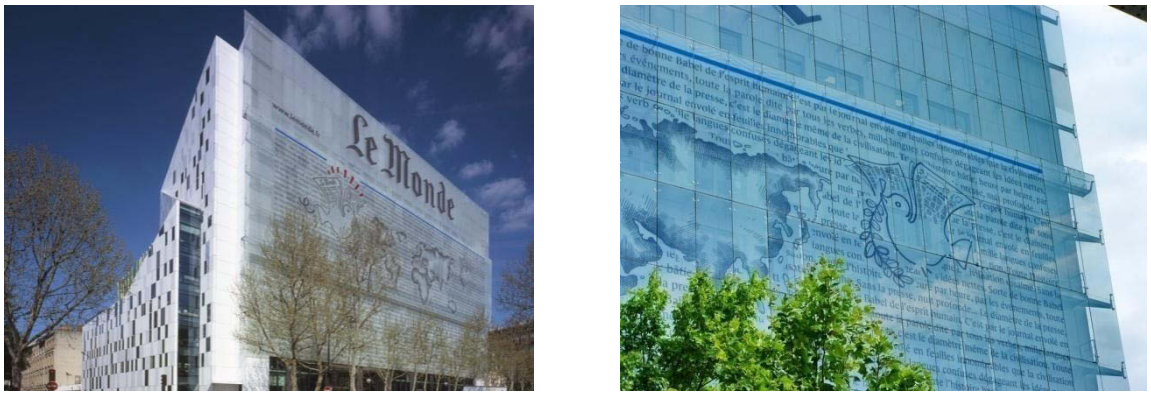

Figure 4.16. Façade double peau vitrée du siège du journal « Le Monde » à Paris.

4.5.3. Effet de la typologie du pourcentage d'ouverture de la façade vitrée

La troisième et dernière décision à considérer dans cet exemple de scénario de conception est le choix du pourcentage d'ouverture de la façade. Cette décision est à prendre dans la phase d'Avant-Projet Sommaire, comme montré sur la figure 4.13. Le pourcentage d'ouverture de la façade détermine la capacité de la cavité entre façades à dégager la chaleur absorbée par le renouvellement d'air par l'action du vent ou par tirage thermique.

Pour cette décision de conception, trois typologies de valeurs sont proposées à ce stade du projet :

- Façade peu ouverte : pourcentage d'ouverture compris entre 0 et 10%, assimilé à une valeur moyenne de 5%.
- Façade assez ouverte : pourcentage d'ouverture compris entre 10 et 20%, assimilé à une valeur moyenne de 15%. Cette typologie est la valeur prise par défaut dans la configuration de base de la façade double peau vitrée.
- Façade très ouverte : pourcentage d'ouverture compris entre 20 et 30%, assimilé à une valeur moyenne de 25%.

Comme montré dans la figure 4.17, le fait d'augmenter le pourcentage d'ouverture de la façade permet de réduire considérablement la majorité des impacts environnementaux ainsi que le coût d'exploitation du bâtiment. Ceci est expliqué notamment par la réduction des besoins de refroidissement dû à la maîtrise de la chaleur accumulée dans la cavité entre façades.

Dans ce cas, le concepteur sélectionne alors une valeur d'ouverture d'aération de la façade vitrée égale à 25% de sa surface pour minimiser les impacts environnementaux. Dans les étapes de conception qui suivraient, cette typologie d'ouverture remplacerait la valeur par défaut de la configuration de base de la façade double peau vitrée (façade assez ouverte, avec un pourcentage d'ouverture compris entre 10 et 20%,).

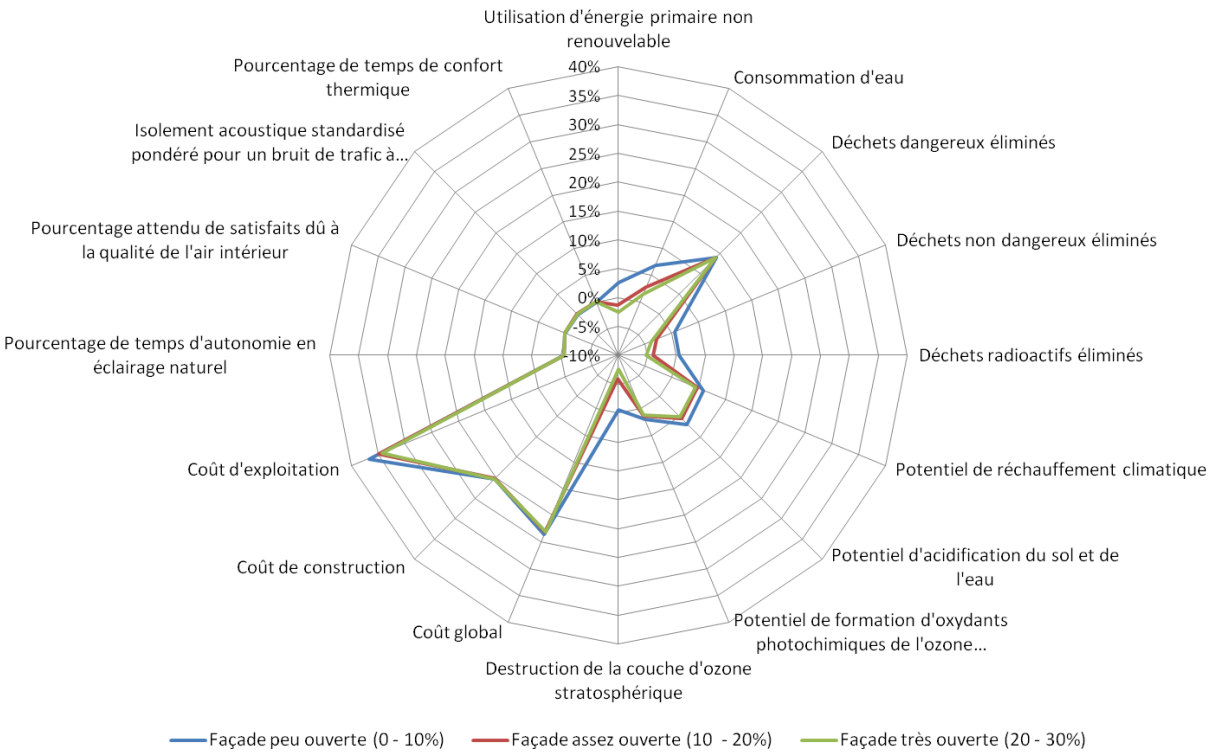

Figure 4.17. Variation en pourcentage des indicateurs de performance en fonction du pourcentage d'ouverture de la façade vitrée.

4.5.4. Résultat du scénario de conception

Dans cet exemple de scénario de conception, le concepteur a été confronté à trois des premières décisions de conception d'une façade double peau vitrée, qui l'ont guidé pour définir plus précisément son projet du bâtiment. Grâce à la prise de ces décisions, il a adapté de manière progressive la configuration de base de la façade vitrée au contexte de réalisation à partir de ses préférences vis-à-vis des critères de performance. Le résultat de cette adaptation est montré dans la figure 4.18, où la configuration de base de la façade vitrée est comparée avec la configuration adaptée.

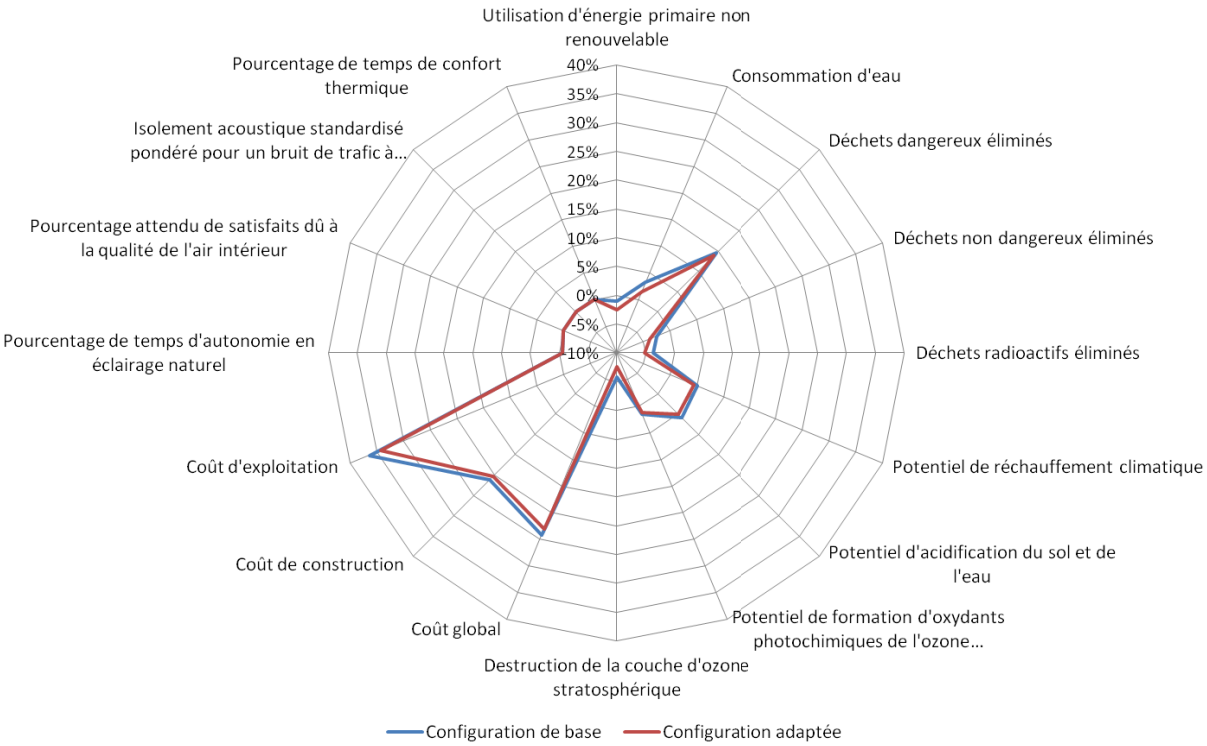

Figure 4.18. Comparaison en variation en pourcentage des indicateurs de performance entre la configuration de façade double peau vitrée de base et son adaptation au contexte de l'exemple du scenario de conception.

Suite à la prise progressive de ces trois décisions de conception, l'effet de la façade vitrée sur la performance énergétique globale a été amélioré. Une réduction modeste des trois indicateurs de coûts peut être observée dans la figure 4.18, ainsi qu'une diminution plus limitée de tous les indicateurs environnementaux. Néanmoins, les fortes valeurs des impacts environnementaux et coûts associées à la mise en œuvre des composants de la façade vitrée restent des contraintes significatives à considérer dans la réalisation de ce type de projet.

4.6. Conclusions

Dans ce chapitre, l'intérêt de l'utilisation de l'outil d'évaluation présenté dans ce travail a été étudié par son application dans divers cas d'étude. Dans un premier temps, la performance énergétique de la configuration de bâtiment de base, représentant les choix considérés par défaut dans la logique progressive de décisions ici proposée, a été évaluée et mise en contexte. Cette configuration a été subséquemment prise comme référence pour la présentation des résultats dans le reste du chapitre.

Dans un deuxième temps, les effets de trois décisions de conception sur la performance énergétique du bâtiment ont été analysés de manière individuelle, pour ainsi identifier le degré de sensibilité et tendances principales des indicateurs de performance. Cette partie de l'étude a permis de valider l'apport d'une évaluation globale de la performance du bâtiment en donnant des éléments de décision pertinents pour guider le concepteur dans sa prise de décisions.

Ensuite, la démarche progressive de prise de décisions ici proposée a été illustrée par un exemple de scénario de conception d'une façade double peau vitrée. Cette démonstration de la logique de décision a permis d'étudier de manière structurée les possibilités de choix proposées pour chaque décision de conception. Le résultat de cet exercice a été l'adaptation la conception de la façade vitrée au contexte climatique du projet, en tenant compte des préférences du concepteur.

A travers les cas d'études ici présentés, l'utilisation de l'outil d'évaluation a permis de guider la prise de décisions en offrant une vision globale de la performance énergétique du bâtiment. Cette vision globale permet de considérer de manière intégrale les effets des décisions de conception ayant lieu dans différents étapes du cycle de vie du bâtiment. Une stratégie énergétique peut paraître intéressante parce qu'elle présente des effets positifs sur la performance du bâtiment pendant son exploitation, par exemple en réduisant les besoins thermiques. Néanmoins, sa mise en œuvre peut amener des effets négatifs qui peuvent atténuer ces gains, voire les annuler complètement. Ceci a été le cas de l'étude d'une façade double peau vitrée composée d'un vitrage de type double : les gains en consommation énergétique par la réduction de pertes thermiques ont été minés par l'augmentation des impacts des matériaux de construction mis en œuvre. La considération des effets des décisions de conception sur tout le cycle de vie du bâtiment et sur l'ensemble de critères de performance est ainsi nécessaire pour répondre à ce genre de situations.

Comme discuté dans l'exemple du scénario de conception, les valeurs des décisions de conception décrivant les configurations de base du bâtiment et de la façade double peau vitrée peuvent ne pas être nécessairement adaptées à tout contexte d'implantation. Ces configurations reflètent les valeurs typiques identifiées lors des respectives études de l'état de l'art. Dans le cas de la configuration du bâtiment, ces valeurs sont représentatives des bâtiments de bureaux performants en France, ce qui est pertinent pour l'application de la présente méthodologie d'évaluation dans le contexte français. Par contre, dans le cas de la configuration de la façade double peau vitrée, l'étude de l'état de l'art a intégré des réalisations autour du monde, à cause du nombre limité de ce type de projets actuellement en France.

Ce conflit dans la représentabilité des données peut entraîner une possible introduction de biais dans les décisions de conception. Par exemple, dû au grand nombre de projets avec façades vitrées en Allemagne (plus de 40% du total dans l'état de l'art), la configuration de base identifiée peut être peu représentative des conditions climatologiques et d'usages des bâtiments typiques en France. Donc, cette configuration pourrait être considérée mal adaptée pour évaluer l'intérêt de la mise en œuvre de ce système énergétique dans le contexte français. Néanmoins, dans l'exemple de scénario de conception ici présenté, une amélioration modeste de l'effet de la façade vitrée sur la performance énergétique du bâtiment a été observée après son adaptation. De cette façon, on peut conclure que la configuration ici identifiée semble être assez représentative pour le contexte d'application de ce travail.

En ce qui concerne la configuration de base au niveau du bâtiment, une possible perspective de travail serait d'identifier des valeurs représentatives des choix de conception qui soient adaptées aux conditions particulières de chaque zone climatique majeure en France. La variabilité considérable des conditions climatiques dans le territoire français peut ainsi résulter dans une variété de configurations de base, mieux adaptées aux contextes régionaux.

Il est important de mentionner que les éléments de décision proposés par cette méthodologie concernent uniquement les aspects du bâtiment associées à sa performance énergétique. D'autres critères de conception peuvent être considérés par le concepteur dans sa prise de décisions, y compris des considérations d'accessibilité, de sécurité et d'esthétique. Pour citer un exemple, dans l'étude de cas de la façade double peau vitrée, une typologie d'épaisseur de cavité étroite (inférieure à 0.4 m) a été sélectionnée comme plus avantageuse pour un projet à Bordeaux à cause d'une réduction des coûts par rapport aux autres typologies étudiées. Cependant, le concepteur peut choisir une épaisseur plus importante pour des raisons de type fonctionnel, notamment pour permettre l'accès à l'espace entre façades pour l'évacuation des occupants en cas d'incendie ou faciliter l'entretien. A titre d'illustration, la figure 4.19 montre une façade vitrée actuellement en construction dans le campus de l'Université de Bordeaux, dont l'épaisseur de la cavité est d'environ un mètre.

Figure 4.19. Chantier d'une façade double peau vitrée dans le campus de l'Université de Bordeaux.

En outre, l'analyse des effets de décisions dans le cas de la conception d'une façade double peau vitrée a également permis d'étudier la pertinence du modèle thermique choisi. Comme présenté dans la section 2.3.2 de ce travail, la méthode de modélisation considérée est celle proposée pour les espaces tampons solarisés dans les règles de calcul Th-BCE de la réglementation thermique française dans son édition 2012 (CSTB, 2010). Le choix de ce modèle répond aux besoins de simplicité dans sa mise en œuvre ainsi que de compatibilité des entrées avec le niveau de précision disponible dans les premières phases de conception. Etant utilisée dans le calcul réglementaire français, cette méthode représente une approche de référence validée pour modéliser ce type d'espaces. Néanmoins, cette simplicité dans le calcul amène des limites dans la modélisation des phénomènes physiques en jeu.

Une de ses limites est donnée par la basse sensibilité à la variation d'une partie des paramètres de conception de la façade vitrée, comme observé dans le cas de l'épaisseur de la cavité d'air entre

façades. Dans une modélisation plus approchée de la réalité, ce paramètre intervient dans l'estimation du flux d'air traversant la cavité, qui à son tour affecte le coefficient d'échange thermique entre l'air et les parois des façades. Du fait que le modèle réglementaire fixe ce coefficient à une valeur constante afin de simplifier le calcul, la variation de l'épaisseur de la cavité ne joue plus un rôle direct sur le comportement thermique de la façade vitrée. Ceci explique l'effet limité de cette décision de conception sur la performance énergétique du bâtiment, hors le coût associé à sa mise en œuvre.

Conclusion générale et perspectives

Au long de ce travail, une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments durables dans les premières phases de projet a été présentée.

Dans cette ultime partie, les contributions apportées au cours de cette expérience très enrichissante seront évoquées et les résultats de l'application de l'outil développé seront discutés. Enfin, les perspectives envisagées concernant le développement de la méthodologie et de l'outil seront présentées.

Contexte de la thèse

La prise de décisions pour la conception de bâtiments à haute performance énergétique nécessite une vision globale, qui intègre, en parallèle, les fonctions du système (confort physique des occupants) et les contraintes (coûts et impacts environnementaux). Les méthodologies et outils actuellement disponibles qui considèrent ces trois aspects de la performance du bâtiment ne sont pas adaptés à la conception dans les premières phases d'un projet de construction. C'est pourtant dans ces premières étapes de réflexion que les décisions les plus déterminantes en termes de performance énergétique sont prises.

Dans ce contexte, une méthodologie d'aide à la décision a été développée pour guider le concepteur dans le choix et le dimensionnement des éléments du bâtiment influant sur sa performance énergétique. D'une part, la méthodologie proposée intègre l'aspect multicritère des effets de la prise de décisions à travers les trois dimensions de la durabilité : l'écologie, l'économie et la société. Ceci est fait à travers une évaluation quantitative des aspects du bâtiment associés à sa performance énergétique, en considérant tout le cycle de vie de l'ouvrage. D'autre part, cette méthodologie prend en compte le niveau de précision de la connaissance du bâtiment et sa progression au long des premières phases de conception : la phase d'Esquisse, la phase d'Avant-Projet Sommaire et la phase d'Avant-Projet Détaillé. L'avancement de la connaissance est piloté par la prise de décisions, qui évolue du général au spécifique au long du processus de conception du bâtiment.

La méthodologie proposée est destinée à être utilisée par la maîtrise d'œuvre d'un projet de construction, y compris architectes et bureaux d'études concernés par la performance énergétique, pour la conception de bâtiments de bureaux dans un contexte français.

Contributions

Quatre verrous ont été rencontrés durant la construction de la méthodologie d'aide à la prise de décisions ici présentée. Les réponses du présent travail à chacun de ces verrous représentent les quatre parties constituant la logique de la méthodologie.

Tout d'abord, la première question abordée a été :

Comment caractériser la performance énergétique du bâtiment ? Quels aspects du bâtiment considérer ? Quels critères pour les quantifier ?

La réponse est donnée par la sélection d'une base de seize indicateurs quantitatifs couvrant les trois dimensions du concept de la durabilité et suivant une approche de type cycle de vie. Les indicateurs identifiés dans ce travail sont dérivés d'une analyse de l'état de l'art des méthodes d'évaluation de la performance énergétique, en prenant en compte des considérations pratiques telles que la disponibilité de bases de données des paramètres nécessaires pour leur calcul.

Dans un deuxième temps, on a résolu la question :

Comment calculer les indicateurs sélectionnés lors des premières phases d'un projet de conception ?

La connaissance dans la définition du bâtiment est limitée dans ces premières étapes puisque la prise de décisions est encore en cours. Ainsi, une méthode d'évaluation des indicateurs dont les données d'entrée soient compatibles avec le niveau de précision disponible dans les premières phases de conception est proposée dans ce travail. En outre, afin de permettre une exploration plus rapide de l'espace de décision, des algorithmes simples avec un temps réduit de simulation numérique ont été choisis pour les modèles de calcul constituant cette méthode d'évaluation.

La troisième question demande :

Quelles sont les données nécessaires pour le calcul des indicateurs de performance énergétique sélectionnés ?

Les différentes natures des critères d'évaluation considérés font appel à une multitude de paramètres de calcul venant inéluctablement de différentes sources. Pour répondre à cette question, la structure d'une base de connaissance d'éléments du bâtiment a été définie. Cette base de connaissance comprend les données techniques, environnementales et économiques des produits de construction et des ressources énergétiques nécessaires pour la méthode d'évaluation.

Enfin, la dernière question posée :

Comment intégrer l'avancement de la connaissance au long du processus de conception du bâtiment ?

Pour y répondre, une logique de progression de décisions est proposée afin de structurer la prise de décisions de conception énergétique dans les premières phases de projet. Donnée comme un modèle de répartition séquentielle des choix à effectuer à chaque phase de projet, cette logique permet au concepteur d'explorer progressivement l'espace de décision pour faciliter sa prise de décisions. Afin de tenir compte des choix qui n'ont pas encore été décidés dans une phase donnée, des valeurs de décisions à considérer par défaut sont également proposées sous la forme d'une configuration de bâtiment de base.

Un outil numérique d'aide à la prise de décisions a été mis en place dans ce travail suivant les principes de la méthodologie ici proposée. Les quatre modules composant l'outil numérique concernent :

- Une interface d'entrée de données en format Excel, intégrant la logique de progression des décisions de conception dans la déclaration des alternatives de conception des bâtiments.
- Un moteur de calcul en format MATLAB, construit à partir de la méthode d'évaluation des indicateurs de performance énergétique.
- Une base de connaissance, composée de deux bases de données en format Excel : une sur les produits de construction et ressources énergétiques, une autre sur les données climatiques.
- Une interface d'exploitation de résultats en format Excel, donnant les valeurs des indicateurs de performance énergétique produites de l'évaluation des alternatives de conception.

Ainsi, la somme des quatre apports de ce travail représente dans son ensemble un outil support pour encadrer et guider le processus de prise de décisions dans la conception énergétique de bâtiments durables.

Applications

L'intérêt de la mise en œuvre de la méthodologie d'aide à la prise de décision ici proposée a été étudié à travers divers cas d'étude et du processus de conception des bâtiments.

Dans une première étape, la performance énergétique de la configuration de bâtiment de base a été évaluée. On a constaté un manque de valeurs de référence dans la littérature pour l'interprétation des indicateurs de performance énergétique, en raison de la définition du périmètre d'analyse considérée dans ce travail. Ce premier résultat a permis d'identifier l'importance d'une approche comparative pour l'interprétation des résultats de l'outil d'évaluation.

Ensuite, les effets de deux décisions de conception sur la performance énergétique du bâtiment ont été étudiés : l'orientation du bâtiment et le taux de vitrages des façades. Ces cas d'étude ont permis d'observer le degré de sensibilité de chaque indicateur de performance à la variation de ces deux décisions de conception. Des valeurs de choix pertinentes pour la minimisation des coûts et impacts environnementaux et la maximisation du confort des occupants ont été également identifiées.

Dans une troisième étape, l'intérêt de la mise en place d'une façade double peau vitrée dans la configuration de bâtiment de base a été étudié. Deux effets opposés ont été observés dans la performance énergétique du bâtiment. D'une part, une réduction importante de la consommation énergétique a été remarquée grâce à la maîtrise des besoins de chauffage dû à l'absorption de chaleur par cet espace tampon. D'autre part, la mise en œuvre des vitrages et de la structure métallique de la façade vitrée a induit une forte augmentation des impacts environnementaux et des coûts. Ainsi, l'outil d'aide à la décision permet au concepteur de noter que la configuration de base pour la façade vitrée telle qu'elle est définie par défaut dans ce travail ne convient pas pour son implantation à Bordeaux.

Dans une quatrième et dernière étape d'application de la méthodologie, un exemple de scénario de conception a été présenté afin d'illustrer la logique de progression de décisions de conception proposée dans ce travail. Partant des résultats de l'étape précédente, la configuration de base de la façade double peau vitrée a été adaptée au contexte climatologique de Bordeaux au travers de trois des décisions de conception qui la définissent dans la logique de progression :

- Le type de vitrage de la façade vitrée.
- La typologie d'épaisseur de la cavité d'air entre les façades.
- La typologie du pourcentage d'ouverture de la façade pour l'aération de cette cavité.

Suite à la prise progressive de ces trois décisions de conception, la performance énergétique associée à la façade double peau vitrée a été améliorée par rapport au cas précédent. L'impact de la construction de la façade vitrée sur les impacts environnementaux et les coûts a été réduit modestement. Une des conclusions de cet exemple de scénario de conception est que la configuration de la façade double peau vitrée considérée par défaut dans cette méthodologie peut être définie de manière différente pour chaque région climatique. La même réflexion peut être faite pour la configuration de bâtiment de base, en lui assignant des valeurs par défaut adaptées au contexte d'implantation : selon la région climatique, mais aussi par exemple par typologie de bâtiment.

De manière générale, ces quatre cas d'étude ont permis de valider l'intérêt de l'application de la méthodologie d'aide à la prise de décisions proposée dans ce travail. Le fait de donner au concepteur une vision globale de la performance énergétique de ses alternatives de conception depuis les premières phases de projet lui permet de mettre en évidence les compromis à faire entre les différents critères de conception très en amont du processus.

Perspectives

Une des simplifications de la présente méthodologie est la prise en compte de la géométrie comme variable de conception. Dans une première approche, une typologie de bâtiment donnée par un plan de plancher de forme rectangulaire et une répartition courante d'espaces intérieurs a été considérée. Même si cette typologie est une des plus représentatives des pratiques actuelles dans la conception de bâtiments de bureaux, d'autres formes de bâtiment sont de plus en plus explorées. Comme une manipulation complète et détaillée de la géométrie serait trop complexe pour les phases de projet concernées dans ce travail, la géométrie du bâtiment pourrait être définie par le choix de formes représentatives (e.g. plans de type circulaire, en forme de L, avec un atrium ouvert ou fermé) avec des modèles de base pour la répartition d'espaces intérieurs.

L'étude de la façade double peau vitrée à travers une vision holistique et multicritère a été un cas d'étude très intéressant comme une des premières applications de la méthodologie ici proposée. D'autres systèmes énergétiques innovants et d'avenir pourraient être également étudiés par cette méthodologie. Quelques exemples seraient les systèmes de production d'énergie sur site, les matériaux à changement de phase ou d'autres stratégies bioclimatiques comme le mur trombe ou la

cheminée solaire. Pour les considérer, des modules complémentaires de modélisation pour chacun de ces systèmes énergétiques pourraient être intégrés à la méthode d'évaluation.

La comparaison d'alternatives de conception par l'analyse des résultats sur tous les indicateurs de performance énergétique donne au concepteur une vision complète et détaillée des effets de ses décisions de conception. Néanmoins, l'exploration d'un grand nombre de combinaisons de choix, comme c'est notamment le cas dans la phase d'Esquisse, peut représenter une tâche lourde et longue pour le concepteur. Une approche pertinente serait alors l'agrégation de résultats pour faciliter leur interprétation, par exemple à partir de l'importance relative des indicateurs dans le contexte de chaque projet. Les résultats de l'évaluation pourraient ainsi être présentés pour chaque catégorie de critères d'évaluation (aspects environnementaux, économiques et de confort des occupants) ou à travers une note unique.

Enfin, la méthodologie d'aide à la prise de décisions ici proposée pourrait évoluer vers un outil d'aide à la conception, en proposant au concepteur des valeurs de choix pertinents en fonction du contexte de son projet : par exemple, à partir des conditions climatologiques et typologiques du site d'implantation, des types d'usage prévus du bâtiment, etc.

L'outil numérique présenté dans ce travail a été construit dans un premier temps avec le but de valider la logique de la méthodologie ici proposée ainsi que d'étudier son intérêt dans la conception de bâtiments durables. Cet outil de recherche pourrait continuer à être développé afin d'être proposé aux architectes et aux bureaux d'études concernés par la performance énergétique comme un outil d'aide à la décision en conception.

Pour ce faire, il faudrait rendre l'outil numérique plus ergonomique et facilement manipulable, principalement au niveau des interfaces d'entrées de données et d'exploitation de résultats. Les bases de données composant la base de connaissance pourrait être élargies afin d'intégrer plus de produits de construction, de sources d'énergie et de données climatiques. Enfin, le moteur de calcul des indicateurs pourraient être affiné de manière à optimiser le temps de calcul.

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) (2013). Chiffres clés du bâtiment : Energie - Environnement – Edition 2013. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. Décembre 2013

Allard F. (1978). Etude des ponts thermiques de parois de bâtiments en régime variable de températures. Thèse de docteur ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Mai 1978. Lyon, France.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) (2004). ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. April 2004.

Association Française de Normalisation (AFNOR) (2014). Note d'information sur le programme INIES – Transition NF P01-010/ NF EN 15804+A1 et XP P01-064/CN. Commission de normalisation AFNOR P01E. Juillet 2014.

Association HQE (2014). Base de données française de profils environnementaux de produits de construction INIES. Disponible sur : http://www.inies.fr/

Association HQE (2014). HQE Performance : Règles d'application pour l'évaluation environnementale des bâtiments neufs. Association HQE, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Septembre 2014.

Attia S., Gratia E., De Herde A., Hensen J.L.M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. Energy and Buildings 49 (2012) 2-15.

Baek C.,Park S.-H., Suzuki M., Lee S.-H. (2013). Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase. Energy and Buildings 61 (2013) 275-287.

Batiactu Groupe (2014). Annuel des Prix BTP. Disponible sur http://www.annueldesprix.com/

Batiprix (2011). Batiprix 2012 : Volumes 1 et 2. 29e édition. Groupe Moniteur. Paris, France. Novembre 2011.

Bazzocchi F., Di Naso V., Miceli S. (2013). Toward NZEB Office Buildings. Proceedings du 39th World Congress on Housing Science, vol. 2, pp. 135-141. 17-20 Septembre 2013. Milano, Italie. ISBN: 9788864930206.

Bodart M., Deneyer A. (2003). Guide d'aide à l'interprétation et à l'amélioration de résultats des mesures sous les ciels et soleils artificiels du CSTC. Centre Scientifique et Technique de la Construction, Université Catholique de Louvain. 2003.

Bouvier F., Courret G., Paule B. (2008). Eclairage naturel. Techniques de l'Ingénieur. Paris, France. Octobre 2008.

Bouyer J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, École polytechnique de l'Université de Nantes. 16 septembre 2009.

Building Research Establishment (BRE) (2014). BREEAM International New Construction: Technical Manual SD5075. Building Research Establishment. Avril 2014.

Caccavelli D., Roux J.J., Brau J. (1987). Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment multizone : Prise en compte des phénomènes de ventilation. Revue Générale de Thermique, n° 311, novembre 1987.

CEN/TC 126 (2002-2004). EN 12354 : Acoustique du bâtiment – Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des éléments. Comité Européen de Normalisation. Août 2000-Août 2004.

CEN/TC 156 (2012). NF EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. Comité Européen de Normalisation. Août 2007.

CEN/TC 350 (2004). NF P 01-010 : Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. Comité Européen de Normalisation. Décembre 2004.

CEN/TC 350 (2009). XP P 01-020-3 : Bâtiment - Qualité environnementale des produits de construction et des bâtiments - Partie 3 : évaluation des performances environnementales d'un bâtiment - Description du résultat de l'évaluation, de la méthode d'évaluation et de leurs déclinaisons à différentes étapes d'un projet. Comité Européen de Normalisation. Juin 2009.

CEN/TC 350 (2010). NF EN 15643-1 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : Cadre méthodologique général. Comité Européen de Normalisation. Décembre 2010.

CEN/TC 350 (2011). NF EN 15643-2 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation des bâtiments - Partie 2 : cadre pour l'évaluation des performances environnementales. Comité Européen de Normalisation. Mai 2011.

CEN/TC 350 (2011). NF EN 16309+A1 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance sociale des bâtiments - Méthodes de calcul. Comité Européen de Normalisation. Novembre 2011.

CEN/TC 350 (2012). NF EN 15643-3 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation des bâtiments - Partie 3 : cadre pour l'évaluation de la performance sociale. Comité Européen de Normalisation. Avril 2012.

CEN/TC 350 (2012). NF EN 15643-4 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation des bâtiments - Partie 4 : cadre pour l'évaluation de la performance économique. Comité Européen de Normalisation. Juin 2012.

CEN/TC 350 (2012). NF EN 15978 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul. Comité Européen de Normalisation. Mai 2012.

CEN/TC 350 (2013). PR NF EN 16627 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance économique des bâtiments - Méthodes de calcul. Comité Européen de Normalisation. Septembre 2013.

CEN/TC 350 (2014). NF EN 15804+A1 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Comité Européen de Normalisation. Avril 2014.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (1983). Cahier 1855. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Juin 1983.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2000). Règles Th-I – Caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments. Réglementation Thermique 2000. 2000.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2006). Règles Th-CE – Calcul de la consommation d'énergie et de la température atteinte en été. Réglementation Thermique 2005. 2006.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2006). Règles Th-U – Fascicule 3 : Parois vitrées : Calcul des coefficients thermiques des parois vitrées. Réglementation Thermique 2005. 2006.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2010). Méthode de calcul Th-BCE 2012. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. 10 août 2010.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2011). Evaluation de la performance environnementale des bâtiments. Définition d'ordres de grandeur. Traitement statistique. DESE/ENV - 11.070. Décembre 2011.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2013). Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Rapport intermédiaire. DEE/EICV - 14.027. Octobre 2013.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2014). Logiciel d'analyse de cycle de vie des bâtiments ELODIE. Division Environnement du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Disponible sur : http://www.elodie-cstb.fr/

Certivéa (2011). Référentiel pour la Qualité Environnementale des Bâtiments – « Bâtiments Tertiaires ». Certivéa. Septembre 2011.

Chan H., Riffat S.B., Zhu J. (2010). Review of passive solar heating and cooling technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 781–789.

Collectif Effinergie (2014). Observatoire BBC : L'observatoire des bâtiments basse consommation. Disponible sur : http://observatoirebbc.org/

Comité technique INIES (2014). Compte-rendu du comité technique INIES N°42 du 3 juin 2014. 21 août 2014. Grenoble, France.

Commission Européenne (2013). Report from the Commission to the European Parliament and the Council – Progress by Member States towards Nearly Zero-Energy Buildings. Commission Européenne. Bruxelles, Belgique. 10 Octobre 2013.

da Silva S.M., Guedes M.G. (2010). Using a Multi-Criteria Analysis to Select Design Alternatives: Aiming Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality. International Conference on Solar Heating, Cooling, and Buildings - EuroSun 2010. Graz, Autriche. 28 Septembre - 1 Octobre 2010.

Diakaki C., Grigoroudis E., Kabelis N., Kolokotsa D., Kalaitzakis K., Stavrakakis G. (2010). A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. Energy 35 (2010) 5483-5496.

Djongyang N., Tchinda R., Njomo D. (2010). Thermal Comfort : A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 2626–2640.

Données d'Impact pour les Ouvrages de Génie Civil (DIOGEN) (2014). DIOGEN : Données d'Impact pour les Ouvrages de Génie Civil. Association Française de Génie Civil (AFGC). Disponible sur : http://diogen.fr/

ESTIA SA (2014). DIAL+. ESTIA SA. 2014. Disponible sur : http://www.dialplus.ch/

Fraisse G., Viardot C., Lafabrie O., Achard G. (2002). Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. Energy and Buildings 34 (2002) 1017-1031.

Granadeiro V., Correia J.R., Leal V.M.S., Duarte J.P. (2013). Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. Energy and Buildings 61 (2013) 215-223.

Green Soluce (2014). Le Baromètre de la Certification Environnementale 2014 : Etude comparative du nombre de certifications HQE, LEED et BREEAM pour l'activité bureaux en France. Green Soluce, La Place de l'Immobilier. Mai 2014.

Guardian Europe (2009). Acoustic Insulating Glass: LamiGlass Sound Control. Guardian Europe. 2009.

Hamdy M., Hasan A., Siren K. (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. Energy and Buildings 56 (2013) 189-203.

Hénon A., Dugué A., Lagière P., Sébastian P. (2012). Modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments : un outil adapté à l'échelle patrimoniale et à la problématique de rénovation. Congrès Français de Thermique SFT2012. 29 mai – 1 juin 2012.Talence, France.

Hutter E. (2003). Rôle de l'ingénierie technique. Techniques de l'Ingénieur. Traité Construction C3 120. Mai 2003.

INIES (2014). Base national française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages (INIES).

Association HQE et Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Consulté le 23 juin 2014 : http://www.base-inies.fr/

Institut Wallon (2003). Types de vitrages. Ministère de la Région wallonne, Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie. Février 2003.

International Energy Agency (IEA) (2003). International Energy Agency – Task 23: Optimization of solar energy use in large buildings, Integrated Design Process: A guideline for Sustainable and Solar-Optimised Building Design. International Energy Agency. Avril 2003.

ISO/TC 207 (2006). EN ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. Comité Européen de Normalisation. Octobre 2006.

ISO/TC 59 (2008). ISO 15686-5 : Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévision de la durée de vie - Partie 5: Approche en coût global.

ISO/TC 59 (2008). NF ISO 15392 : Développement durable dans la construction - Principes généraux. Organisation International de Normalisation. Décembre 2008

Itard L. (2003). H.e.n.k., a software tool for the integrated design of buildings and installations in the early design stage. Eight International IBPSA Conference. Eindhoven, The Netherlands. August 11-14, 2003.

Journal officiel de la République française (JORF) (1985). Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée. JORF n°10 du 13 juillet 1985.

Journal officiel de la République française (JORF) (1993). Arrêté du 21 décembre 1993 précisant les modalités techniques d'exécution des éléments de mission de maîtrise d'œuvre confiés par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé. NOR : EQUU9301426A. JORF n°10 du 13 janvier 1994.

Journal officiel de la République française (JORF) (1994). Décret n°93-1268 du 29 novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'œuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé. NOR : EQUU9301161D. JORF du 1er décembre 1993.

Journal officiel de la République française (JORF) (2012). Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants. NOR : DEVU0813714A. Dernière modification au 1 mars 2012.

Journal officiel de la République française (JORF) (2014). Arrêté du 23 décembre 2013 relatif à la déclaration environnementale des produits de construction et de décoration destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment. JORF n°0302 du 29 décembre 2013.

Legifrance (1995). Règlement Sanitaire Départemental Type. Legifrance. Juillet 1995. Disponible sur : http://www.legifrance.gouv.fr/affichSarde.do?reprise=true&page=1&idSarde=SARDOBJT000007113824

Legifrance (2015). Code du travail. Legifrance. Avril 2015. Disponible sur : http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006072050

Liébard A., De Herde A. (2005). Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Observ'ER, Observatoire des énergies renouvelables. France. Décembre 2005.

Lund University (2013). ParaSol. Energy and Building Design, Faculty of Engineering, Lund University. 2013. Disponible sur : http://www.ebd.lth.se/english/research/software/parasol/

McGraw-Hill Construction (2013). World Green Building Trends: Business Benefits Driving New and Retrofit Market Opportunities in Over 60 Countries. McGraw-Hill Construction. 2013.

Meisser M. (2014).Réglementation acoustique des bâtiments. Techniques de l'Ingénieur. 10 février 2014.

Meteotest (2014). Meteonorm: Irradiation data for every place on Earth. Meteotest. Disponible sur : http://meteonorm.com/

Miceli S. (2013). Architectural design for NZEB office buildings. iiSBE Forum of Young Researchers in Sustainable Buildings 2013. Juin 25-26, 2013. Prague, République Tchèque.

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) (2010). Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, en charge des Technologies Vertes et des Négociations sur le Climat. NOR : DEVU1026270A. 27 octobre 2010.

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) (2014). Base de données Pégase (format Beyond 20/20). Disponible sur : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/s/prix-energies.html

Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme (MELTT) (1996). Arrêté du 30 mai 1996 relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit. Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme. NOR : ENVP9650195A. 28 juin 1996.

Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP) (2011). Maîtrise d'ouvrage publique – Quelle démarche pour des projets durables ?. Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques. ISBN : 978-2-11-128284-1. Septembre 2011.

Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP) (2003). Constructions publiques - architecture et "HQE". Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques. ISBN : 2-11-094243-6. Avril 2003.

National Renewable Energy Laboratory (NREL) (1995). International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. International Energy Agency et National Renewable Energy Laboratory. Février 1995.

Nielsen T.R. (2005). Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. Solar Energy 78 (2005) 73-83.

Observatoire des Prix Constatés d'Opérations de Construction en France (OPCOC) (2014). Union Nationale des Economistes de la Construction (UNTEC) et Entreprises Générales de France (EGF.BTP). Disponible sur : http://prix-constates-construction.fr/

Ochoa C.E., Capeluto I. G. (2009). Advice tool for early design stages of intelligent facades based on energy and visual comfort approach. Energy and Buildings 41 (2009) 480-488.

Office des Prix du Bâtiment (2014). BATITEL. Office des Prix du Bâtiment. Disponible sur : http://www.batitel.com/

OPEN HOUSE (2013). OPEN HOUSE - Benchmarking and mainstreaming building sustainability in the EU based on transparency and openness (open source and availability) from model to implementation. Disponible sur : http://www.openhouse-fp7.eu/

Parlement européen, Conseil de l'Union européenne (2002). Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments. Journal officiel n° L 001 du 04/01/2003 p. 0065 – 0071.

Parlement européen, Conseil de l'Union européenne (2010). Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments. Journal officiel n° L 153 du 18/06/2010 p. 0013-0035.

PEP ecopassport (2014).Base de données du programme d'éco-déclaration Profils Environnemental Produit. Association P.E.P. Disponible sur : http://www.pep-ecopassport.org/

Perfection (2010). Perfection: Coordination action for Performance Indicators for Health, Comfort and Safety of the Indoor Environment. Performance Indicators for Health, Comfort and Safety of the Indoor Environment. Disponible sur : http://ca-perfection.eu/

Poirazis H. (2004). Double Skin Façades for Office Buildings – Literature Review. Lund University. 2004. Lund, Suède.

Qualitel (2012). Qualitel « Habitat & Environnement » : Certifications Habitat Neuf - Référentiel millésime 2012. CERQUAL. 2012.

Rouault F., Bruneau D., Sébastian P., Lopez J. (2014). Experimental investigation and modelling of a low temperature PCM thermal energy exchange and storage system. Energy and Buildings 83 (2014) 96–107.

Roux J.J. (1984). Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments. Thèse de docteur ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 25 avril 1984. Lyon, France.

Sadineni S.B., Madala S., Boehm R.F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3617– 3631.

Safer N. (2006). Modélisation des façades de type double-peau équipées de protections solaires : Approches multi-échelles. Thèse de docteur ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Juin 2006. Lyon, France.

Saint-Gobain Glass France (2013). SGG PLANILUX : Fiche Technique. Saint-Gobain Glass France. 2013.

Santos P., Martins R., Gervásio H., da Silva L.S. (2014). Assessment of building operational energy at early stages of design – A monthly quasi-steady-state approach. Energy and Buildings 79 (2014) 58-73.

Schiefer C., Heimrath R., Hengsberger H., Mach T., Streicher W., Santamouris M., Farou I., Erhorn-Kluttig H., de Matos M., Duarte R., Blomsterberg Å. (2008). BESTFACADE: Best Practice for Double Skin Façades. EIE/04/135/S07.38652. Intelligent Energy Europe. Février 2008.

Semidor C., Torgue H., Beaumont J., Barlet A., Delas J, Regnault C., Gbedji F. (2011). Elaboration of a methodological guide of sound ambiences of evaluate urban soundscapes: the ASTUCE Research Project. PLEA 2011: 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Louvain-la-Neuve, Belgique. 13-15 juillet, 2011.

Serge Ferrari (2013). Catalogue Soltis 92. Serge Ferrari. 2013.

Sève R. (2009). Science de la couleur : Aspects physiques et perceptifs. Marseille, France. Chalagam. ISBN 2-9519607-5-1. 2009.

SuPerBuildings Consortium (2012). Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings – Final report. SuPerBuildings project: Sustainability and Performance assessment and Benchmarking of Buildings. 2012.

Sustainable Building Alliance (2010). A Framework for Common Metrics of Buildings 2010, 2010. Disponible sur : http://www.sballiance.org/

Université catholique de Louvain (2014). Energie+, Architecture et Climat. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) de l'Université catholique de Louvain. Louvain-la-Neuve, Belgique. Disponible sur : http://www.energieplus-lesite.be

US Green Building Council (USGBC) (2013). LEED 2009 for New Construction and Major Renovations Rating System. US Green Building Council. Octobre 2013.

Vartiainen E. (2000). A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements. Renewable Energy 20 (2000) 265-277.

Ventura A. (2012). Approches systémiques et éco-conception. Une réflexion sur les fondements conceptuels et les applications de l'Analyse de Cycle de Vie. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Nantes, 2012.

VIT (2013). Triple vitrage pour une isolation thermique optimale. Vitrage Isolant Thermique (VIT). 2013.

Wahlström Å., Brohus H. (2006). Assessment concept for the building design process using the Eco-factor method. 4th Annex 44 Forum. Turin, Italie. 29 Mars 2006.

Wang W., Zmeureanu R., Rivard H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. Building and environment 40 (2005) 1512-1525.

World Green Building Council (2013). The Business Case for Green Buildings: A Review of the Costs and Benefits for Developers, Investors and Occupants. World Green Building Council. 2013.

Yezioro A. (2009). A knowledge based CAAD system for passive solar architecture. Renewable Energy 34 (2009) 769-779.

Annexes

Annexe A Méthode de calcul des indicateurs de performance énergétique 153
A.1. Modèle de simulation thermique dynamique 153
A.1.1. Cœur de calcul du modèle thermique du bâtiment 153
A.1.2 Modèle de gestion des protections solaires 174
A.1.3. Modèle de calcul des consommations énergétiques des systèmes techniques 177
A.1.4. Scénarios d'occupation et de charges thermiques internes 185
A.1.5. Correction du rayonnement solaire selon l'orientation du bâtiment 187
A.1.6. Démarche de résolution numérique du modèle thermique 189
A.2. Modèle de calcul des indicateurs environnementaux 192
A.3. Modèle de calcul des indicateurs économiques 197
A.4. Modèle de calcul de l'indicateur de confort hygrothermique 199
A.5. Modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel 200
A.6. Modèle de calcul de l'indicateur de confort acoustique 202
A.7. Modèle de calcul de l'indicateur de qualité de l'air intérieur 205
Annexe B Modèle de répartition de décisions de conception 207
B.1. Dispositions architecturales 208
B.2. Systèmes techniques 209
B.3. Façade double peau vitrée 210
Annexe C Construction de la base de données de l'outil d'évaluation 211
C.1. Vitrages 211
C.1.1. Données environnementales 211
C.1.2. Données économiques 212
C.1.3. Données techniques 213
C.2. Menuiseries et structure porteuse de la façade vitrée 213
C.2.1. Données environnementales 213
C.2.2. Données économiques 214
C.2.3. Données techniques 214
C.3. Matériaux structurels et d'isolation thermique 215
C.3.1. Données environnementales 215
C.3.2. Données économiques 215
C.4. Protections solaires 217

C.4.2. Données économiques 217
C.4.3. Données techniques 217
C.5. Systèmes techniques 218
C.5.1. Données environnementales 218
C.5.2. Données économiques 219
C.5.3. Données techniques 219
C.6. Ressources énergétiques 219
C.6.1. Données environnementales 219
C.6.2. Données économiques 220

Annexe A Méthode de calcul des indicateurs de performance énergétique

A.1. Modèle de simulation thermique dynamique

La modélisation thermique dynamique du bâtiment est détaillée dans cette annexe comme suit :

- D'abord, une description des équations du cœur de calcul du modèle thermique dynamique du bâtiment, construit sur l'analogie électrique-thermique (cf. section A.1.1).
- Ensuite, une description de la modélisation thermique de la façade double peau vitrée, dérivée du module « espaces tampons solarisés » de la réglementation thermique française (cf. section A.1.1.4).
- Postérieurement, une présentation des informations complémentant ce cœur de calcul, également basées sur le cadre réglementaire français, y compris :
    - Le modèle de gestion des protections solaires (cf. section A.1.2).
    - Les modèles de calcul des consommations énergétiques des systèmes techniques (cf. section A.1.3).
    - Les scénarios d'occupation et de charges thermiques internes (cf. section A.1.4).
- Ensuite, la présentation de la méthode de correction du rayonnement solaire selon l'angle d'orientation du bâtiment (cf. section A.1.5).
- Enfin, la présentation de la démarche de résolution numérique du système d'équations du modèle thermique dynamique (cf. section A.1.6).

A.1.1. Cœur de calcul du modèle thermique du bâtiment

Comme présenté dans la section 2.3.3 de ce travail, le cœur de calcul du modèle est donné par le bilan thermique effectué sur 3 types de nœuds par zone thermique, caractérisés par leurs températures :

- Nœud « Air intérieur » (T_{air-in})
- Nœud « Surfaces intérieures » ($T_{wall-in}$)
- Nœud « Surfaces extérieures » ($T_{wall-out}$)

Pour simplifier la notation, le bilan thermique sera présenté de manière générale pour une zone thermique quelconque. Le même principe est à appliquer aux autres zones thermiques, sauf dans le cas des zones thermiques en contact avec la façade double peau vitrée, pour lesquelles les échanges thermiques avec l'extérieur sont modifiés suivant le modèle présenté dans la section A.1.1.4.

A.1.1.1. Bilan thermique du nœud représentant l'air à l'intérieur de la zone thermique

Comme schématisé dans la figure A.1, le bilan thermique du nœud représentant la masse d'air situé dans l'espace intérieur de la zone thermique étudiée est donné comme suit :

$$C_{air-in} \cdot \frac{dT_{air-in}}{dt} = \phi_{air-in\leftrightarrow wall-in} + \phi_{air-in\leftrightarrow win} + \phi_{air-in\leftrightarrow bridges} + \phi_{air-in\leftrightarrow vent} + \phi_{air-in\leftarrow sun} + \phi_{air-in\leftarrow loads} + \phi_{air-in\leftarrow syst}$$

C_{air-in} : Capacitance thermique de l'air à l'intérieur de la zone thermique [J/K].

T_{air-in} : Température de l'air à l'intérieur de la zone thermique [K].

$\phi_{air-in\leftrightarrow wall-in}$: Puissance thermique échangée par convection et rayonnement entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et la surface intérieure des parois opaques de l'enveloppe de la zone thermique [W].

$\phi_{air-in\leftrightarrow win}$: Puissance thermique échangée par convection, rayonnement et conduction entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et l'air à l'extérieur à travers les baies vitrées de l'enveloppe de la zone thermique [W].

$\phi_{air-in\leftrightarrow bridges}$: Puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et l'air à l'extérieur à travers les ponts thermiques de l'enveloppe de la zone thermique [W].

$\phi_{air-in\leftrightarrow vent}$: Puissance thermique échangée par convection dû au renouvellement d'air à l'intérieur de la zone thermique [W].

$\phi_{air-in\leftarrow sun}$: Flux thermique reçu par l'air à intérieur de la zone thermique dû au rayonnement solaire [W].

$\phi_{air-in\leftarrow loads}$: Flux thermique reçu par l'air à intérieur de la zone thermique dû aux charges thermiques internes (occupants, équipements de bureautique et éclairage) [W]

$\phi_{air-in\leftarrow syst}$: Puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et les systèmes techniques de traitement d'ambiance (chauffage/climatisation) [W]

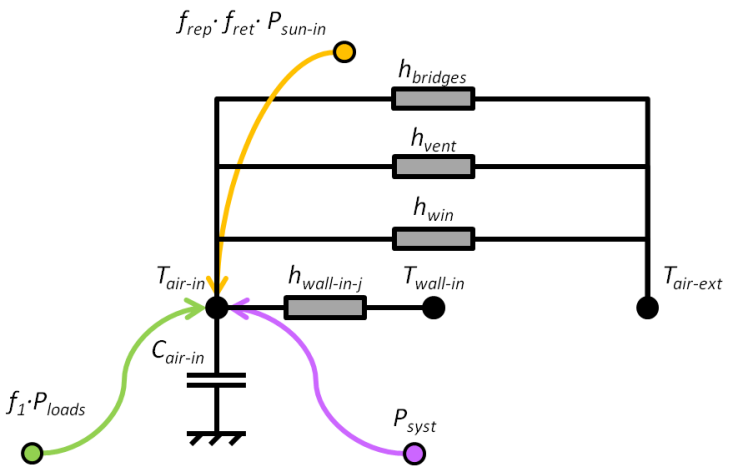

Figure A.1. Bilan thermique du nœud représentant l'air à l'intérieur de la zone thermique.

Dans le bilan d'énergie précédent, la capacitance thermique de l'air à l'intérieur de la zone thermique est définie par l'expression suivante :

$$C_{air-in} = k_{mob} \cdot \rho_{air} \cdot Cp_{air} \cdot V_{space}$$

k_{mob} : Coefficient multiplicateur de l'inertie thermique de l'air à l'intérieur de la zone thermique par la présence de mobilier, avec une valeur de 6.55 en considérant une valeur forfaitaire de 20 kJ/K par m^2 de sol, comme proposé dans les règles Th-I de la réglementation thermique 2000 (CSTB, 2000), et une hauteur sous plafond de 3 m [-]

ρ_{air} : Masse volumique de l'air, égale à 1.205 kg/m^3 à 20 °C et à pression atmosphérique.

Cp_{air} : Capacité thermique massique de l'air, égale à 1005 J/(kg.K) à 20 °C et à pression atmosphérique.

V_{space} : Volume de l'espace intérieur [m^3]

La puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et la surface intérieure des parois opaques de l'enveloppe est définie comme montré ci-dessous :

$$\phi_{air-in \leftrightarrow wall-in} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-in-j} \right) \cdot (T_{air-in} - T_{wall-in})$$

N_{wall} : Nombre de surfaces de parois opaques de la zone thermique (murs de l'enveloppe, toiture, planchers intermédiaires, cloisons, plancher bas) [-]

S_{wall-j} : Surface de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [m^2]

$h_{wall-in-j}$: Coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et la surface intérieure de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [W/(m^2.K)]

$T_{wall-in}$: Température de la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique [K]

Les échanges thermiques associés au rayonnement et à la convection entre les éléments du bâti et l'air sont modélisés de manière combinée à l'aide de coefficients globaux constants. Les valeurs considérées dans ce travail sont ceux proposées dans le projet Building Energy Simulation Test (BESTEST) de l'Agence Internationale de l'Energie (NREL, 1995). Le tableau A.1 donne les valeurs des coefficients avec une valeur d'émissivité infrarouge égale à 0.9.

Tableau A.1. Coefficients d'échange thermique par convection et rayonnement en fonction du type de paroi et de son inclination (adapté de NREL, 1995)

Type de paroi	**Côté de l'échange thermique**	**Coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement [W/m^2.K]**	**Type d'échange selon BESTEST**
Mur	Extérieur	29.3	Côté extérieur de parois et toitures
	Intérieur	8.29	Côté intérieur de surfaces verticales
Baie vitrée	Extérieur	21	Côté extérieur de fenêtres et parois hautement conductrices
	Intérieur	8.29	Côté intérieur de surfaces verticales
Toit	Extérieur	29.3	Côté extérieur de parois et toitures
	Intérieur	9.26	Côté intérieur de surfaces horizontales avec un flux ascendant
Plancher bas	Intérieur	6.13	Côté intérieur de surfaces horizontales avec un flux descendant
Cloison	Intérieur	8.29	Côté intérieur de surfaces verticales
Plancher intermédiaire	Intérieur	7.695	Moyenne des valeurs de flux ascendant et descendant du côté intérieur de surfaces horizontales

La puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et l'air à l'extérieur à travers les baies vitrées de l'enveloppe est donné comme suit :

$$\phi_{air-in\leftrightarrow win} = -\sum_{j=1}^{N_{orient}} S_{win-j} \cdot h_{win} \cdot (T_{air-in} - T_{air-ext})$$

N_{orient} : Nombre d'orientations du bâtiment (sud, est, nord, ouest) [-]

S_{win-j} : Surface des baies vitrées dans l'orientation de type *j* de la zone thermique [m^2]

h_{win} : Coefficient d'échange thermique global (convection, rayonnement et conduction) des baies vitrées [W/(m^2.K)]

$T_{air-ext}$: Température de l'air à l'extérieur de la zone thermique [K]

Le coefficient d'échange thermique global des baies vitrées est défini comme montré ci-dessous :

$$h_{win} = h_{win-in} + U_{win} + h_{win-out}$$

h_{win-in} : Coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et les baies vitrées [W/(m^2.K)]

U_{win} : Coefficient de transmission thermique surfacique des baies vitrées de la zone thermique [W/(m^2.K)]

$h_{win-out}$: Coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement entre les baies vitrées et l'air à l'extérieur de la zone thermique [W/(m^2.K)]

La puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et l'air à l'extérieur à travers les ponts thermiques de l'enveloppe est donnée comme suit :

$$\phi_{air-in \leftrightarrow bridges} = -\left(\sum_{m=1}^{N_{bridges}} \Psi_m \cdot L_m \right) \cdot (T_{air-in} - T_{air-ext})$$

$N_{bridges}$: Nombre de ponts thermiques de l'enveloppe de la zone thermique et l'air à l'extérieure de la zone thermique (vertical mur-mur, vertical mur-cloison, horizontal plancher haut, horizontal plancher bas, horizontal plancher intermédiaire, baies vitrées) [-]

Ψ_m : Coefficient linéique du pont thermique de type *m* de l'enveloppe de la zone thermique [W/(m.K)]

L_m : Longueur du pont thermique de type *m* de l'enveloppe de la zone thermique [m]

Les valeurs des coefficients linéiques des ponts thermiques considérées dans ce travail sont ceux proposées dans les règles Th-I de la réglementation thermique 2000. Ces coefficients, donnés selon leur type et le positionnement de l'isolation thermique, sont montrés dans le tableau A.2.

Tableau A.2. Coefficients linéiques des ponts thermiques selon leur type et le positionnement de l'isolation thermique (adapté de CSTB, 2000).

Type de pont thermique	**Coefficient linéique du pont thermique**	
	Isolation thermique par l'intérieur	**Isolation thermique par l'extérieur**
Vertical mur-mur	0.02	0.16
Vertical mur-cloison	0.99	0.09
Horizontal plancher haut	0.84	0.74
Horizontal plancher bas	0.7	0.79
Horizontal plancher intermédiaire	0.99	0.09
Fenêtres	0.06	0.4

La puissance thermique échangée par convection dû au renouvellement d'air à l'intérieur de la zone thermique est modélisée comme montré ci-dessous :

$$\phi_{air-in\leftrightarrow vent} = -\rho_{air} \cdot Cp_{air} \cdot \left(Q_{vent-in} \cdot f_{hr} + Q_{inf-in}\right) \cdot (T_{air-in} - T_{air-ext})$$

$Q_{vent-in}$: Débit total de renouvellement d'air à l'intérieur de la zone thermique [m^3/s]

f_{hr} : Facteur de correction lié à l'opération d'un système de récupération de chaleur [-]

Q_{inf-in} : Débit de renouvellement d'air à l'intérieur de la zone thermique dû aux infiltrations par l'enveloppe [m^3/s]

En ce qui concerne au renouvellement d'air de l'espace par ventilation mécanique, deux stratégies sont envisagées en fonction de la saison de l'année, représentatives de la pratique commune dans les bâtiments tertiaires :

- Hors la période de chauffage, le débit d'air vicié extrait de l'espace est remplacé par de l'air frais de l'extérieur.
- En période de chauffage, une partie de l'énergie thermique de l'air vicié extrait de l'espace est récupérée par l'air frais entrant grâce à un échangeur de type double flux.

De cette façon, la valeur du facteur de correction lié à l'opération du système de récupération de chaleur est donnée selon la saison de l'année :

- Hors la période de chauffage : $f_{hr} = 1$
- En période de chauffage : $f_{hr} = 1 - \eta_{hr}$

η_{hr} : Efficacité du système de récupération de chaleur [-]

Dans l'outil d'évaluation, les dates de la période de chauffage sont définies par l'utilisateur.

Le flux thermique reçu par l'air à intérieur de la zone thermique dû au rayonnement solaire est modélisé à l'aide de facteurs de répartition et rétention des apports solaires comme suit :

$$\phi_{air-in\leftarrow sun} = f_{rep} \cdot f_{ret} \cdot P_{sun-in}$$

f_{rep} : Facteur de répartition des apports thermiques entre l'air et les parois à l'intérieur de la zone thermique [-]

f_{ret} : Facteur de rétention des apports solaires entrant dans la zone thermique [-]

P_{sun-in} : Puissance thermique solaire entrant dans l'intérieur de la zone thermique [W]

Comme montrée dans la figure A.2, une partie de la puissance solaire entrante dans l'espace (P_{sun-in}) est réfléchie par les parois opaques à l'intérieur de la zone thermique et peut

subséquemment abandonner l'espace par les baies vitrées. Ce phénomène est caractérisé par un facteur de rétention des apports solaires entrant dans la zone thermique (f_{ret}).

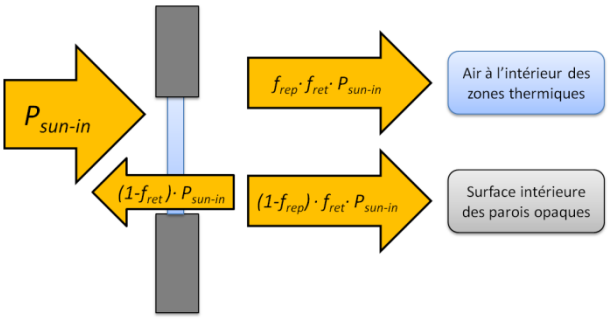

Figure A.2. Répartition de la puissance thermique solaire entrant dans l'espace.

Le facteur de rétention des apports solaires entrant dans l'espace représente la part du rayonnement reçu dans l'espace et non renvoyé à travers les vitrages, comme montré ci-dessous :

$$f_{ret} = 1 - (1 - \bar{\alpha}_{wall}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^{N_{orient}} S_{win-j}}{\left(\sum_{j=1}^{N_{wall}} S_{wall-j}\right) + \left(\sum_{j=1}^{N_{orient}} S_{win-j}\right)}$$

$\bar{\alpha}_{wall}$: Coefficient d'absorptivité moyen des parois opaques à l'intérieur de la zone thermique [-]

Ce coefficient d'absorptivité moyen est calculé à partir des surfaces des parois opaques à l'intérieur de l'espace et de leurs coefficients d'absorptivité :

$$\bar{\alpha}_{wall} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{wall}} \alpha_{wall-in-j} \cdot S_{wall-j}}{\sum_{j=1}^{N_{wall}} S_{wall-j}}$$

$\alpha_{wall-in-j}$: Coefficient d'absorptivité de la paroi opaque *j* de la zone thermique [-]

A titre de simplification, des valeurs de référence pour les coefficients d'absorptivité sont considérés en fonction du type de paroi opaque. Ces valeurs de référence, venant des règles Th-CE de la réglementation thermique 2005 (CSTB, 2006), sont montrées dans le tableau A.3.

La partie de la puissance solaire qui est retenue dans l'espace ($f_{ret} \cdot P_{sun-in}$) est alors répartie entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et les parois opaques en fonction d'un facteur de répartition (f_{rep}), ici considéré égal à 0.5 (Rouault *et al.*, 2014). Ainsi, une partie ($f_{rep} \cdot P_{sun-in}$) est absorbée par l'air directement, tandis que le reste ($\left(1 - f_{rep}\right) \cdot P_{sun-in}$) est réparti entre les parois opaques de la zone thermique.

Tableau A.3. Coefficients d'absorptivité selon le type de paroi opaque.

Type de paroi opaque	Coefficient d'absorptivité
Mur vertical et cloisons	0.6
Plafond	0.8
Plancher	0.6

La puissance thermique solaire entrant dans l'intérieur de la zone thermique est donné dépend du flux thermique solaire arrivant sur les façades ainsi que des caractéristiques des baies vitrées de la zone thermique comme montré ci-dessous :

$$P_{sun-in} = G_{win} \cdot (1 - f_{win}) \cdot f_{sp} \cdot \sum_{j=1}^{N_{orient}} S_{win-j} \cdot \varphi_{sun-j}$$

G_{win} : Facteur solaire des baies vitrées de la zone thermique [-]

f_{win} : Facteur de charpente des baies vitrées de la zone thermique [-]

f_{sp} : Facteur de correction lié à la gestion des protections solaires [-]

φ_{sun-j} : Flux thermique solaire surfacique dans l'orientation de type *j* des baies vitrées de la zone thermique [W/m^2]

Le facteur de correction lié à la gestion des protections solaires (f_{sp}) détermine la part du flux thermique solaire qui est transmise à travers ces composants. Il est calculé selon le modèle de gestion choisi. Ce facteur sera décrit en détail dans la section A.1.2.

Le flux thermique solaire surfacique arrivant sur la zone thermique est donné en fonction de l'orientation. La base de données climatologiques intégrée à l'outil d'évaluation proposé dans ce travail contient des valeurs horaires du flux thermique solaire pour les quatre orientations principales (nord, sud, est, ouest). Le calcul de la correction du rayonnement solaire pour toute autre angle d'orientation du bâtiment est décrit en détail dans la section A.1.5.

En outre, les charges thermiques internes (P_{loads}) sont réparties entre l'air intérieur et les parois massiques dans la même proportion que la puissance solaire entrante, c'est-à-dire en faisant appel au facteur de répartition des apports thermiques (f_{rep}). Ainsi, le flux thermique reçu par l'air à intérieur de la zone thermique dû aux charges thermiques internes est donné comme suit :

$$\phi_{air-in \leftarrow loads} = f_{rep} \cdot P_{loads}$$

P_{loads} : Puissance thermique dissipée par les charges thermiques internes de la zone thermique [W]

Les sources de charges thermiques internes considérées dans cette méthode sont les occupants, les équipements de bureautique et l'éclairage artificiel. La puissance thermique dissipée par les charges thermiques internes de la zone thermique est alors calculée comme suit :

$$P_{loads} = \left(n_{occ} \cdot p_{occ} + p_{pc} + p_{light}\right) \cdot S_{space}$$

n_{occ} : Scénario de densité d'occupation dans la zone thermique [occupants/m^2]

p_{occ} : Puissance thermique dissipée par occupant, considérée égale à 90 W/occupant

p_{pc} : Scénario de puissance thermique dissipée par les équipements de bureautique par unité de surface de la zone thermique [W/m^2]

p_{light} : Scénario de puissance thermique dissipée par les équipements d'éclairage par unité de surface de la zone thermique [W/m^2]

S_{space} : Surface de la zone thermique [m^2]

Les scénarios d'occupation et de charges internes (bureautique et éclairage) pour les zones thermiques d'intérêt (bureaux et salles de réunion) sont donnés dans la section A.1.4 de ce travail.

Enfin, la puissance thermique des systèmes techniques (climatisation et chauffage) est considérée d'être intégralement absorbée par l'air à l'intérieur de la zone thermique. Ainsi, la puissance thermique échangée entre l'air à l'intérieur de la zone thermique et les systèmes techniques de traitement d'ambiance est donnée comme suit :

$$\phi_{air-int \leftarrow syst} = P_{syst} = -P_{ac} + P_h$$

P_{syst} : Puissance thermique des systèmes techniques de traitement d'ambiance [W]

P_{ac} : Puissance thermique du système de climatisation [W]

P_h : Puissance thermique du système de chauffage [W]

A.1.1.2. Bilan thermique du nœud représentant la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique

Comme schématisé dans la figure A.3, le bilan thermique du nœud représentant la « partie intérieure » des parois opaques délimitant la zone thermique est donné comme montré ci-dessous :

$$\left(\sum_{j=1}^{N_{wall}} S_{wall-j} \cdot C_{wall-in-j}\right) \cdot \frac{dT_{wall-in}}{dt} = \phi_{wall-in \leftrightarrow air-in} + \phi_{wall-in \leftrightarrow wall-out} + \phi_{wall-in \leftrightarrow wall-in-other} + \phi_{wall-in \leftarrow sun} + \phi_{wall-in \leftarrow loads}$$

$C_{wall-in-j}$: Capacitance thermique de la surface intérieure de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [J/(m^2.K)]

$\phi_{wall-in \leftrightarrow air-in}$: Puissance thermique échangée par convection et rayonnement entre la surface intérieure des parois opaques et l'air à l'intérieur de la zone thermique [W]

$\phi_{wall-in \leftrightarrow wall-out}$: Puissance thermique échangée par conduction entre les surfaces intérieure et extérieure des parois opaques de la zone thermique [W]

$\phi_{wall-in \leftrightarrow wall-in-other}$: Puissance thermique échangée par conduction entre la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique en question et les surfaces intérieures des parois opaques des zones thermiques voisines [W]

$\phi_{wall-in \leftarrow sun}$: Flux thermique reçu par la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique dû au rayonnement solaire [W]

$\phi_{wall-in \leftarrow loads}$: Flux thermique reçu par la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique dû aux charges thermiques internes [W]

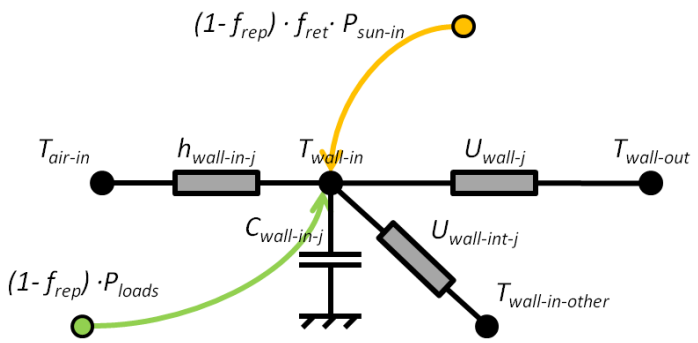

Figure A.3. Bilan thermique du nœud représentant la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique.

Comme montré dans la figure A.4, les parois opaques délimitant les zones thermiques sont normalement composées de plusieurs couches de matériaux différents. Le calcul de la capacitance thermique de la surface intérieure des parois opaques pondère la capacité thermique massique de chacune des couches de matériau le composant selon son épaisseur, sa résistance thermique et sa distance à l'interface de contact avec l'air, comme montré ci-dessous :

$$C_{wall-in-j} = \sum_{k=1}^{N_{wall-layers-j}} \rho_{wall-j-k} \cdot Cp_{wall-j-k} \cdot e_{wall-j-k} \cdot \beta_{wall-j-k}$$

$N_{wall-layers-j}$: Nombre de couches de matériaux composant la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [-]

$\rho_{wall-j-k}$: Masse volumique du matériau de la couche de type *k* de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [kg/m^3]

$Cp_{wall-j-k}$: Capacité thermique massique du matériau de la couche de type *k* de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [J/(kg.K)]

$e_{wall-j-k}$: Épaisseur de la couche du matériau de type *k* de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [m]

$\beta_{wall-j-k}$: Pondération de la capacitance thermique de la couche du matériau de type *k* de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [-]

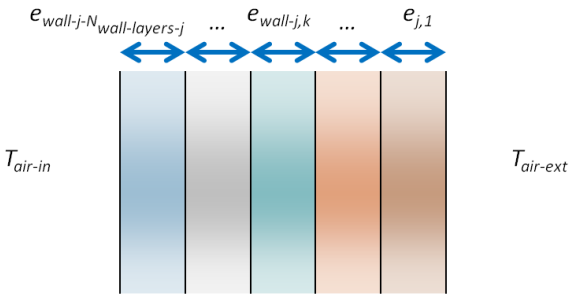

Figure A.4. Succession de couches de matériaux composant une paroi opaque, énumérées de l'extérieur à l'intérieur de l'espace.

Le tableau A.4 spécifie le nombre maximal de couches de matériaux et la composition matérielle de couches considérés par la méthode d'évaluation selon le type de paroi opaque.

Tableau A.4. Nombre maximal de couches de matériaux à considérer par type de paroi opaque.

Type de paroi opaque	Nombre maximal de couches de matériaux	Composition matérielle de couches
Mur de l'enveloppe	3	Isolation extérieure – Matériau structurel – Isolation intérieure
Toiture	3	Isolation extérieure – Matériau structurel – Isolation intérieure
Plancher bas	2	Isolation extérieure/Matériau structurel – Matériau structurel/Isolation intérieure
Cloison verticale	1	Matériau structurel
Plancher intermédiaire	1	Matériau structurel

La pondération de la capacitance thermique de la couche du matériau de type *k* de la paroi opaque est calculée à partir de la somme des résistances thermiques des couches entre l'interface de contact avec l'air et la couche en question ainsi que de la résistance totale de la paroi opaque, comme montrée ci-dessous :

$$\beta_{layers-j-k} = \frac{R_{wall-j-k} + R_{wall-j-(k-1)}}{2 \cdot R_{wall-j}}$$

$R_{wall-j-k}$: Résistance thermique des premières *k* couches de matériaux de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [(m^2.K)/W]

$R_{wall-j-(k-1)}$: Résistance thermique des premières *k–1* couches de matériaux de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [(m^2.K)/W]

R_{wall-j} : Résistance thermique totale de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [(m^2.K)/W]

Le calcul de chacune de ces quantités est donné comme suit :

$$R_{wall-j-k} = \sum_{i=1}^{k} \frac{e_{wall-j-i}}{\lambda_{wall-j-i}}$$

$$R_{wall-j-(k-1)} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{e_{wall-j-i}}{\lambda_{wall-j-i}}$$

$$R_{wall-j} = \sum_{k=1}^{N_{wall-layers-j}} \frac{e_{wall-j-k}}{\lambda_{wall-j-k}}$$

$\lambda_{wall-j-k}$: Conductivité thermique du matériau de la couche de type *k* de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [W/(m.K)]

Par ailleurs, la puissance thermique échangée par convection et rayonnement entre la surface intérieure des parois opaques et l'air à l'intérieur de la zone thermique est donnée en fonction du coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement ($h_{wall-in-j}$) et la surface de la paroi opaque en question (S_{wall-j}) comme suit :

$$\phi_{wall-in \leftrightarrow air-in} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-in-j} \right) \cdot (T_{wall-in} - T_{air-in})$$

La puissance thermique échangée par conduction entre les surfaces intérieure et extérieure des parois opaques de la zone thermique est calculée comme montré ci-dessous :

$$\phi_{wall-in \leftrightarrow wall-out} = -\sum_{j=1}^{N_{wall-env}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-j} \cdot \left(T_{wall-in} - T_{wall-out-j}\right)$$

$N_{wall-env}$: Nombre de surfaces de parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique (murs de l'enveloppe, toiture, plancher bas) [-]

U_{wall-j} : Coefficient de transmission thermique surfacique de la paroi opaque de type *j* de la zone thermique [W/(m^2.K)]

$T_{wall-out-j}$: Température de la surface extérieure de la paroi opaque de type *j* composant l'enveloppe de la zone thermique [K]

Le coefficient de transmission thermique surfacique d'une paroi opaque est simplement l'inverse de sa résistance thermique totale :

$$U_{wall-j} = \frac{1}{R_{wall-j}}$$

La puissance thermique échangée par conduction entre la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique en question et les surfaces intérieures des parois opaques des zones thermiques voisines est similairement calculée comme suit :

$$\phi_{wall-in \leftrightarrow wall-in-other} = -\sum_{j=1}^{N_{wall-int}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-in-j} \cdot (T_{wall-in} - T_{wall-in-other})$$

$N_{wall-in}$: Nombre de surfaces de parois opaques de la zone thermique en contact avec d'autres zones thermiques du bâtiment (cloisons, planchers intermédiaires) [-]

Comme décrit dans la section précédente et schématisée dans la figure A.2, le flux thermique reçu par la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique dû au rayonnement solaire est calculé à l'aide des facteurs de rétention (f_{ret}) et répartition (f_{rep}) des apports solaires thermiques, comme montré ci-dessous :

$$\phi_{wall-in \leftarrow sun} = \left(1 - f_{rep}\right) \cdot f_{ret} \cdot P_{sun-in}$$

Similairement, le flux thermique reçu par la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique dû aux charges thermiques internes est donné comme suit :

$$\phi_{wall-in \leftarrow loads} = \left(1 - f_{rep}\right) \cdot P_{loads}$$

A.1.1.3. Bilan thermique du nœud représentant la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique

Comme schématisé dans la figure A.5, le bilan thermique du nœud représentant la « partie extérieure » des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique est donné comme montrée ci-dessous :

$$\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env}} C_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j}\right) \cdot \frac{dT_{wall-out}}{dt} = \phi_{wall-out \leftrightarrow wall-in} + \phi_{wall-out \leftrightarrow air-ext} + \phi_{wall-out \leftarrow sun} + \phi_{wall-out \leftrightarrow ground}$$

$C_{wall-out-j}$: Capacitance thermique de la surface extérieure de la paroi opaque de type *j* composant l'enveloppe de la zone thermique [J/(m^2.K)]

$\phi_{wall-out \leftrightarrow wall-in}$: Puissance thermique échangée par conduction entre les surfaces extérieure et intérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique [W]

$\phi_{wall-out \leftrightarrow air-ext}$: Puissance thermique échangée par convection et par rayonnement entre la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique et l'air à l'extérieur de la zone thermique [W]

$\phi_{wall-out \leftarrow sun}$: Flux thermique reçu par la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique dû au rayonnement solaire [W]

$\phi_{wall-out \leftrightarrow ground}$: Puissance thermique échangée par conduction entre la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique et le sol [W]

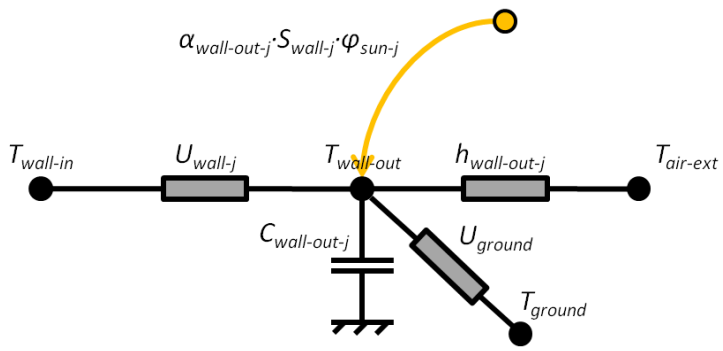

Figure A.5. Bilan thermique du nœud représentant la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique.

Suivant le même raisonnement que pour la surface intérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique, la capacitance thermique de la surface extérieure est calculée à travers d'une pondération des couches des matériaux la constituant en fonction de leurs épaisseurs et leurs distances à l'interface de contact avec l'air, comme montré ci-dessous :

$$C_{wall-out-j} = \sum_{k=1}^{N_{wall-layers-j}} \rho_{wall-j-k} \cdot Cp_{wall-j-k} \cdot e_{wall-j-k} \cdot \left(1 - \beta_{wall-j-k}\right)$$

La puissance thermique échangée par conduction entre les surfaces extérieure et intérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique est calculé avec l'aide du coefficient de transmission thermique surfacique de la paroi opaque (U_{wall-j}), comme suit :

$$\phi_{wall-out-j \leftrightarrow wall-in} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-j} \cdot\right)(T_{wall-out} - T_{wall-in})$$

La puissance thermique échangée par convection et par rayonnement entre la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe et l'air à l'extérieur est donnée comme suit :

$$\phi_{wall-out\leftrightarrow air-ext} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-out-j}\right) \cdot (T_{wall-out} - T_{air-ext})$$

$h_{wall-out-j}$: Coefficient de transfert thermique par convection et rayonnement entre la surface extérieure de la paroi opaque de type *j* composant l'enveloppe et l'air à l'extérieur de la zone thermique [W/(m^2.K)]

Le flux thermique reçu par la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe dû au rayonnement solaire est donné comme suit :

$$\phi_{wall-out\leftarrow sun} = \sum_{j=1}^{N_{orient}} \alpha_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j} \cdot \varphi_{sun-j}$$

$\alpha_{wall-out-j}$: Coefficient d'absorption de la surface extérieure de la paroi opaque de type *j* composant l'enveloppe de la zone thermique [-]

Enfin, la puissance thermique échangée entre la surface extérieure de l'enveloppe de la zone thermique et le sol est calculée comme montrée ci-dessous :

$$\phi_{wall-out\leftrightarrow ground} = -S_{wall-ground} \cdot U_{ground} \cdot \left(T_{wall-out} - T_{ground}\right)$$

U_{ground} : Coefficient d'échange thermique avec le terrain [W/(m^2·K)]

T_{ground} : Température du terrain [K]

A titre de simplification, le plancher bas du bâtiment est considéré étant sur terre plein, c'est-à-dire en contact direct avec le sol. Ainsi, le coefficient d'échange thermique avec le terrain est donné comme suit :

$$U_{ground} = \frac{\lambda_{ground}}{d_{ground}}$$

λ_{ground} : Conductivité thermique du sol, égale à 2 W/m·K pour un sol composé du sable ou du gravier (CSTB, 2006) [W/m·K]

d_{ground} : Profondeur de mesure de la température, normalement considérée à 10 m [m]

A.1.1.4. Modélisation thermique de la façade double peau vitrée

Dans les règles de calcul Th-BCE de la réglementation thermique française dans son édition 2012 (CSTB, 2010), une méthode pour la modélisation des espaces de type tampon est proposée. Les espaces tampons peuvent être définis comme des espaces intermédiaires qui jouent le rôle de transition et protection thermique. Cette classification regroupe les espaces non-chauffés, c'est-à-dire chauffés à une température inférieure à 12 °C en occupation, mais aussi ceux de type solarisé, comme les vérandas, les serres, les jardins d'hivers, les atriums, etc.

Dans ce travail, dû à ses caractéristiques thermiques, on considère qu'une façade double peau vitrée peut être assimilée comme un espace tampon de type solarisé.

Afin d'assurer sa compatibilité avec les principes de la modèle thermique dynamique du bâtiment choisi dans ce travail, la méthode « espaces tampons » a été adaptée pour sa mise en œuvre dans l'outil d'évaluation de la performance énergétique ici proposé. Ces modifications seront décrites et justifiées au long de cette section.

Suivant la méthode proposée par la réglementation thermique française, la température de l'air à l'intérieur de l'espace tampon dans un pas de temps « t » ($T_{air-cav}(t)$) peut être calculée à partir de la capacité thermique de l'espace tampon ainsi que de la somme des flux d'échanges thermiques de cet espace et de la somme des coefficients caractérisant ces flux :

$$T_{air-cav}(t) = \frac{\varphi_{cav}(t)}{H_{cav}(t)} - \left(\frac{\varphi_{cav}(t)}{H_{cav}(t)} - T_{air-cav}(t-1)\right) \cdot e^{-\left(\frac{H_{cav}(t)}{C_{cav}}\right)}$$

$\varphi_{cav}(t)$: Somme des flux d'échanges thermiques de l'espace tampon avec l'extérieur et les zones thermiques contigües du bâtiment au temps *t* [W]

$H_{cav}(t)$: Somme des coefficients d'échanges thermiques de l'espace tampon avec l'extérieur et les zones thermiques contigües du bâtiment au temps *t* [W/K]

C_{cav} : Capacitance thermique de l'espace tampon [W·h/K]

Cette équation permet d'estimer la température de l'air dans la cavité sans faisant recours à un autre bilan thermique. Ceci facilite la construction d'un module supplémentaire qui reste indépendant de la méthode de calcul précédemment définie dans ce travail mais qui peut être appelé dans le cas de présence d'une façade double peau vitrée.

La figure A.6 schématise les échanges thermiques de l'air à l'intérieur de l'espace tampon considérés dans la méthode « espaces tampons ».

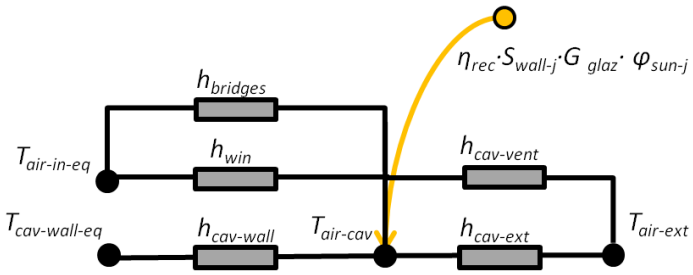

Figure A.6. Echanges thermiques du nœud représentant l'air à l'intérieur de l'espace tampon.

La méthode « espaces tampons » estime de manière simplifiée la capacité thermique de cet espace à partir d'une capacité surfacique quotidienne et de sa surface au sol, comme montrée ci-dessous :

$$C_{cav} = c_{cav} \cdot S_{cav} \cdot K_{kJ-Wh}$$

c_{cav} : Capacitance thermique quotidienne de l'espace tampon par unité de surface au sol, proposée de manière simplifiée comme égale à 200 kJ/(m^2·K) dans les règles Th-BCE 2012 [kJ/(m^2·K)]

S_{cav} : Surface au sol de l'espace tampon [m^2]

K_{kJ-Wh} : Coefficient de passage du kJ au Wh, égal à 1/3.6 W·h/kJ [W·h/kJ]

Dans la méthode « espaces tampons », la somme des coefficients d'échanges thermiques de l'espace tampon ($H_{cav}(t)$) considère d'une part l'échange conducto-convectif et par renouvellement d'air avec l'air à l'extérieur, et d'autre part la transmission thermique globale avec les zones thermiques contigües du bâtiment. Dans ce travail, ce calcul a été adapté afin d'intégrer la prise en compte du nœud de température représentant la « partie extérieure » des parois opaques de l'enveloppe. Cette adaptation est faite sous la forme de l'ajout du coefficient total d'échange thermique entre l'air de la cavité et les parois opaques de la façade contigüe ($H_{cav-wall-eq}$). Ainsi, le calcul de la somme des coefficients d'échanges thermiques de l'espace tampon ($H_{cav}(t)$) est donné comme suit :

$$H_{cav}(t) = H_{cav-ext} + H_{cav-wall-eq} + H_{cav-in-eq} + \frac{\rho_{air} \cdot Cp_{air}}{K_{s-h}} \cdot Q_{vent-cav}(t)$$

$H_{cav-ext}$: Coefficient total de transmission thermique de l'espace tampon vers l'extérieur [W/K]

$H_{cav-wall-eq}$: Coefficient total de transmission thermique par convection et rayonnement de l'espace tampon avec les parois opaques de la façade en contact avec l'espace tampon [W/K]

$H_{cav-in-eq}$: Coefficient total de transmission thermique de l'espace tampon vers les zones thermiques contigües du bâtiment [W/K]

$Q_{vent-cav}(t)$: Débit volumique total d'air entrant dans l'espace tampon au temps *t* [m^3/h]

K_{s-h} : Coefficient de passage du s au h, égal à 3600 secondes par heure [s/h]

Pour le calcul du premier terme, le coefficient total de transmission thermique de l'espace tampon vers l'extérieur ($H_{cav-ext}$), on considère la transmission par toutes les surfaces composant l'enveloppe de l'espace tampon, y compris les surfaces vitrées ainsi que le plancher bas :

$$H_{cav-ext} = S_{cav} \cdot U_{ground} + \sum_{j=1}^{N_{cav-env}} S_{glaz-j} \cdot h_{glaz-j}$$

U_{ground} : Coefficient d'échange thermique avec le terrain [W/(m^2·K)]

$N_{cav-env}$: Nombre de surfaces composant l'enveloppe de l'espace tampon, y compris les surfaces vitrées ainsi que le plancher bas [-]

S_{glaz-j} : Surface de la paroi de type *j* de l'enveloppe de l'espace tampon [m^2]

h_{glaz-j} : Coefficient d'échange thermique de la paroi de type *j* de l'enveloppe de l'espace tampon [W/(m^2.K)]

Le deuxième terme, le coefficient total de transmission de l'espace tampon avec les parois opaques de la façade ($H_{cav-wall-eq}$), est calculé comme la somme de tous les coefficients d'échange des parois opaques pondérés par leurs surfaces, comme montré ci-dessous :

$$H_{cav-wall-eq} = \sum_{i=1}^{N_{zones}} h_{cav-wall-i} \cdot S_{cav-wall-i}$$

N_{zones} : Nombre de zones thermiques dans le bâtiment [-]

$h_{cav-wall-i}$: Coefficient d'échange thermique par convection et rayonnement de l'espace tampon avec les parois opaques de la façade de la zone thermique *i* en contact avec l'espace tampon [W/(m^2.K)]

$S_{cav-wall-i}$: Surface de la paroi opaque de la façade de la zone thermique *i* en contact avec l'espace tampon [m^2]

Similairement pour le troisième terme, le coefficient total de transmission thermique de l'espace tampon vers les zones thermiques contigües ($H_{cav-in-eq}$), le calcul est fait comme la somme des coefficients individuels avec chaque zone thermique donnant sur cet espace :

$$H_{cav-int-eq} = \sum_{i=1}^{N_{zones}} H_{cav-in-i}$$

$H_{cav-in-i}$: Coefficient de transmission thermique de l'espace tampon vers la zone thermique *i* [W/K]

A leur fois, les coefficients de transmission thermique de l'espace tampon vers les zones thermiques tiennent compte des échanges avec le bâtiment à travers les baies vitrées et les ponts thermiques comme suit :

$$H_{cav-in-i} = \sum_{j=1}^{N_{win-cav-i}} S_{win-j} \cdot h_{win} + \sum_{m=1}^{N_{bridges-cav-i}} \Psi_m \cdot L_m$$

$N_{win-cav-i}$: Nombre de baies vitrées de la zone thermique *i* donnant sur le l'espace tampon [-]

$N_{bridges-cav-i}$: Nombre de types de ponts thermiques de la zone thermique *i* donnant sur l'espace tampon [-]

S_{win-j} : Surface des baies vitrées dans l'orientation de type *j* de la zone thermique [m^2]

h_{win} : Coefficient d'échange thermique global (convection, rayonnement et conduction) des baies vitrées [W/(m^2.K)]

Ψ_m : Coefficient linéique du pont thermique de type *m* de l'enveloppe de la zone thermique [W/(m.K)]

L_m : Longueur du pont thermique de type *m* de l'enveloppe de la zone thermique [m]

Le quatrième type de flux thermique considéré pour l'espace tampon est lié aux débits de renouvellement d'air venant de l'extérieur ($Q_{vent-cav}(t)$). La méthode « espaces tampons » ici considère trois sources de renouvellement d'air : les échanges d'air avec les zones thermiques, les défauts d'étanchéité et les ouvertures des parois extérieures de l'espace tampon. Dans ce travail, le bilan des échanges aérauliques a été limité aux deux dernières, puisque cela représente une pratique courante dans les façades double peau vitrées (Poirazis, 2004). Ainsi, le débit volumique total d'air entrant dans l'espace tampon ($Q_{vent-cav}(t)$) est calculé comme suit :

$$Q_{vent-cav}(t) = Q_{vent-cav-inf} + Q_{vent-cav-op}(t)$$

$Q_{vent-cav-inf}$: Débit de renouvellement d'air associé aux défauts d'étanchéité, considéré égal à 1 m^3/h par m^2 de surface au sol de l'espace tampon dans les règles Th-BCE 2012 [m^3/h]

$Q_{vent-cav-op}(t)$: Débit de renouvellement d'air par l'ouverture des parois de l'espace tampon au temps *t* [m^3/h]

Deux phénomènes sont considérés pour l'estimation du débit de renouvellement d'air par l'ouverture des parois de l'espace tampon ($Q_{vent-cav-op}(t)$) : l'action du vent et le tirage thermique. La modélisation de ces phénomènes étant en réalité d'une très grande complexité, la méthode proposée par les règles Th-BCE 2012 considère une approche simplifiée, basée sur la pondération des forces motrices de ces phénomènes par deux constantes de valeurs imposés K_{vent} et K_{th}. Ainsi, le débit de renouvellement d'air par l'ouverture des parois de l'espace tampon est calculé comme montrée ci-dessous :

$$Q_{vent-cav-op}(t) = K_{s-h} \cdot \frac{S_{op}(t)}{2} \cdot \left(K_{vent} \cdot V_{wind}(t)^2 + K_{th} \cdot H_{cav} \cdot ABS\left(T_{air-ext}(t) - T_{air-cav}(t-1)\right)\right)^{1/2}$$

$S_{op}(t)$: Surface totale d'ouverture des parois de l'espace tampon [m^2]

K_{vent} : Constante de prise en compte de la vitesse du vent dans les débits des ouvertures, imposée égale à 0.001 dans les règles Th-BCE 2012 [-]

$V_{wind}(t)$: Vitesse du vent au pas de temps *t* [m/s]

K_{th} : Constante de prise en compte des effets de tirage thermique dans les débits d'air par les ouvertures, imposée égale à 0.0035 m/(K·s^2) dans les règles Th-BCE 2012 [m/(K·s^2)]

H_{cav} : Hauteur du tirage thermique en surventilation naturelle de l'espace tampon [m]

Après avoir défini la somme de coefficients d'échanges thermiques de l'espace tampon avec l'extérieur et les zones thermiques contigües du bâtiment ($H_{cav}(t)$), l'étape suivante est donnée par la définition de la somme de ces flux thermiques ($\varphi_{cav}(t)$). Pour cela, les quatre composants des échanges thermiques déjà considérés sont complémentés par l'entrée d'un flux de chaleur par l'enveloppe de l'espace tampon dû au rayonnement solaire incident. L'expression de la somme des flux thermiques de l'espace tampon est donnée comme suit :

$$\varphi_{cav}(t) = P_{sun-cav}(t) + \left(H_{cav-ext} + \frac{\rho_{air} \cdot Cp_{air}}{K_{s-h}} \cdot Q_{vent-cav}(t)\right) \cdot T_{air-ext}(t) + H_{cav-wall-eq} \cdot T_{cav-wall-eq}(t) + H_{cav-in-eq} \cdot T_{air-in-eq}(t)$$

$P_{sun-cav}(t)$: Puissance thermique solaire entrant dans l'espace tampon au temps *t* [W]

$T_{air-ext}(t)$: Température de l'air à l'extérieur de la zone thermique au temps *t* [K]

$T_{air-in-eq}(t)$: Température moyenne équivalente de l'air à l'intérieur des zones thermiques du bâtiment vues par l'espace tampon à travers les baies vitrées et les ponts thermiques au temps *t* [K]

$T_{cav-wall-eq}(t)$: Température moyenne équivalente des parois opaques de l'enveloppe des zones thermiques du bâtiment vues par l'espace tampon au temps *t* [K]

La température équivalente de l'air à l'intérieur des zones thermiques contigües à l'espace tampon ($T_{air-in-eq}(t)$) représente une température moyenne du pas de temps précédent pondérée par le coefficient d'échange thermique associé à chaque zone :

$$T_{air-in-eq}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{zones}} H_{cav-in-i} \cdot T_{air-in-i}(t-1)}{H_{cav-in-eq}}$$

$T_{air-in-i}(t-1)$: Température de l'air à l'intérieur de la zone thermique *i* au temps *t - 1* [K]

Similairement, la température moyenne équivalente des parois opaques de l'enveloppe des zones thermiques ($T_{cav-wall-eq}(t)$) est calculée comme une température moyenne du pas de temps précédent pondérée par le coefficient d'échange thermique et la surface associés à chaque zone :

$$T_{cav-wall-eq}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{zones}} h_{cav-wall-i} \cdot S_{cav-wall-i} \cdot T_{wall-out-i}(t-1)}{H_{cav-wall-eq}}$$

$T_{wall-out-i}(t-1)$: Température de la surface extérieure de la paroi opaque de l'enveloppe de la zone thermique *i* au temps *t - 1* [K]

Enfin, la puissance thermique solaire entrante ($P_{sun-cav}(t)$) est classiquement calculée à partir des valeurs du rayonnement solaire global incident sur les parois de l'enveloppe de l'espace tampon, ainsi que des surfaces et facteurs solaires de ces parois. Pour tenir compte de la part des apports solaires transmise directement aux zones thermiques par les baies vitrées, ainsi que des défauts de transmissions et d'absorption, les règles de calcul Th-BCE 2012 propose d'introduire un rendement de récupération des apports solaires par l'espace tampon, comme montrée ci-dessous :

$$P_{sun-cav}(t) = \eta_{rec} \cdot \sum_{j=1}^{N_{cav-env}} S_{glaz-j} \cdot G_{glaz-j} \cdot \varphi_{sun-j}(t)$$

η_{rec} : Rendement de récupération des apports solaires par l'espace tampon [-]

G_{glaz-j} : Facteur solaire intégrant les parois de l'enveloppe de l'espace tampon et les protections solaires situées à l'extérieur de l'orientation *j* [-]

$\varphi_{sun-j}(t)$: Flux thermique solaire incident sur la surface d'orientation *j* [W/m^2]

Ce rendement de récupération (η_{rec}) est défini comme la part du flux thermique solaire qui reste dans l'espace tampon par rapport au flux d'entrée. Ce rendement est considéré dans les règles Th-BCE 2012 avec une valeur constante égale à 0.8. Nonobstant, une analyse plus détaillée peut être faite pour le définir en fonction des paramètres liés à la géométrie et les caractéristiques optiques des composants de l'espace tampon. Ainsi, le rendement de récupération des apports solaires par l'espace tampon est défini dans ce travail comme montré ci-dessous :

$$\eta_{rec} = 1 - \tau_{win} \cdot G_{win} \cdot G_{sp} - (1 - \tau_{win}) \cdot \alpha_{wall-out}$$

τ_{win} : Taux de vitrage de la façade du bâtiment contigüe à l'espace tampon [-]

G_{win} : Facteur solaire des baies vitrées [-]

G_{sp} : Facteur solaire des protections solaires des baies vitrées [-]

$\alpha_{wall-out}$: Coefficient d'absorptivité des parois opaque de la façade contigüe à l'espace tampon [-]

A.1.2 Modèle de gestion des protections solaires

Le facteur de correction lié à la gestion des protections solaires (f_{sp}) détermine la part du flux thermique solaire qui est transmise à travers ces composants. Ce facteur participe dans le calcul de la puissance thermique solaire entrant dans l'intérieur de chaque zone thermique, et dépend considérablement du modèle de gestion des protections solaires.

La méthode réglementaire proposée par les règles Th-BCE 2012 a été prise comme référence pour la définition du modèle de gestion des protections solaires. Dans cette méthode, le facteur de correction est calculé à partir du facteur solaire des protections solaires ainsi que de leur ratio de fermeture à un instant donné :

$$f_{sp} = 1 - R_{sp} \cdot \left(1 - G_{sp}\right)$$

R_{sp} : Ratio surfacique de fermeture des protections solaires mobiles [-]

G_{sp} : Facteur solaire des protections solaires mobiles des baies vitrées [-]

De manière générale, un ratio surfacique de fermeture égal à 0 représente des protections solaires totalement ouvertes, ainsi permettant la totalité du flux thermique d'arriver à la baie vitrée sans être perturbé, tandis qu'une valeur de 1 représente des protections solaires totalement fermées.

Pour le calcul du facteur solaire des protections solaires, les règles Th-BCE 2012 proposent deux modèles de gestion différents selon leur type : un modèle pour les protections de type « store enroulable », et un autre pour les « stores vénitiens extérieurs », aussi appelés brise-soleils orientables. Les deux modèles de gestion sont donnés en fonction de l'éclairement extérieur.

Afin de simplifier le nombre d'entrées nécessaires pour les calculs des indicateurs dans cette méthodologie, dans ce travail le flux thermique solaire surfacique est utilisé au lieu de l'éclairement extérieur à travers du concept de l'efficacité lumineuse du rayonnement solaire. L'efficacité lumineuse solaire représente le rapport entre le flux lumineux et le flux énergétique, et peut être utilisé pour passer du flux thermique surfacique à l'éclairement lumineux. Un grand nombre de modèles sont disponibles dans la littérature pour estimer cette efficacité en fonction principalement des conditions météorologiques (Vartiainen, 2000), mais à titre de simplification dans ce travail une valeur standard de 100 lux/W·m^{-2}, donné pour un temps clair au niveau de la mer, sera prise en compte (Sève, 2009).

De cette façon, les valeurs de l'éclairement extérieur données par les règles Th-BCE 2012 peuvent être facilement transformées en valeurs du flux thermique solaire surfacique. Dans cette section, le calcul du ratio de fermeture des protections solaires mobiles sera ainsi décrit en utilisant seulement les valeurs du flux thermique solaire surfacique.

Dans le cas des protections solaires de types store enroulable, le ratio de fermeture est calculé de la manière suivante :

- Si flux thermique solaire surfacique dans l'orientation de la protection solaire est égal ou supérieur à une valeur seuil φ_{lim1}, la protection solaire est considérée comme totalement fermée, c'est-à-dire que $R_{sp} = 1$.
- Si par contre le flux solaire est inférieur à la valeur seuil φ_{lim1}, le ratio de fermeture est calculé en fonction de ce premier comme suit :

$$R_{sp} = R_{sp0} + \left(1 - R_{sp0}\right) \cdot \frac{\varphi_{sun-j}}{\varphi_{lim1}}$$

R_{sp0} : Ratio surfacique de fermeture de référence des protections solaires mobiles [-]

φ_{lim1} : Seuil du flux solaire thermique surfacique pour les stores enroulables et volets [W/m^2]

Ainsi, le comportement du ratio de fermeture des protections solaires de type store enroulable en fonction du flux solaire thermique est montré dans la figure A.7.

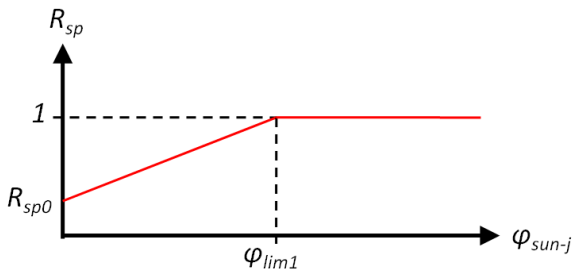

Figure A.7. Comportement du ratio surfacique fermeture des protections solaires de type store enroulable en fonction du flux thermique solaire surfacique.

Les valeurs du ratio de fermeture de référence (R_{sp0}) et du seuil du flux solaire thermique (φ_{lim1}) sont données en fonction de la saison climatique et du type de gestion des protections mobiles. Les valeurs ici considérées sont celles données par les règles Th-BCE 2012 pour une gestion manuelle non motorisée pendant la période d'occupation, et sont montrées dans le tableau A.5.

Tableau A.5. Valeurs du ratio surfacique de fermeture de référence et du seuil du flux solaire thermique surfacique pour les protections solaires de type store enroulable.

Saison climatique	Ratio surfacique de fermeture de référence R_{sp0} [-]	Seuil du flux solaire thermique surfacique φ_{lim1} [W/m^2]
Hiver	15%	600
Eté	22.5%	400

Dans le cas des protections solaires de type store vénitien extérieur, le ratio de fermeture est calculé de la manière suivante :

- Si flux thermique solaire surfacique dans l'orientation de la protection solaire est égal ou supérieur à une valeur seuil φ_{lim2}, le ratio de fermeture est égal à une limite supérieure R_{sp1}.
- Si par contre le flux solaire est inférieur à la valeur seuil φ_{lim2}, le ratio de fermeture est égal à une limite inférieure R_{sp2}.

Ainsi, le comportement du ratio de fermeture des protections solaires de type store vénitien extérieur en fonction du flux solaire thermique est montré dans la figure A.8.

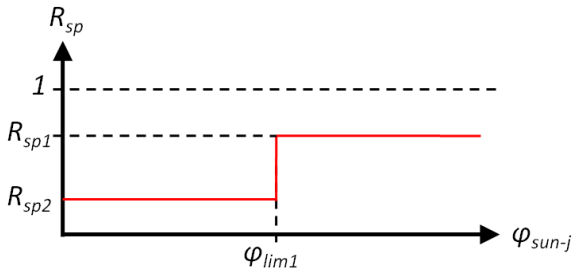

Figure A.8. Comportement du ratio surfacique fermeture des protections solaires de type store vénitien extérieur en fonction du flux thermique solaire surfacique.

La valeur seuil du flux solaire thermique surfacique pour les protections solaires de type store vénitien extérieur (φ_{lim2}) est donnée comme égal à 150 W/m^2 dans les règles Th-BCE 2012. Les ratios surfaciques de fermeture de référence pour les stores vénitiens extérieurs (R_{sp1} et R_{sp2}), dans le cas d'une gestion manuelle en période d'occupation en fonction de la saison climatique, sont montrés dans le tableau A.6.

Tableau A.6. Valeurs des limites supérieure et inférieure du ratio surfacique de fermeture de référence pour les protections solaires de type store vénitiens extérieur.

Saison climatique	Limite supérieure du ratio surfacique de fermeture R_{sp1}	Limite inférieure du ratio surfacique de fermeture R_{sp2}
Hiver	20%	60%
Eté	20%	70%

En plus de son influence sur le flux thermique solaire, la gestion des protections solaires mobiles affecte également la disponibilité de lumière du jour dans les espaces d'intérêt. Ceci est expliqué plus en détail dans la description du modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel dans la section A.5.

A.1.3. Modèle de calcul des consommations énergétiques des systèmes techniques

Après avoir estimé les besoins thermiques, les besoins en renouvellement d'air et les besoins en éclairage artificiel tout au long de l'année type, ces besoins sont traduits en consommations énergétiques dans une étape de modélisation post-calcul. Dans cette section, les modèles de calcul des consommations énergétiques associés à chaque type de ces besoins seront présentés et décrits en détail :

- Système de production de chaleur
- Système de production de froid
- Système de renouvellement d'air mécanique
- Système d'éclairage artificiel

Comme il a été mentionné précédemment, cette modélisation post-calcul est basée principalement sur la méthode de calcul réglementaire en vigueur, décrite dans les règles Th-BCE 2012 de la Réglementation Thermique française dans son édition 2012.

A.1.3.1. Système de production de chaleur

Deux types de systèmes sont actuellement disponibles pour satisfaire les besoins en production de chaleur dans les bâtiments de bureaux :

- Les systèmes basés sur la combustion.
- Les systèmes de type « pompe à chaleur ».

Dû à la différence dans la nature des types d'énergies utilisés, ces deux variétés de systèmes nécessitent des modèles de calcul spécifiques. Les deux modèles simplifiés des consommations énergétiques ici présentés sont proposés dans les règles de calcul Th-BCE 2012 (CESTB, 2010) pour décrire les performances thermiques des équipements à travers de valeurs par défaut, qui représentent des valeurs minimales indiquées dans les normes correspondantes.

Il est important de rappeler que seulement la consommation du système de production de chaleur est prise en compte dans le calcul des consommations énergétiques du système de chauffage. D'autres types de consommations, telles que les systèmes impliqués dans la distribution de chaleur ou autre types d'auxiliaires, ne sont considérés pas dans ce calcul.

En ce qui concerne les systèmes de production de chaleur par combustion, le principe du modèle est donné par le calcul d'une performance thermique moyenne du système, qui est utilisée pour traduire les besoins de chauffage du bâtiment en consommations d'énergie de manière directe.

La consommation annuelle en énergie finale du système de chauffage peut être calculée comme la somme de toutes les puissances horaires demandées au long de l'année de calcul divisée par le rendement du système de production de chaleur comme montrée ci-dessous :

$$q_{E-h} = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} P_{h-t}}{n_h}$$

q_{E-h} : Consommation annuelle en énergie finale du système de chauffage [kWh]

N_t : Nombre total de pas horaires pendant une année, égal à 8760 heures [h]

P_{h-t} : Puissance thermique du système de production de chaleur au pas horaire *t* [kW]

n_h : Rendement moyen du système de production de chaleur [-]

Dans les règles Th-BCE 2012, deux valeurs de rendement sont données, en fonction du niveau de charge du système : une valeur pour une opération à 100% de charge et une autre à 30% de charge. A titre de simplification, dans cette méthode de calcul la valeur à 100% de charge a été considérée comme le rendement du système de production de chaleur. Pour le calculer, une équation générale en fonction de la puissance nominale du système est donnée par la méthode réglementaire :

$$\eta_h = A + B \cdot log(P_{h-max})$$

A : Coefficient utilisé pour le calcul du rendement du système de production de chaleur [-]

B : Coefficient utilisé pour le calcul du rendement du système de production de chaleur [-]

P_{h-max} : Puissance nominale du système de production de chaleur [kW]

Les coefficients A et B dépendent du type de système de combustion. Dans le cadre de cette étude, seulement les chaudières au gaz et au fioul à condensation seront à considérer dans l'application de la méthodologie. Les valeurs des coefficients A et B pour ce type de système sont données dans le tableau A.7.

Tableau A.7. Coefficients utilisés pour le calcul du rendement du système de production de chaleur de type chaudière au gaz et au fioul à condensation.

Type de système de production de chaleur	***A***	***B***
Chaudières au gaz et au fioul à condensation	91	1

La puissance nominale du système de chauffage est considérée comme la valeur maximale de la puissance thermique demandée au long de l'année, c'est-à-dire :

$$P_{h-max} = MAX(P_{h-t})$$

Dans le cas des systèmes de chauffage de type pompe à chaleur, le calcul de la consommation énergétique annuelle est réalisée de manière similaire à partir du coefficient de performance, appelé COP (acronyme pour « Coefficient of performance »). Néanmoins, à différence du modèle des

systèmes de chauffage par combustion, les coefficients de performance des pompes à chaleur sont calculés à chaque pas de temps à partir des températures des sources amont et aval du système. Ceci est dû à la variabilité possiblement importante dans la température des sources, surtout dans le cas de l'air.

La figure A.9 montre une schématisation des températures et échanges thermiques qui déterminent le comportement d'une pompe à chaleur en mode chauffage.

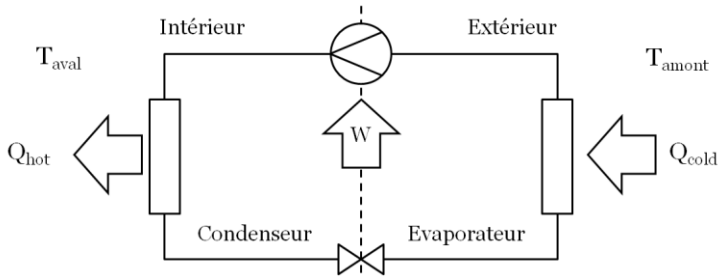

Figure A.9. Schéma d'une pompe à chaleur en mode chauffage.

Ainsi, la consommation annuelle en énergie finale du système de chauffage peut être calculée de la manière suivante :

$$q_{E-h} = \sum_{t=1}^{N_t} \frac{P_{h-t}}{COP_t}$$

COP_t : Coefficient de performance de la pompe à chaleur au pas horaire t [-]

Les coefficients des performances ou COP sont déterminés pour un couple quelconque de valeurs de températures de sources amont et aval à travers d'une interpolation linéaire des valeurs composant une matrice des performances. Ces matrices de valeurs de coefficients de performances sont déterminées à partir de la méthodologie d'essais décrite par la norme européenne EN 14511 pour un modèle spécifique de pompe à chaleur en mode chauffage et/ou climatisation. La méthode de calcul réglementaire propose un algorithme pour la construction des matrices de performances de référence à partir de valeurs par défaut selon le type de technologie en question, lesquelles peuvent être employées en absence de données certifiées.

Les matrices de performances avec les valeurs des coefficients de performance pour les trois types de pompes à chaleur de référence (air-air, air-eau et eau-eau) en mode chauffage, construites à partir de l'algorithme de la méthode de calcul réglementaire sont montrées dans les tableaux A.8, A.9 et A.10.

Tableau A.8. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-air en mode chauffage.

	Température de la source amont [°C] (air extérieur)				
Température de la source aval [°C] (air intérieur)	-15	-7	2	7	20
5	2.184	2.73	3.64	4.55	5.6875
10	2.016	2.52	3.36	4.2	5.25
15	1.848	2.31	3.08	3.85	4.8125
20	1.68	2.1	2.8	3.5	4.375
25	1.512	1.89	2.52	3.15	3.9375

Tableau A.9. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-eau en mode chauffage.

	Température de la source amont [°C] (air extérieur)				
Température de la source aval [°C] (eau)	-15	-7	2	7	20
23.5	1.848	2.31	3.08	3.85	4.8125
32.5	1.68	2.1	2.8	3.5	4.375
42.5	1.344	1.68	2.24	2.8	3.5
51	1.0752	1.344	1.792	2.24	2.8
60	0.86016	1.0752	1.4336	1.792	2.24

Tableau A.10. Matrice de performances d'une pompe à chaleur eau-eau en mode chauffage.

	Température de la source amont [°C] (eau)				
Température de la source aval [°C] (eau)	-6.5	-1.5	3.5	8.5	13.5
23.5	3.663	4.07	4.477	4.884	5.291
32.5	3.33	3.7	4.07	4.44	4.81
42.5	2.664	2.96	3.256	3.552	3.848
51	2.1312	2.368	2.6048	2.8416	3.0784
60	1.70496	1.8944	2.08384	2.27328	2.46272

Les températures des sources à considérer dépendent du type de pompe à chaleur et du type d'émetteur de chaleur utilisé, qui représente la source aval. D'une part, dans le cas des pompes à chaleur de type air-air, l'émetteur est de type ventilo-convecteur, de telle façon que la température de la source aval peut être considérée égale à la température de consigne de chauffage dans le bâtiment. D'autre part, plusieurs possibilités sont disponibles pour les émetteurs des pompes à chaleur de types air-eau et eau-eau, chacune avec une température de source aval différente : plancher chauffant, radiateurs à haute ou à basse températures, mur chauffant, etc. Conformément aux pratiques courantes dans les projets à haute efficacité énergétique, l'émetteur de type radiateur à basse température a été pris en compte dans cette modélisation comme référence de base.

Ainsi, le tableau A.11 montre les couples de températures de sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode chauffage à prendre en compte en fonction de leur type.

Tableau A.11. Températures des sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode chauffage en fonction de leur type.

Type de pompe à chaleur	Température de la source amont [°C]	Température de la source aval [°C]
Air-air	$T_{air-ext}$	T_h
Air-eau	$T_{air-ext}$	T_{rad}
Eau-eau	T_{ground}	T_{rad}

Où :

T_{rad} : Température d'un radiateur à basse température, considérée égale à 45 °C [°C]

T_h : Température de consigne de chauffage, à définir par l'utilisateur de l'outil d'évaluation [°C]

A.1.3.2. Système de production de froid

Les systèmes de type pompe à chaleur sont la solution de référence pour les systèmes de production de froid dans les bâtiments de bureaux. Le calcul de la consommation énergétique annuelle dans le cas des pompes à chaleur en mode refroidissement partage le même principe que celui décrit dans la section précédente pour le mode chauffage. La même méthode basée sur les matrices des performances est à appliquer, avec la seule différence de l'utilisation des coefficients d'efficacité frigorifique ou EER (acronyme pour « Energy efficiency ratio ») dans ces matrices.

La figure A.10 montre une schématisation des températures et échanges thermiques qui déterminent le comportement d'une pompe à chaleur en mode refroidissement.

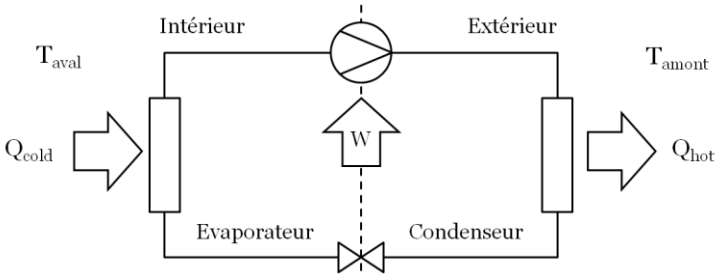

Figure A.10. Schéma d'une pompe à chaleur en mode refroidissement.

Dans le cas d'une pompe à chaleur en mode refroidissement, la consommation annuelle en énergie finale du système de climatisation est calculée à partir des valeurs horaires de la puissance demandée et du coefficient d'efficacité énergétique comme suit :

$$q_{E-ac} = \sum_{t=1}^{N_t} \frac{P_{ac-t}}{EER_t}$$

q_{E-ac} : Consommation annuelle en énergie finale du système de climatisation [kWh]

P_{ac-t} : Puissance thermique du système de production de froid du pas horaire *t* [kW]

EER_t : Coefficient d'efficacité énergétique de la pompe à chaleur du pas horaire *t* [-]

Les matrices de performances avec les valeurs des coefficients d'efficacité énergétique pour les trois types de pompes à chaleur de référence en mode refroidissement, construites à partir de l'algorithme de la méthode de calcul réglementaire, sont montrées dans les tableaux A.12, A.13 et A.14.

Tableau A.12. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-air en mode refroidissement.

	Température de la source amont [°C] (air extérieur)			
Température de la source aval [°C] (air intérieur)	22	27	32	37
5	2.03175	1.89	1.701	1.512
15	2.322	2.16	1.944	1.728
25	2.61225	2.43	2.187	1.944
35	2.9025	2.7	2.43	2.16
45	3.483	3.24	2.916	2.592

Tableau A.13. Matrice de performances d'une pompe à chaleur air-eau en mode refroidissement.

	Température de la source amont [°C] (air extérieur)				
Température de la source aval [°C] (eau)	5	15	25	35	45
4	3.6	3.15	2.7	2.25	1.8
9.5	4	3.5	3	2.5	2
15	4.3	3.7625	3.225	2.6875	2.15
20.5	4.6	4.025	3.45	2.875	2.3
26	4.9	4.2875	3.675	3.0625	2.45

Tableau A.14. Matrice de performances d'une pompe à chaleur eau-eau en mode refroidissement.

	Température de la source amont [°C] (eau)				
Température de la source aval [°C] (eau)	2.5	12.5	22.5	32.5	42.5
4	5.328	4.662	3.996	3.33	2.664
9.5	5.92	5.18	4.44	3.7	2.96
15	6.364	5.5685	4.773	3.9775	3.182
20.5	6.808	5.957	5.106	4.255	3.404
26	7.252	6.3455	5.439	4.5325	3.626

Les températures des sources à considérer dépendent également du type de pompe à chaleur et du type d'émetteur de froid utilisé, toujours représenté par la source aval. Dû à la nature extensive des émetteurs de froid disponibles pour les pompes à chaleur air-eau et eau-eau, les températures de la source aval pour ces deux types de système peuvent être considérées égales à la température de consigne de climatisation dans le bâtiment.

Le tableau A.15 montre les couples de températures de sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode refroidissement à prendre en compte en fonction de leur type.

Tableau A.15. Températures des sources amont et aval des systèmes de pompes à chaleur en mode refroidissement en fonction de leur type.

Type de pompe à chaleur	Température de la source amont [°C]	Température de la source aval [°C]
Air-air	T_{ground}	T_{ac}
Air-eau	$T_{air-ext}$	T_{ac}
Eau-eau	$T_{air-ext}$	T_{ac}

A.1.3.3. Système de renouvellement d'air mécanique

La consommation électrique liée au fonctionnement du système de ventilation mécanique pour le renouvellement d'air du bâtiment (q_{E-vent}) peut être exprimée de manière simplifiée comme le débit total d'air à renouveler ($Q_{vent-in-t}$) multiplié par un facteur de puissance électrique caractérisant le système de ventilation (p_{vent-t}). Cette relation est donnée comme suit :

$$q_{E-vent} = \sum_{t=1}^{N_t} p_{vent-t} \cdot Q_{vent-in-t}$$

q_{E-vent} : Consommation électrique annuelle du système de ventilation [kWh]

p_{vent-t} : Facteur de puissance électrique du système de ventilation par unité de volume d'air et par heure du pas horaire *t* [W/(m^3·h)]

$Q_{vent-in-t}$: Débit total de renouvellement d'air mécanique du bâtiment du pas horaire *t* [m^3/s]

Le facteur de puissance électrique du système de ventilation mécanique par unité de volume d'air et par heure dépend du rendement des ventilateurs de l'installation. En raison de l'absence de données techniques spécifiques dans les premières phases de conception d'un bâtiment, des valeurs de référence peuvent être prises en compte.

L'arrêté du 13 juin 2008 dans son article 29 propose une puissance de référence des ventilateurs de soufflage et des ventilateurs d'extraction égale à 0.30 W/(m^3·h) par ventilateur (JORF, 2012). Cette valeur est ainsi valable pour une installation de type simple flux. Dans le cas d'une ventilation double

flux avec récupération de chaleur à partir de l'air vicié rejeté, cette valeur de puissance est doublée à cause de la présence de deux types de ventilateurs dans ce type d'installation : un pour le soufflage et un autre pour l'extraction.

Le tableau A.16 montre ainsi les facteurs de puissance électrique à considérer selon le type de système de ventilation.

Tableau A.16. Facteur de puissance électrique du système de ventilation par unité de volume d'air et par heure selon le type de système de ventilation.

Type de système de ventilation	Facteur de puissance électrique des ventilateurs [W/(m^3·h)]
Simple flux	0.3
Double flux	0.6

Le débit de renouvellement d'air du bâtiment dépend des scénarios de ventilation définis par l'utilisateur de l'outil d'évaluation. De manière pratique, quatre valeurs de débit de renouvellement d'air sont à considérer pour la ventilation mécanique des espaces :

- Débit d'air en hiver en occupation : Généralement une valeur de renouvellement d'air de base.
- Débit d'air en hiver en non occupation (nuit, weekend) : A minimiser pour réduire les pertes thermiques.
- Débit d'air en été en occupation : Associé à la mise en œuvre du « freecooling » pour réduire les besoins en climatisation.
- Débit d'air en été en non occupation : Associé à la mise en œuvre de la surventilation nocturne.

A.1.3.4. Système d'éclairage artificiel

La consommation électrique annuelle du poste d'éclairage artificiel d'une zone thermique est calculée à partir de la puissance thermique dissipée par les équipements d'éclairage et la surface de l'espace comme suit :

$$q_{E-light} = \sum_{t=1}^{N_t} p_{light-t} \cdot S_{space}$$

$q_{E-light}$: Consommation électrique annuelle du système d'éclairage artificiel [kW]

$p_{light-t}$: Puissance thermique dissipée par les équipements d'éclairage par unité de surface de la zone thermique dans le pas horaire t [W/m^2]

S_{space} : Surface de la zone thermique [m^2]

La puissance thermique dissipée par les équipements d'éclairage ($p_{light-t}$) dépend de deux facteurs différents :

- Le scénario d'éclairage artificiel des zones thermiques, détaillé dans la section A.1.4.
- La satisfaction des besoins d'éclairement grâce à la disponibilité de lumière du jour dans l'espace.

Si l'éclairement disponible dans un espace est supérieur à la valeur minimale requise pendant un pas horaire quelconque, cet espace est considéré comme autonome en éclairage naturel. Ainsi, sa consommation électrique due à l'opération des équipements d'éclairage artificiel est considérée comme nulle, c'est-à-dire que pour ce pas horaire :

$$p_{light-t} = 0$$

Plus d'information sur les conditions d'autonomie en éclairage naturel est donnée dans le modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel (section A.5).

A.1.4. Scénarios d'occupation et de charges thermiques internes

En plus des conditions de confort des usagers, les quatre espaces composant le bâtiment type dans cette méthode de calcul sont différenciés par leurs scénarios de charges thermiques. Trois types de charges internes sont considérés dans la modélisation thermique dynamique :

- L'occupation des usagers.
- L'éclairage artificiel.
- Les équipements de bureaux.

La méthode réglementaire, ici considérée comme référence pour la définition des scénarios, part de l'hypothèse que seulement les espaces dédiés aux bureaux et aux salles de réunion sont associés à une occupation de type constante. Par contre, les circulations et autres espaces sont considérés comme d'occupation ponctuelle, c'est-à-dire assez imprévisible pour l'assignation de scénarios (CSTB, 2010). Ceci se traduit par l'absence d'une définition de scénarios pour les espaces à occupation ponctuelle, sauf dans le cas de l'éclairage artificiel des circulations.

Les tableaux des scénarios ici présentés montrent la répartition des charges thermiques internes par temps horaire pour une journée de base pendant la semaine, de lundi à vendredi. Le bâtiment est considéré sans occupation pendant le weekend, c'est-à-dire avec des charges thermiques internes nulles pendant cette période. Ces scénarios sont valables tout au long de l'année, sans interruptions pour des périodes de vacances ou autres.

Les tableaux A.17 et A.18 montrent les scénarios de densité d'occupation pour les bureaux et pour les salles de réunion pendant la semaine. La chaleur moyenne dégagée par occupant est considérée comme 90 W.

Tableau A.17. Scénario de densité d'occupation des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densité d'occupation [occupants/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0.057	0.057	0.1	0.1

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	0.057	0.057	0.1	0.1	0.1	0 .057	0	0	0	0	0	0

Tableau A.18. Scénario de densité d'occupation des espaces de salles de réunion pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densité d'occupation [occupants/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.105	0.21	0.21

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	0.105	0.105	0.105	0.21	0.21	0	0	0	0	0	0	0

Les tableaux A.19, A.20 et A.21 montrent les scénarios de charges thermiques dues à l'éclairage artificiel pour les bureaux, pour les salles de réunion et pour les circulations pendant la semaine.

Tableau A.19. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Puissance thermique par unité de surface [W/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	2.85	5	5	5

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	2.85	2.85	5	5	5	2.85	0	0	0	0	0	0

Tableau A.20. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des salles de réunion pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Puissance thermique par unité de surface [W/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	2.5	2.5

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	1.25	1.25	2.5	2.5	2.5	0	0	0	0	0	0	0

Tableau A.21. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des circulations pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Puissance thermique par unité de surface [W/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	1.14	2	2	2

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	1.14	1.14	2	2	2	1.14	0	0	0	0	0	0

Le tableau A.22 montre le scénario de charges thermiques dues aux équipements de bureaux pour les espaces de bureaux pendant la semaine.

Tableau A.22. Scénario de puissances thermiques dégagées par unité de surface dues à l'éclairage artificiel des espaces de bureaux pour une journée pendant la semaine.

Heure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Puissance thermique par unité de surface [W/m^2]	0	0	0	0	0	0	0	0	9.12	16	16	16

Heure	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Densité d'occupation [occupants/m^2]	9.12	9.12	16	16	16	9.12	0	0	0	0	0	0

A.1.5. Correction du rayonnement solaire selon l'orientation du bâtiment

Comme présenté dans la section 3.3.2 de ce travail, la base de données météorologiques de l'outil numérique d'évaluation contient les valeurs horaires du rayonnement global reçu par les surfaces verticales orientées vers les quatre points cardinaux (nord, sud, est, ouest) pour une sélection de villes en France.

Ces valeurs du rayonnement solaire peuvent être utilisées directement par l'outil d'évaluation si le bâtiment conçu est orienté vers une de ces quatre directions. Dans le cas où un angle d'orientation du bâtiment (α) différent est choisi par le concepteur comme montré dans la figure A.11, ces valeurs doivent être corrigés.

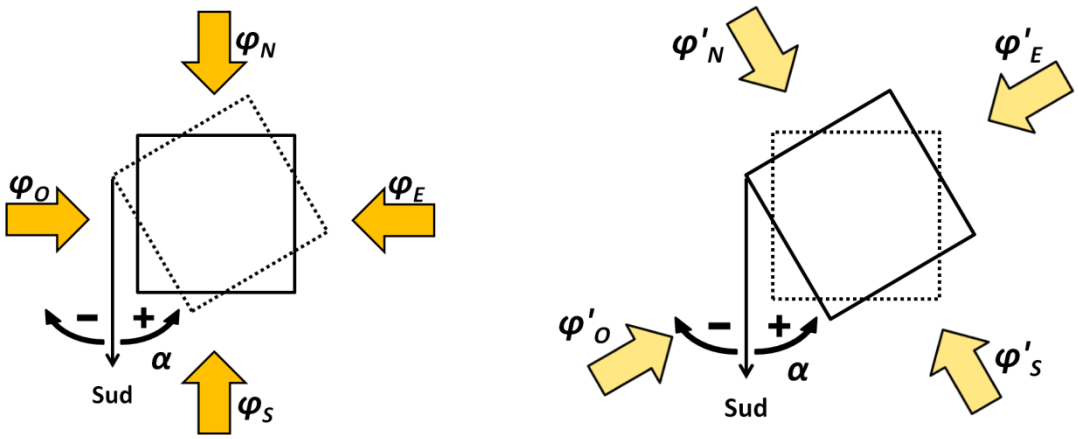

Figure A.11. Correction des valeurs de rayonnement solaire due à une variation de l'angle d'orientation du bâtiment.

Pour des valeurs d'angle d'orientation positifs ($\alpha \geq 0°$), le calcul des rayonnements solaires pour les nouvelles directions des façades du bâtiment est donné comme montré ci-dessous :

$$\varphi'_S = \varphi_S \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_E \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\varphi'_E = \varphi_E \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_N \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\varphi'_N = \varphi_N \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_O \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\varphi'_O = \varphi_O \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_S \cdot \sin^2 \alpha$$

Pour des valeurs d'angle d'orientation négatifs ($\alpha < 0°$), le calcul des rayonnements solaires pour les nouvelles directions des façades du bâtiment est donné comme montré ci-dessous :

$$\varphi'_S = \varphi_S \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_O \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\varphi'_E = \varphi_E \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_S \cdot \sin^2 \theta\alpha$$

$$\varphi'_N = \varphi_N \cdot \cos^2 \alpha + \varphi_E \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\varphi'_O = \varphi_O \cdot cos^2 \alpha + \varphi_N \cdot sin^2 \alpha$$

α : Angle d'orientation du bâtiment par rapport au sud [°]

φ_S : Rayonnement solaire global sur une surface verticale orientée vers le sud [W/m^2]

φ_E : Rayonnement solaire global sur une surface verticale orientée vers l'est [W/m^2]

φ_N : Rayonnement solaire global sur une surface verticale orientée vers le nord [W/m^2]

φ_O : Rayonnement solaire global sur une surface verticale orientée vers l'ouest [W/m^2]

φ'_S : Rayonnement solaire global sur une surface vertical orientée vers le sud après un changement d'orientation du bâtiment [W/m^2]

φ'_E : Rayonnement solaire global sur une surface vertical orientée vers l'est après un changement d'orientation du bâtiment [W/m^2]

φ'_N : Rayonnement solaire global sur une surface vertical orientée vers le nord après un changement d'orientation du bâtiment [W/m^2]

φ'_O : Rayonnement solaire global sur une surface vertical orientée vers l'ouest après un changement d'orientation du bâtiment [W/m^2]

Ces expressions sont valides pour l'intervalle compris entre $-90° < \propto \leq 90°$.

A.1.6. Démarche de résolution numérique du modèle thermique

Après avoir défini les équations différentielles décrivant le modèle thermique dynamique du bâtiment par zone thermique, l'étape suivante est de les ressembler pour construire le système d'équations à résoudre. Comme mentionné lors de la présentation du, l'objectif de la simulation est l'estimation des besoins thermiques et des températures des zones thermiques, qui sont seront les données d'entrée des modèles de calcul des indicateurs de performance énergétique dans une étape de post-calcul.

La démarche à suivre pour le calcul des besoins thermiques et températures des zones thermiques pour chaque pas de la simulation est donnée comme suit :

1. Calcul des températures des zones thermiques par la résolution du système d'équations différentielles résultant des bilans thermiques aux trois nœuds de chaque zone thermique sans la prise en compte des puissances thermiques des systèmes de traitement d'ambiance (P_{syst}).
2. Comparaison des températures de l'air à l'intérieur des zones thermiques avec les consignes de température de chauffage et de climatisation. En cas d'obtenir une valeur de température de l'air hors les consignes, la puissance thermique des systèmes techniques nécessaire pour la corriger est calculée et enregistrée pour l'étape de post-calcul.
3. Les puissances thermiques des systèmes de traitement d'ambiance sont ajoutées aux bilans thermiques des zones thermiques et les valeurs des températures des nœuds pour ce pas de la simulation sont recalculées.
4. Avancer au pas suivant de la simulation et répéter la démarche.

Le système d'équations différentielles à résoudre est donné par les bilans thermiques aux trois nœuds de chaque zone thermique. De manière générale, les trois bilans thermiques pour une zone thermique *i* peuvent s'écrire comme suit :

- Bilan thermique sur le nœud représentant l'air à l'intérieur de la zone thermique *i*

$$k_{mob} \cdot \rho_{air} \cdot Cp_{air} \cdot V_{space-i} \cdot \frac{dT_{air-in-i}}{dt} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-i}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-in-j}\right) \cdot (T_{air-in-i} - T_{wall-in-i}) - \left(\sum_{j=1}^{N_{orient-i}} S_{win-j} \cdot h_{win} + \sum_{m=1}^{N_{bridges-i}} \Psi_m \cdot L_m + \rho_{air} \cdot Cp_{air} \cdot \left(Q_{vent-in} \cdot f_{hr} + Q_{inf-in}\right)\right) \cdot (T_{air-in-i} - T_{air-ext}) + f_{rep} \cdot (f_{ret} \cdot P_{sun-in-i} + P_{loads-i})$$

- Bilan thermique sur le nœud représentant la surface intérieure des parois opaques de la zone thermique *i*

$$\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-i}} S_{wall-j} \cdot C_{wall-in-j}\right) \cdot \frac{dT_{wall-in-i}}{dt} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-i}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-in-j}\right) \cdot (T_{wall-in-i} - T_{air-in-i}) - \sum_{j=1}^{N_{wall-env-i}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-j} \cdot \left(T_{wall-in-i} - T_{wall-out-j}\right) - \sum_{j=1}^{N_{wall-int-i}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-j} \cdot (T_{wall-in-i} - T_{wall-in-other-i}) + \left(1 - f_{rep}\right) \cdot f_{ret} \cdot P_{sun-in-i} + (1 - f_1) \cdot P_{loads-i}$$

- Bilan thermique sur le nœud représentant la surface extérieure des parois opaques composant l'enveloppe de la zone thermique *i*

$$\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env-i}} C_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j}\right) \cdot \frac{dT_{wall-out-i}}{dt} = -\left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env-i}} S_{wall-j} \cdot U_{wall-j} \cdot\right)(T_{wall-out-i} - T_{wall-in-i}) - \left(\sum_{j=1}^{N_{wall-env-i}} S_{wall-j} \cdot h_{wall-out-j}\right) \cdot (T_{wall-out-i} - T_{air-ext}) + \sum_{j=1}^{N_{orient-i}} \alpha_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j} \cdot \varphi_{sun-j} - S_{wall-ground-i} \cdot U_{ground} \cdot \left(T_{wall-out-i} - T_{ground}\right)$$

Avec N zones thermiques on obtient un système d'équations composé par 3N bilans thermiques, ainsi que 3N températures de nœuds inconnues. En suivant une approche matricielle, on peut écrire le système d'équations en agroupant les coefficients des variables dans les matrices A et B comme montré ci-dessous :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} T_{air-in-1} \\ T_{wall-in-1} \\ T_{wall-out-1} \\ \vdots \\ T_{air-in-N} \\ T_{wall-in-N} \\ T_{wall-out-N} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} T_{air-in-1} \\ T_{wall-in-1} \\ T_{wall-out-1} \\ \vdots \\ T_{air-in-N} \\ T_{wall-in-N} \\ T_{wall-out-N} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} f_{rep} \cdot (f_{ret} \cdot P_{sun-in-1} + P_{loads-1}) \\ (1 - f_{rep}) \cdot (f_{ret} \cdot P_{sun-in-1} + P_{loads-1}) \\ \sum_{j=1}^{N_{orient-1}} \alpha_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j} \cdot \varphi_{sun-j} \\ \vdots \\ f_{rep} \cdot (f_{ret} \cdot P_{sun-in-N} + P_{loads-N}) \\ (1 - f_{rep}) \cdot (f_{ret} \cdot P_{sun-in-N} + P_{loads-N}) \\ \sum_{j=1}^{N_{orient-N}} \alpha_{wall-out-j} \cdot S_{wall-j} \cdot \varphi_{sun-j} \\ T_{air-ext} \\ T_{ground} \end{bmatrix}$$

Le système d'équations prend ainsi la forme simplifiée suivante, comprenant un vecteur des températures aux nœuds (T) et un vecteur des sollicitations thermiques venant de l'extérieur du système (U) :

$$\frac{d}{dt}T = A \cdot T + B \cdot U$$

T : Vecteur de températures des nœuds, de dimension [3N] [K]

U : Vecteur de sollicitations thermiques, de dimension [3N+2] [W]

Plusieurs schémas de résolution sont disponibles pour traiter un tel système d'équations différentielles : schémas explicite, implicite et centré. Dans ce travail, un schéma de résolution centré ou de Crank-Nicholson a été retenu, dû à sa stabilité de calcul et haute précision. En outre, un pas de temps horaire a été utilisé, vu de sa pertinence au niveau de finesse de simulation et temps de calcul réduit.

Ainsi, en discrétisant l'expression précédente suivant un schéma centré ou de Crank-Nicholson et en arrangeant les termes, on obtient :

$$\frac{T(t) - T(t - dt)}{dt} = A \cdot \frac{T(t) + T(t - dt)}{2} + B \cdot U$$

$$T(t) - T(t - dt) = A \cdot \frac{T(t) + T(t - dt)}{2} \cdot dt + B \cdot U \cdot dt$$

$$T(t) \cdot \left(1 - \frac{A \cdot dt}{2}\right) = \left(1 + \frac{A \cdot dt}{2}\right) \cdot T(t - dt) + B \cdot U \cdot dt$$

$$T(t) = \left(1 - \frac{A \cdot dt}{2}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{A \cdot dt}{2}\right) \cdot T(t - dt) + \left(1 - \frac{A \cdot dt}{2}\right)^{-1} \cdot B \cdot U \cdot dt$$

Afin de simplifier la notation, on peut agrouper les valeurs des paramètres constants dans l'équation précédente comme montrée ci-dessous :

$$\alpha = \left(1 - \frac{A \cdot dt}{2}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{A \cdot dt}{2}\right)$$

$$\beta = \left(1 - \frac{A \cdot dt}{2}\right)^{-1} \cdot B \cdot dt$$

De cette façon, l'ensemble de températures aux nœuds pour un pas de temps *t* donné est calculé à partir des valeurs dans le pas précédent (*t* - *dt*) et des sollicitations thermiques comme montré ci-dessous :

$$T(t) = \alpha \cdot T(t - dt) + \beta \cdot U$$

A.2. Modèle de calcul des indicateurs environnementaux

Comme présenté dans la section 2.2.2, l'aspect environnemental de la performance énergétique du bâtiment est caractérisé dans ce travail par neufs indicateurs environnementaux. Pour faciliter leur traitement et la notation à utiliser, ces indicateurs sont organisés sous la forme d'un vecteur d'impacts sur l'environnement ($\vec{I_B}$) comme montré ci-dessous :

$$\vec{I}_B = \begin{bmatrix} EPNR \\ FWC \\ GWP \\ AP \\ POCP \\ ODP \\ WH \\ WNH \\ WRA \end{bmatrix}$$

$\vec{\iota}_B$: Vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux totaux du bâtiment sur l'ensemble de la période de référence du cycle de vie du bâtiment [(unités)/m^2.années]

$EPNR$: Utilisation d'énergie primaire non renouvelable [kWh$_{EP}$/(m$^2_{plancher}$·année)]

FWC: Consommation d'eau [L/(m$^2_{plancher}$·année)]

GWP: Potentiel de réchauffement climatique [kg CO_2-eq./(m$^2_{plancher}$·année)]

AP: Potentiel d'acidification du sol et de l'eau [kg SO_2-eq./(m$^2_{plancher}$·année)

$POCP$: Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique [kg C_2H_4-eq./(m$^2_{plancher}$·année)]

ODP: Destruction de la couche d'ozone stratosphérique [kg CFC 11-eq./(m$^2_{plancher}$·année)]

WH: Déchets dangereux éliminés [kg/(m$^2_{plancher}$·année)]

WNH: Déchets non dangereux éliminés [kg/(m$^2_{plancher}$·année)]

WRA : Déchets radioactifs éliminés [kg/(m$^2_{plancher}$·année)]

Le vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux totaux du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie ($\vec{I}_B$) intègre d'une part les impacts dus aux produits de construction ($\vec{I}_P$) et d'autre part les impacts dus aux consommations d'énergie ($\vec{I}_E$). Afin de permettre la comparaison entre différentes alternatives de conception, ce vecteur est normalisé en fonction de la surface habitable de plancher de la construction et de la période de référence du cycle de vie du bâtiment comme montré ci-dessous :

$$\vec{I}_B = \frac{\vec{I}_P + \vec{I}_E}{S_B \cdot BSL}$$

$\vec{I}_P$: Vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux du bâtiment liés aux produits de construction

$\vec{I}_E$: Vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux du bâtiment liés aux consommations d'énergie

S_B : Surface de plancher de la construction [m^2]

BSL : Période de référence du cycle de vie du bâtiment, considéré dans ce travail égale à 50 ans.

D'une part, le calcul des impacts environnementaux du bâtiment liés aux produits de construction ($\vec{I}_P$) est séparé en deux parties : la construction du bâtiment ($\vec{I}_C$) et le remplacement de composants durant la période de calcul ($\vec{I}_R$). Ce calcul est donné comme suit :

$$\vec{I}_P = \vec{I}_C + \vec{I}_R$$

$\vec{I}_C$: Vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux du bâtiment liés à l'utilisation de produits lors de la construction du bâtiment

$\vec{I}_R$: Vecteur de valeurs d'indicateurs d'impacts environnementaux du bâtiment liés au remplacement des produits de construction durant la période de référence de calcul

Les impacts environnementaux liés à l'utilisation de produits de construction lors de la construction du bâtiment ($\vec{I}_C$) sont calculés comme la somme des quantités des différents produits utilisés dans la construction ($Q_{P,C-i}$) multipliées par leurs respectifs profils environnementaux ($\vec{I}_{P-i}$) :

$$\vec{I}_C = \sum_{i=1}^{N_P} Q_{P,C-i} \cdot \vec{I}_{P-i}$$

$Q_{P,C-i}$: Quantité totale du produit de construction *i* mis en œuvre dans l'ensemble du bâtiment lors de sa construction [UF]

$\vec{I}_{P-i}$: Profil environnemental lié à la production d'une unité fonctionnelle du produit de construction *i* [1/UF]

N_P : Nombre des types de produits de construction [-]

La définition de l'unité fonctionnelle (UF), c'est-à-dire l'unité de référence à utiliser pour chiffrer la quantité d'un élément, dépend du type de produit de construction. Le tableau A.23 montre le type d'unité fonctionnelle associé à chaque type de composant des éléments du bâtiment.

Tableau A.23. Décomposition des éléments du bâtiment en produits de construction et leurs unités fonctionnelles.

Type d'élément du bâtiment	Type de produit de construction	Unité fonctionnelle
Fenêtres	Vitrage	m^2 de surface vitrée de façade
	Menuiserie	m^2 de surface vitrée de façade
Murs de l'enveloppe	Matériau structurel	m^2 de surface opaque de façade
	Isolation thermique	m^2 de surface opaque de façade
Toit	Matériau structurel	m^2 de toiture
	Isolation thermique	m^2 de toiture
Plancher bas	Matériau structurel	m^2 de plancher bas
	Isolation thermique	m^2 de plancher bas
Planchers intermédiaires	Matériau structurel	m^2 de plancher intermédiaire
Cloisons	Matériau structurel	m^2 de cloisons
Protections solaires	Protection solaire	m^2 de surface vitrée de façade
Système de production de chaleur	Système de production de chaleur	kW de puissance installée du système de chauffage
Système de production de froid	Système de production de froid	kW de puissance installée du système de refroidissement
Façade double peau vitrée	Vitrage	m^2 de surface de façade vitrée
	Cadres support	m^2 de surface de façade vitrée

Les impacts environnementaux du bâtiment liés au remplacement des produits de construction ($\vec{I}_R$) sont calculés comme la somme des quantités de produits mis en œuvre dans le bâtiment tout au long de la période de calcul ($Q_{P,R-i}$) pondérées par leurs respectifs profils environnementaux ($\vec{I}_{P-i}$) comme montré ci-dessous :

$$\vec{I}_R = \sum_{i=1}^{N_{PR}} Q_{P,R-i} \cdot \vec{I}_{P-i}$$

$Q_{C,R-i}$: Quantité totale du produit de construction *i* mis en œuvre dans l'ensemble du bâtiment tout au long de la période de calcul dû au remplacement de composants [UF]

La quantité de produits mis en œuvre tout au long de la période de calcul est obtenue à partir du taux de remplacement des composants comme suit :

$$Q_{P,R-i} = Q_{P,C-i} \cdot \tau_{P-i}$$

τ_{P-i} : Taux de remplacement du produit de construction *i* tout au long de la période de calcul [-]

Le taux de remplacement des produits de construction est estimé à partir de sa durée de vie et de la période de référence du cycle de vie du bâtiment comme montré ci-dessous :

$$\tau_{P-i} = CEILING\left(\frac{BSL}{PSL_i}\right) - 1$$

PSL_i : Durée de vie estimée du produit de construction *i* [années]

$CEILING(-)$: Fonction qui arrondit un nombre à l'entier immédiatement supérieur

D'autre part, les impacts environnementaux du bâtiment liés aux consommations d'énergie ($\vec{I}_E$) sont calculés comme la somme des consommations énergétiques des systèmes techniques ($Q_{E,EF-i}$) multipliées par leurs profils environnementaux ($\vec{I}_{EF-i}$). Les postes énergétiques considérés sont le chauffage, la climatisation, la ventilation et l'éclairage artificiel des espaces intérieurs. Ainsi, le calcul des impacts environnementaux liés aux consommations d'énergie est donné comme suit :

$$\vec{I}_E = \sum_{i=1}^{N_E} Q_{E-i} \cdot \vec{I}_{E-i}$$

$$Q_{E-i} = q_{E-i} \cdot BSL$$

Q_{E-i} : Consommation de l'énergie finale *i* liée aux systèmes techniques tout au long du cycle de vie du bâtiment [kWh]

$\vec{I}_{E-i}$: Profil environnemental lié à la production et distribution de l'énergie finale *i* [1/kWh]

N_E : Nombre des types d'énergies finales [-]

q_{E-i} : Consommation annuelle de l'énergie finale *i* liée aux systèmes techniques [kWh/an]

Les types d'énergie finale considérés dépendent du type de poste énergétique et son montrées dans le tableau A.24.

Tableau A.24. Types d'énergie finale considérés selon le poste énergétique.

Postes énergétique	Type d'énergie finale
Chauffage	Electricité, gaz naturel, fioul
Climatisation	Electricité
Ventilation	Electricité
Eclairage artificiel	Electricité

Les calculs des consommations annuelles des postes de chauffage (q_{E-h}) et de climatisation (q_{E-ac}) sont faits en considérant les besoins thermiques estimées par le modèle thermique et les efficacités des systèmes sélectionnés, comme décrit dans les sections A.1.3.1 et A.1.3.2.

Le calcul de la consommation annuelle du poste de ventilation (q_{E-vent}) est fait en considérant les débits de renouvellement d'air en occupation et en non-occupation et leurs périodes d'opération, ainsi que le rendement du système du système de ventilation selon son type (simple ou double flux), comme décrit dans la section A.1.3.3.

Le calcul de la consommation annuelle du poste d'éclairage artificiel ($q_{E-light}$) est fait en considérant la disponibilité d'éclairement naturel par type de zone thermique et une valeur de référence de consommation électrique par quantité de surface éclairée, comme décrit dans la section A.1.3.4.

A.3. Modèle de calcul des indicateurs économiques

Comme présenté dans la section 2.2.3, les trois indicateurs sélectionnés pour l'évaluation de la performance économique du bâtiment sont :

- Le coût global du bâtiment (LCC)
- Le coût de construction de l'ouvrage (C_C).
- Le coût d'exploitation au long de la période de référence du cycle de vie (C_U).

Le coût global du bâtiment par unité de surface de plancher (LCC) est calculé comme la somme du coût de construction de l'ouvrage (C_C) et du coût d'exploitation au long de la période de référence du cycle de vie (C_U) comme montré ci-dessous :

$$LCC = C_C + C_U$$

LCC : Coût global du bâtiment par unité de surface de plancher de la construction [€/m^2]

C_C : Coût de construction du bâtiment par unité de surface de plancher de la construction [€/m^2]

C_U : Coût d'exploitation du bâtiment tout au long de la période de référence du cycle de vie du bâtiment par surface de plancher de la construction [€/m^2]

D'une part, le calcul du coût d'exploitation du bâtiment (C_C) considère les dépenses associées au remplacement de composants (C_R) et celles dues aux consommations énergétiques tout au long de la période de référence de calcul (C_E) :

$$C_U = C_R + C_E$$

C_R : Coût associé au remplacement de composants du bâtiment par unité de surface de plancher de la construction [€/m^2]

C_E : Coût des consommations énergétiques du bâtiment par unité de surface de plancher de la construction [€/m^2]

Le coût de construction (C_C), c'est-à-dire l'investissement initial avant l'utilisation du bâtiment, est calculé comme la somme de tous les dépenses dues aux produits utilisés pour la construction du bâtiment. Afin de faciliter la comparaison entre différentes alternatives de conception, le calcul du coût de construction inclut une normalisation en fonction de la surface habitable de plancher. Ainsi, le coût de construction de l'ouvrage est donné comme suit :

$$C_C = \frac{\sum_{i=1}^{N_{PR}} Q_{P,C-i} \cdot c_{P-i}}{S_B}$$

$Q_{P,C-i}$: Quantité totale du produit de construction *i* mis en œuvre dans l'ensemble du bâtiment lors de sa construction [UF]

N_{PR} : Nombre des types de produits de construction utilisés dans le bâtiment [-]

c_{P-i} : Coût du produit de construction *i* [€/UF]

S_B : Surface de plancher de la construction [m^2]

La liste de types de composants des éléments du bâtiment ainsi que leur unité fonctionnelle (UF) est indiquée dans le tableau A.23.

Le coût associé au remplacement de composants (C_R) représente la somme de toutes les dépenses dues au remplacement des produits de construction durant la période de référence d'étude. Son calcul est donné comme la somme des toutes les dépenses à réaliser chaque année actualisées aux prix actuels à travers un taux réel d'actualisation :

$$C_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_{PR}} \sum_{k=1}^{\tau_{P-i}} \frac{q_{P,C-i} \cdot c_{P-i}}{(1+a)^{k \cdot PSL_i}}}{S_B}$$

BSL : Période de référence du cycle de vie du bâtiment [années]

a : Taux réel d'actualisation [-]

t : Nombre d'années écoulées à partir de la mise en opération du bâtiment [années]

τ_{P-i} : Taux de remplacement du produit de construction *i* tout au long de la période de référence d'étude [-]

PSL_i : Durée de vie estimée du produit de construction *i* [années]

La norme ISO 15686-5 décrit le taux réel d'actualisation (a) comme un « facteur ou taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, sans tenir compte du taux d'inflation générale ou spécifique dans le coût d'un bien particulier », c'est-à-dire un taux différentiel qui prend déjà en compte l'inflation. La norme suggère d'appliquer un taux réel d'actualisation compris entre 0 et 4%.

Enfin, le coût des consommations énergétiques (C_E) est calculé comme la somme de toutes les dépenses dues aux besoins d'énergie des postes considérés durant la période de référence de calcul, actualisées aux prix actuels à travers le taux réel d'actualisation :

$$C_E = \frac{\sum_{t=1}^{BSL} \frac{\sum_{i=1}^{N_{EF}} q_{E,EF-i} \cdot c_{EF-i}}{(1+a)^t}}{S_B}$$

c_{EF-i} : Coût lié à la consommation de l'énergie finale de type *i* [€/kWh]

$q_{E,EF-i}$: Consommation annuelle de l'énergie finale *i* liée aux systèmes techniques [kWh/an]

A.4. Modèle de calcul de l'indicateur de confort hygrothermique

Comme présenté dans la section 2.2.4.1, l'indicateur sélectionné pour caractériser le confort hygrothermique dans cette méthodologie est le pourcentage de temps de confort thermique. Au niveau du bâtiment, cet indicateur est calculé comme la moyenne des valeurs individuelles des zones thermiques d'intérêt (bureaux et salles de réunion) (n_{conf-i}) pondérées par leur surface de plancher ($S_{space-i}$) :

$$n_{conf} = \sum_{i=1}^{N_{BR}} \frac{n_{conf-i} \cdot S_{space-i}}{S_{BR}}$$

n_{conf} : Pourcentage de temps de confort thermique au niveau du bâtiment [%]

N_{BR} : Nombre de zones thermiques d'intérêt dans le bâtiment [-]

n_{conf-i} : Pourcentage de temps de confort thermique au niveau de la zone thermique *i* [%]

$S_{space-i}$: Surface de plancher de l'espace *i* [m^2]

S_{BR} : Somme des surfaces de plancher de toutes les zones thermiques d'intérêt [m^2]

Le pourcentage de temps de confort thermique au niveau de chaque zone thermique d'intérêt est calculé comme le ratio entre le temps de confort pendant occupation (t_{conf-i}) et le nombre total d'heures d'occupation annuelle (t_{occ-i}) comme montré ci-dessous :

$$n_{conf-i} = \frac{t_{conf-i}}{t_{occ-i}} \cdot 100\%$$

t_{conf-i} : Nombre d'heures de confort thermique pendant occupation dans la zone thermique *i* [h]

t_{occ-i} : Nombre d'heures d'occupation annuelle de la zone thermique *i* [h]

Le temps de confort est donné comme la somme des pas horaires pendant occupation où la température opérative de la zone thermique est conforme avec l'intervalle de températures de confort défini par l'utilisateur de l'outil.

La température opérative peut être définie comme la moyenne entre la température moyenne de rayonnement des parois et celle de l'air à l'intérieur de l'espace (ASHRAE, 2004) comme montré ci-dessous :

$$T_{op-i} = \frac{T_{air-int-i} + \bar{T}_{r-i}}{2}$$

T_{op-i} : Température opérative de l'espace *i* [°C]

$T_{air-int-i}$: Température de l'air à l'intérieur de l'espace *i* [°C]

$\bar{T}_{r-i}$: Température moyenne de rayonnement des parois de l'espace *i* [°C]

Il faut mentionner que cette équation représente une simplification valable dans le cas où les occupants pratiquent des activités quasi sédentaires, avec un niveau métabolique compris entre 1 et 1.3 met, et ils ne sont pas exposés au plein soleil ou à des vitesses de l'air supérieures à 0.2 m/s. Ces conditions sont représentatives des bâtiments tertiaires.

A.5. Modèle de calcul de l'indicateur de confort visuel

Comme présenté dans la section 2.2.4.2, le pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel (DA) est l'indicateur sélectionné dans cette méthodologie pour caractériser le confort visuel. De manière similaire au calcul de l'indicateur de confort hygrothermique, cet indicateur est déterminé au niveau du bâtiment comme la moyenne des valeurs individuelles des espaces d'intérêt (DA_i) pondérées par leur surface de plancher ($S_{space-i}$) comme montré ci-dessous :

$$DA = \sum_{i=1}^{N_{BR}} \frac{DA_i \cdot S_{space-i}}{S_{BR}}$$

DA : Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel au niveau du bâtiment [%]

DA_i : Pourcentage de temps d'autonomie en éclairage naturel de l'espace *i* [%]

N_{BR} : Nombre d'espaces d'intérêt dans le bâtiment [-]

$S_{space-i}$: Surface de plancher de l'espace *i* [m^2]

S_{BR} : Somme des surfaces de plancher de toutes les espaces d'intérêt [m^2]

Le pourcentage de temps d'autonomie en éclairage d'un espace est donné comme le ratio entre le nombre d'heures en occupation pendant lesquelles l'espace peut être considéré comme autonome en éclairage naturel au long de l'année (t_{auto-i}) et le temps total d'occupation annuelle (t_{occ-i}) comme montré ci-dessous :

$$DA_i = \frac{t_{auto-i}}{t_{occ-i}} \cdot 100\%$$

t_{auto-i} : Nombre d'heures en occupation pendant lesquelles l'espace *i* peut être considéré comme autonome en éclairage naturel au long de l'année [h]

t_{occ-i} : Nombre d'heures d'occupation annuelle de l'espace *i* [h]

Un espace autonome en éclairage naturel n'a pas besoin de faire appel à l'éclairage artificiel pour satisfaire ses besoins d'éclairement. Dans ce travail, on part de l'hypothèse de qu'un espace peut être considéré comme autonome en éclairage naturel si l'éclairement diffus disponible à l'extérieur dans un pas horaire quelconque (E_{dif-t}) est supérieur à l'éclairement extérieur minimum nécessaire ($E_{extmin-i}$) pour obtenir un niveau d'éclairement intérieur satisfaisant ($E_{intmin-i}$). L'éclairement diffus disponible à l'extérieur est une donnée de l'outil d'évaluation et est inclus dans la base de données météorologiques.

La relation entre les niveaux d'éclairement intérieur et extérieur est donnée à travers le facteur de lumière du jour moyen de l'espace comme montrée ci-dessous :

$$E_{extmin-i} = \frac{E_{intmin-i}}{FLJ_{m-i}}$$

$E_{extmin-i}$: Niveau d'éclairement intérieur minimum nécessaire pour obtenir un éclairement intérieur satisfaisant [lux]

$E_{intmin-i}$: Niveau d'éclairement intérieur minimum nécessaire pour l'espace *i*, égal à 500 lux pour les bureaux et salles de réunion

FLJ_{m-i} : Facteur de lumière de jour moyen de l'espace *i* [-]

Le facteur de lumière du jour moyen d'un espace (FLJ_{m-i}) peut être calculé à partir des caractéristiques géométriques et optiques des baies vitrées et de l'espace comme suit (Université catholique de Louvain, 2014) :

$$FLJ_{m-i} = \frac{\tau_{win-i} \cdot (1 - f_{o-i}) \cdot S_{win-i} \cdot \theta_{win-i}}{S_{surf-i} \cdot \left(1 - R_i^2\right)}$$

τ_{win-i} : Facteur de transmission lumineuse des baies vitrées de l'espace *i* [-]

f_{o-i} : Facteur de charpente des baies vitrées de l'espace *i* [-]

S_{win-i} : Surface des baies vitrées de l'espace *i* [m^2]

θ_{win-i} : Angle de ciel ouvert des baies vitrées de l'espace *i* [°]

S_{surf-i} : Somme des aires de toutes les surfaces intérieures délimitant l'espace *i*, y compris baies vitrées [m^2]

$\bar{r}_i$: Facteur de réflexion moyen des surfaces intérieures de l'espace i [-]

Le facteur de réflexion moyen (R_i) est calculé en pondérant les facteurs de toutes les surface intérieures délimitant l'espace, y compris baies vitrées, par leurs aires comme montré ci-dessous :

$$\bar{r}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_{s-i}} S_{surf-i-j} \cdot r_{surf-i-j}}{S_{surf-i}}$$

N_{s-i} : Nombre de surfaces intérieures délimitant l'espace *i* [-]

$S_{surf-i-j}$: Aire de la surface intérieure de type *j* de l'espace *i* [m^2]

$r_{surf-i-j}$: Facteur de réflexion de la surface intérieure de type *j* de l'espace *i* [-]

A.6. Modèle de calcul de l'indicateur de confort acoustique

Comme présenté dans la section 2.2.4.3, l'indicateur sélectionné pour caractériser le confort acoustique dans cette méthodologie est l'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission. Cet indicateur peut être calculé pour chacune des façades du bâtiment. Dans le cadre de ce travail, la valeur de cet indicateur au niveau du bâtiment est la valeur minimale des deux façades principales du bâtiment, c'est-à-dire celles aux surfaces les plus importantes.

Ainsi, l'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission au niveau du bâtiment ($D_{nT,A,tr}$) est donné comme suit :

$$D_{nT,A,tr} = MIN\left(D_{nT,A,tr-i}\right)$$

$D_{nT,A,tr}$: Isolement acoustique standardisé pondéré, pour un bruit de trafic à l'émission au niveau du bâtiment [dB]

$D_{nT,A,tr-i}$: Isolement acoustique standardisé pondéré, pour un bruit de trafic à l'émission de la façade de l'espace *i* [dB]

Suivant la méthode de calcul du référentiel Qualitel (Qualitel, 2012), l'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission d'une façade composite ($D_{nT,A,tr-i}$), c'est-à-dire composée de plusieurs matériaux comme vitrages et parois opaques, est défini comme suit :

$$D_{nT,A,tr-i} = 10 \cdot \log\left(\frac{0.32 \cdot V_{space-i}}{X_1 + X_2 + X_3}\right)$$

$V_{space-i}$: Volume de l'espace *i* [m^3]

X_1 : Terme représentant les transmissions acoustiques directes par la façade de l'espace *i*

X_2 : Terme représentant les transmissions acoustiques indirectes à travers les parois latérales de la façade de l'espace *i*

X_3 : Terme représentant les transmissions acoustiques par les équipements liés à la façade de l'espace *i*

Comme spécifié dans le référentiel Qualitel, les transmissions latérales sont négligeables quand l'isolement requis est inférieur à 35 dB, ce qui est normalement le cas. D'autre part, les transmissions acoustiques par les équipements, tels que bouches d'entrée d'air, ne sont prises en compte dans ce calcul car ils ne sont pas encore connus lors des premières phases du projet de conception.

Les transmissions acoustiques directes par la façade de l'espace sont définies à partir des caractéristiques géométriques et acoustiques des éléments la composant comme suit :

$$X_1 = \sum_{j=1}^{N_{F-i}} \left(S_{j-i} \cdot 10^{-\left(\frac{R_{A,tr-j-i}}{10}\right)} \right)$$

N_{F-i} : Nombre de types de surfaces qui composent la façade composite de l'espace *i* (baies vitrées, murs) [-]

S_{j-i} : Aire de la surface de type *j* composant la façade de l'espace *i* [m^2]

$R_{A,tr-j-i}$: Indice d'affaiblissement acoustique vis-à-vis d'un bruit de route de la surface de type *j* de la façade de l'espace *i* [dB]

Ainsi, en ne considérant que les transmissions acoustiques directes, la définition de l'isolement acoustique standardisé pondéré pour un bruit de trafic à l'émission d'une façade composite peut s'écrire de la manière suivante :

$$D_{nT,A,tr-i} = 10 \cdot \log \left(\frac{0.32 \cdot V_{space-i}}{\sum_{j=1}^{N_{F-i}} \left(S_{j-i} \cdot 10^{-\left(\frac{R_{A,tr-j-i}}{10}\right)} \right)} \right)$$

La valeur à considérer lors de ce calcul est la valeur entière la plus proche (en arrondissant 0.50 à 1 dB).

De manière simplifiée, les deux types de surfaces constituant une façade composite sont : les baies vitrées et les parois opaques. Pour les baies vitrées, l'indice d'affaiblissement est normalement donné par le fabricant sous la forme $R_w(C; C_{tr})$, où :

$$R_{A,tr-win} = R_w + C_{tr}$$

$R_{A,tr-win}$: Indice d'affaiblissement acoustique pondéré vis-à-vis d'un bruit de route pour une baie vitrée [dB]

R_w : Indice d'affaiblissement acoustique global [dB]

C : Terme de correction pour un bruit rose [dB]

C_{tr} : Terme de correction pour un bruit de trafic routier [dB]

D'autre part, les parois opaques peuvent être composées d'une partie structurelle, telle qu'une voile en béton ou des briques en terre cuite, ainsi que d'un doublage thermique. L'indice d'affaiblissement acoustique résultant de cette combinaison de couches en série est difficile à estimer à priori, mais des règles simplifiées existent.

Les parois structurelles de type massique, telles que celles en maçonnerie, peuvent être caractérisées avec l'utilisation de la Loi de masse expérimentale. Cette loi exprime la relation entre la masse surfacique des parois (m_s) et l'indice d'affaiblissement acoustique vis-à-vis d'un type de bruit normalisé : un bruit rose (R_{rose}) ou un bruit de route (R_{route}).

Le tableau A.25 détaille l'application de la Loi de masse expérimentale pour le calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique global vis-à-vis d'un bruit de route.

Tableau A.25. Loi de masse expérimentale pour le calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique global vis-à-vis d'un bruit de route (adapté de Qualitel, 2012).

Masse surfacique de la paroi	**Indice d'affaiblissement acoustique global vis-à-vis d'un bruit de route**
$50 \leq m_s < 150$ kg/m^2	$13 \cdot \log(m_s) + 9$
$150 \leq m_s \leq 670$ kg/m^2	$40 \cdot \log(m_s) - 50$
$m_s > 670$ kg/m^2	63

Où :

m_s : Masse surfacique de la paroi [kg/m^2]

R_{route} : Indice d'affaiblissement acoustique global vis-à-vis d'un bruit de route [dB(A)]

La loi de masse expérimentale est normalement exprimée en termes de la ancienne réglementation acoustique française de 1994. La Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA), introduite dans l'année 2000, normalise la nomenclature utilisée avec les normes analogues à niveau européen. Dans cette nouvelle réglementation, la nomenclature utilisée pour l'indice d'affaiblissement vis-à-vis d'un bruit de route devient :

$$R_{A,tr} \approx R_{route}$$

De son côté, l'influence des doublages thermiques est considérée comme une correction à la valeur de l'indice d'affaiblissement acoustique de la couche structurelle. Cette valeur corrective est donnée en fonction du type matériau d'isolation utilisé, le type de pose du doublage et le positionnement de l'isolation. Des tableaux proposant telles valeurs sont donnés dans le chapitre AE4.2 de la Guide Qualitel.

Ainsi, l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré vis-à-vis d'un bruit de route de la paroi opaque est donné par la somme de la valeur liée à la paroi structurelle ($R_{A,tr}$) et sa correction due au doublage thermique ($\Delta R_{A,tr}$) comme montré ci-dessous :

$$R_{A,tr-wall} = R_{A,tr} + \Delta R_{A,tr}$$

$R_{A,tr-wall}$: Indice d'affaiblissement acoustique résultant de la paroi opaque [dB]

$R_{A,tr}$: Indice d'affaiblissement acoustique de la couche structurelle de la paroi opaque [dB]

$\Delta R_{A,tr}$: Correction à la valeur de l'indice d'affaiblissement acoustique de la couche structurelle [dB]

En outre, dans le cas où il existe un espace dit tampon, tel qu'une serre ou dans le cas d'une façade double vitrage, l'isolement à retenir est donné par la somme de l'isolement de la paroi extérieure et de l'isolement de l'élément de façade, c'est-à-dire :

$D_{nT,A,tr-i} = D_{nT,A,tr-i-F} + D_{nT,A,tr-i-T}$

$D_{nT,A,tr-i-F}$: Isolement acoustique standardisé pondéré, pour un bruit de trafic à l'émission de la façade intérieure de l'espace *i* [dB]

$D_{nT,A,tr-i-T}$: Isolement acoustique standardisé pondéré, pour un bruit de trafic à l'émission de la façade vitrée de l'espace *i* [dB]

A.7. Modèle de calcul de l'indicateur de qualité de l'air intérieur

Comme présenté dans la section 2.2.4.4, le pourcentage attendu de satisfaits a été sélectionné dans ce travail afin de caractériser la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment. Cet indicateur est estimé en fonction du débit de renouvellement d'air d'après les catégories spécifiées dans la norme européenne EN 15251. Dans cette norme, des catégories d'insatisfaction liées à des pourcentages d'occupants insatisfaits avec la qualité de l'air sont définies en fonction du débit de renouvellement d'air par occupant. Dans ce calcul, le pourcentage attendu de satisfaits est simplement calculé comme le pourcentage complément de cet autre paramètre.

Pour estimer le pourcentage attendu de satisfaits pour des valeurs de débit de renouvellement d'air différentes à ceux montrés dans le tableau 2.9, une analyse par régression a été effectuée. En considérant comme hypothèse que la relation entre cet indicateur et le débit suit une tendance de type puissance, elle représentée de la manière suivante :

$$n_{sat} = 100 - 224.9 \cdot \dot{q}^{-0.75}$$

n_{sat} : Pourcentage attendu de satisfaits dû à la qualité de l'air intérieur [%]

$\dot{q}$: Débit de renouvellement de l'air de l'espace par occupant [m^3/h·occupant]

Annexe B Modèle de répartition de décisions de conception

La logique progressive de prise de décisions est détaillée dans cet annexe sous la forme de tableaux pour chaque catégorie d'éléments du bâtiment :

- Dispositions architecturales (cf. Annexe B.1)
- Systèmes techniques (cf. Annexe B.2)
- Façade double peau vitrée (cf. Annexe B.3)

Comme indiqué dans la figure B.1, la structure des tableaux de la logique est donnée comme suit :

1) Type de composant : le phasage de décisions est donné pour chacun des composants principaux des éléments du bâtiment du point de vue énergétique.
2) Décisions de conception : comprenant les différents types de décisions qui permettent de définir un composant du point de vue énergétique.
3) Configuration de bâtiment de référence : représentant les valeurs prises par défaut pour les décisions de conception avant de la prise de décision.
4) Phasage de décisions : spécifiant les possibilités de choix identifiés pour chaque type de décision en fonction de la phase de conception.

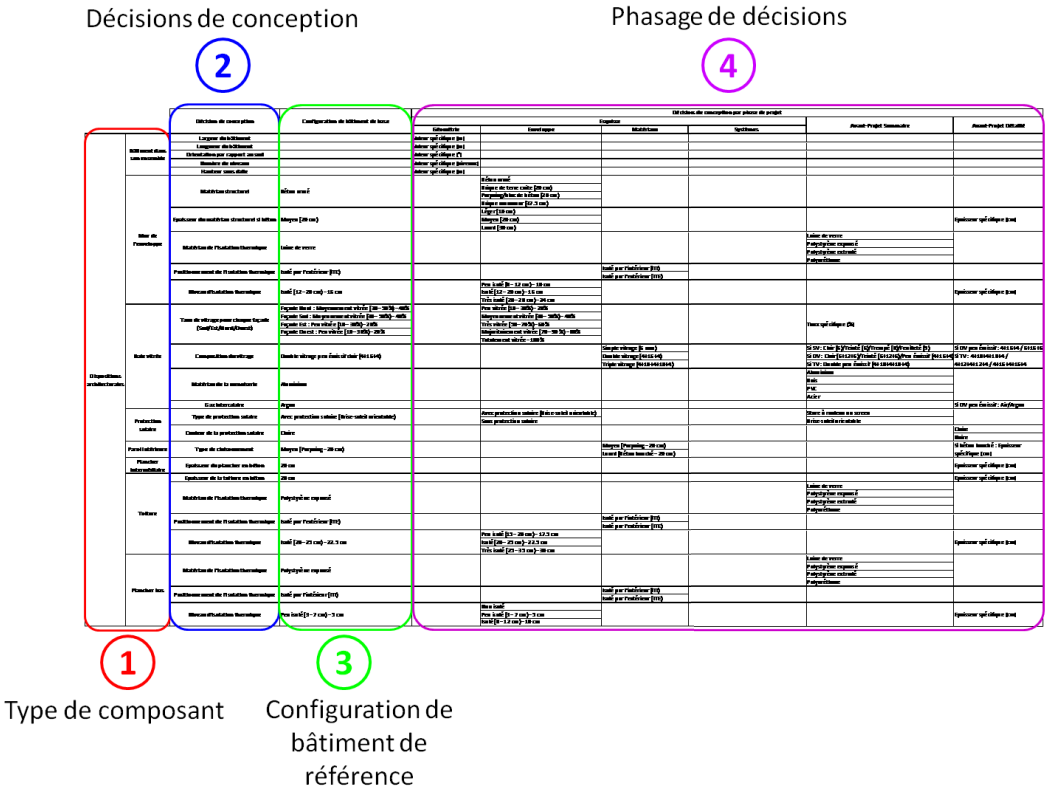

Figure B.1. Structure des tableaux de la logique de progression des décisions de conception.

B.1. Dispositions architecturales

		Décision de conception	Configuration de bâtiment de base	Décisions de conception par phase de projet					
				Esquisse				Avant-Projet Sommaire	Avant-Projet Détaillé
				Géométrie	Enveloppe	Matériaux	Systèmes		
Dispositions architecturales	Bâtiment dans son ensemble	Largeur du bâtiment		Valeur spécifique [m]					
		Longueur du bâtiment		Valeur spécifique [m]					
		Orientation par rapport au sud		Valeur spécifique [°]					
		Nombre de niveaux		Valeur spécifique [niveaux]					
		Hauteur sous dalle		Valeur spécifique [m]					
	Mur de l'enveloppe	Matériau structurel	Béton armé		Béton armé Brique de terre cuite (20 cm) Parpaing/bloc de béton (20 cm) Brique monomur (37.5 cm)				
		Epaisseur du matériau structurel si béton	Moyen (20 cm)		Léger (10 cm) Moyen (20 cm) Lourd (30 cm)				Epaisseur spécifique [cm]
		Matériau de l'isolation thermique	Laine de verre					Laine de verre Polystyrène expansé Polystyrène extrudé Polyuréthane	
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'extérieur (ITE)			Isolé par l'intérieur (ITI) Isolé par l'extérieur (ITE)			
		Niveau d'isolation thermique	Isolé (12 - 20 cm) - 16 cm		Peu isolé (8 - 12 cm) - 10 cm Isolé (12 - 20 cm) - 16 cm Très isolé (20 - 28 cm) - 24 cm				Epaisseur spécifique [cm]
	Baie vitrée	Taux de vitrage pour chaque façade (Sud/Est/Nord/Ouest)	Façade Nord : Moyennement vitrée (30 - 50%) - 40% Façade Sud : Moyennement vitrée (30 - 50%) - 40% Façade Est : Peu vitrée (10 - 30%) - 20% Façade Ouest : Peu vitrée (10 - 30%) - 20%		Peu vitrée (10 - 30%) - 20% Moyennement vitrée (30 - 50%) - 40% Très vitrée (50 - 70%) - 60% Majoritairement vitrée (70 - 90 %) - 80% Totalement vitrée - 100%			Taux spécifique [%]	
		Composition du vitrage	Double vitrage peu émissif clair (4+16+4)			Simple vitrage (6 mm) Double vitrage (4+16+4) Triple vitrage (4+10+4+10+4)		Si SV : Clair (6)/Teinté (6)/Trempé (8)/Feuilleté (9) Si DV : Clair (6+12+6)/Teinté (6+12+6)/Peu émissif (4+16+4) Si TV : Double peu émissif (4+10+4+10+4)	Si DV peu émissif : 4+16+4 / 6+16+6 Si TV : 4+10+4+10+4 / 4+12+4+12+4 / 4+16+4+16+4
		Matériau de la menuiserie	Aluminium					Aluminium Bois PVC Acier	
		Gaz intercalaire	Argon						Si DV peu émissif : Air/Argon
	Protection solaire	Type de protection solaire	Avec protection solaire (Brise-soleil orientable)		Avec protection solaire (Brise-soleil orientable) Sans protection solaire			Store à rouleau ou screen Brise-soleil orientable	
		Couleur de la protection solaire	Claire						Claire Noire
	Paroi intérieure	Type de cloisonnement	Moyen (Parpaing - 20 cm)			Moyen (Parpaing - 20 cm) Lourd (Béton banché - 20 cm)			Si béton banché : Epaisseur spécifique [cm]
	Plancher intermédiaire	Epaisseur du plancher en béton	20 cm						Epaisseur spécifique [cm]
	Toiture	Epaisseur de la toiture en béton	20 cm						Epaisseur spécifique [cm]
		Matériau de l'isolation thermique	Polystyrène expansé					Laine de verre Polystyrène expansé Polystyrène extrudé Polyuréthane	
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'extérieur (ITE)			Isolé par l'intérieur (ITI) Isolé par l'extérieur (ITE)			
		Niveau d'isolation thermique	Isolé (20 - 25 cm) - 22.5 cm		Peu isolé (15 - 20 cm) - 17.5 cm Isolé (20 - 25 cm) - 22.5 cm Très isolé (25 - 35 cm) - 30 cm				Epaisseur spécifique [cm]
	Plancher bas	Matériau de l'isolation thermique	Polystyrène expansé					Laine de verre Polystyrène expansé Polystyrène extrudé Polyuréthane	
		Positionnement de l'isolation thermique	Isolé par l'intérieur (ITI)			Isolé par l'intérieur (ITI) Isolé par l'extérieur (ITE)			
		Niveau d'isolation thermique	Peu isolé (3 - 7 cm) - 5 cm		Non isolé Peu isolé (3 - 7 cm) - 5 cm Isolé (8 - 12 cm) - 10 cm				Epaisseur spécifique [cm]

B.2. Systèmes techniques

		Décision de conception	Configuration de bâtiment de base	Décisions de conception par phase de projet					
				Esquisse				Avant-Projet Sommaire	Avant-Projet Détaillé
				Géométrie	Enveloppe	Matériaux	Systèmes		
Systèmes techniques	Système de ventilation mécanique	Débit de renouvellement d'air par occupant	Réglementaire (18 m^3/(h.occ))					Réglementaire (18 m^3/(h.occ)) Recommandé (25 m^3/(h.occ)) Idéal (36 m^3/(h.occ))	Débit spécifique [m^3/(h.occ)]
		Efficacité de la récupération de chaleur	Avec récupération de chaleur (50 - 70%) - 60%				Avec récupération de chaleur (50 - 70%) - 60% Sans récupération de chaleur	Sans récupération Basse (30 - 50%) - 40% Moyenne (50 - 70%) - 60% Haute (70 - 80%) - 75% Très haute (>80%) - 85%	
		Débit de ventilation en non-occupation en hiver	Réduit en non-occupation (10% du débit de base)						Débit spécifique [vol/h]
		Sur-ventilation nocturne en été	Sans sur-ventilation nocturne				Sans sur-ventilation nocturne Avec sur-ventilation nocturne (1.5 vol/h)		Débit spécifique [vol/h]
	Système de chauffage	Technologie de production de chaleur	Pompe à chaleur air/air				Pompe à chaleur (air/air) Chaudière (à gaz) Radiateurs électriques	Si PAC : air/air / air/eau / eau/eau Si chaudière : à gaz/à fioul Si radiateurs électriques : radiateurs électriques	
		Puissance thermique à installer	Satisfaisant 100% du temps de besoins						Pourcentage spécifique [%]
	Système de climatisation	Technologie de la production de froid	Pompe à chaleur air/air					Pompe à chaleur air/air Pompe à chaleur air/eau Pompe à chaleur eau/eau	
		Puissance thermique à installer	Satisfaisant 100% du temps de besoins						Pourcentage spécifique [%]

B.3. Façade double peau vitrée

		Décision de conception	Configuration de bâtiment de base	Décisions de conception par phase de projet					
				Esquisse				Avant-Projet Sommaire	Avant-Projet Détaillé
				Géométrie	Enveloppe	Matériaux	Systèmes		
Façade double peau vitrée	Façade vitrée	Présence d'une façade double peau vitrée	Sans façade vitrée		Avec façade vitrée Sans façade vitrée				
	Vitrage de la façade vitrée	Composition du vitrage	Simple vitrage clair (6 mm)			Simple vitrage (6 mm) Double vitrage (4+16+4)		Si SV : Clair (6)/Teinté (6)/Trempé (8)/Feuilleté (9) Si DV : Clair (6+12+6)/Teinté (6+12+6)/Peu émissif (4+16+4)	Si DV peu émissif : 4+16+4 / 6+16+6
		Gaz intercalaire	Air						Si DV peu émissif : Air/Argon
	Cavité entre façades	Epaisseur de la cavité d'air	Assez large (0.4 m - 0.8 m) - 0.6 m			Etroite (0 m - 0.4 m) - 0.2 m Assez large (0.4 m - 0.8 m) - 0.6 m Large (0.8 m - 1.2 m) - 1 m Très large (1.2 m - 1.6 m) - 1.4 m			Epaisseur spécifique [m]
	Ouvertures de ventilation	Pourcentage d'ouverture de la façade	Assez ouverte (10% - 20%) - 15%					Peu ouverte (0% - 10%) - 5% Assez ouverte (10% - 20%) - 15% Très ouverte (20% - 30 %) - 25%	Pourcentage spécifique [%]
	Protection solaire	Positionnement des protections solaires	A l'intérieur de la cavité					A l'intérieur de la cavité A l'extérieur (Couverture égale au taux de vitrage)	Si extérieur : Pourcentage de couverture [%]

Annexe C Construction de la base de données de l'outil d'évaluation

Comme présenté dans la section 3.3 du présent travail, six catégories d'éléments sont documentées dans la base de données de l'outil numérique d'évaluation de la performance énergétique :

- Vitrages
- Menuiseries et structure porteuse de la façade vitrée
- Matériaux structurels et d'isolation thermique
- Protections solaires
- Systèmes techniques
- Ressources énergétiques

Chaque entrée dans la base de données est constituée de trois types de paramètres :

- Données environnementales : le profil environnemental des éléments par unité fonctionnelle, constitué des valeurs des neuf indicateurs environnementaux ainsi que de la durée de vie typique comme présenté dans les tableaux 2.10 et 2.11. Sauf indiqué, les sources consultées pour les données environnementales sont la base INIES (INIES, 2014) et l'outil ELODIE (CSTB, 2014).
- Données économiques : le coût d'acquisition hors taxes par unité fonctionnelle des éléments, décrit dans la section 2.3.10.1. Sauf indiqué, la source consultée pour les données économiques est la base Batiprix dans son édition 2012 (Batiprix, 2011).
- Données techniques : les paramètres techniques nécessaires pour la simulation thermique dynamique, donnés en fonction du type d'élément comme détaillé dans le tableau 2.12.

C.1. Vitrages

C.1.1. Données environnementales

Les hypothèses suivantes ont été considérées pour la construction de ces profils environnementaux :

- En raison de l'absence de données spécifiques, les valeurs des indicateurs pour les vitrages simples sont considérées égales à la moitié de ceux des vitrages doubles de la même épaisseur.
- Le profil environnemental des vitrages tentés est considéré égal à celui des vitrages clairs.
- Le profil environnemental des vitrages à remplissage d'air est considéré égal à celui des vitrages à remplissage d'argon.

Le tableau C.1 montre les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) consultées pour les profils environnementaux des vitrages. Toutes les FDES consultées sont disponibles dans la base INIES.

Tableau C.1. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des vitrages.

Type de vitrage	FDES
Simple vitrage clair 6 mm	SGG CLIMAPLUS SOLAR CONTROL (6-12-6)
Simple vitrage teinté 6 mm	SGG CLIMAPLUS SOLAR CONTROL (6-12-6)
Simple vitrage feuilleté 9 mm	SGG STADIP PROTECT/SILENCE (44.2)
Simple vitrage trempé 8 mm	SGG MASTERGLASS/SGG DECORGLASS (8 mm)
Double vitrage clair air (6+12+6)	SGG CLIMAPLUS SOLAR CONTROL (6-12-6)
Double vitrage teinté air (6+12+6)	SGG CLIMAPLUS SOLAR CONTROL (6-12-6)
Double vitrage peu émissif air (4+16+4)	SGG CLIMAPLUS (4-16-4)
Double vitrage peu émissif air (6+16+6)	SGG CLIMAPLUS (6-16-6)
Double vitrage peu émissif argon (4+16+4)	SGG CLIMAPLUS (4-16-4)
Double vitrage peu émissif argon (6+16+6)	SGG CLIMAPLUS (6-16-6)
Triple vitrage peu émissif argon (4+10+4+10+4)	SGG CLIMATOP (4-10-4-10-4)
Triple vitrage peu émissif argon (4+12+4+12+4)	SGG CLIMATOP (4-12-4-12-4)
Triple vitrage peu émissif argon (4+16+4+16+4)	SGG CLIMATOP (4-18-4-18-4)

C.1.2. Données économiques

Le coût d'acquisition des vitrages a été déterminé à partir de la démarche proposée dans la base Batiprix :

- Le coût des vitrages simples sont données de manière individuelle par m^2 de vitre.
- Le coût des vitrages doubles et triples est déterminé par l'addition des prix individuels pour chaque verre selon son type et son épaisseur, et en ajoutant une majoration en cas de remplissage par argon ou si l'épaisseur de la lame d'air est supérieure à 12 mm.

Le tableau C.2 montre les noms des classifications consultées pour les coûts des vitrages.

Tableau C.2. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des vitrages.

Type de vitrage	Classification
Simple vitrage clair 6 mm	Glace claire pour simple vitrage - 6 mm
Simple vitrage teinté 6 mm	Glace teintée pour simple vitrage - 6 mm
Simple vitrage feuilleté 9 mm	Verre feuilleté de sécurité - 8,8 mm type 44.2 clair (P2A)
Simple vitrage trempé 8 mm	Vitrage trempé pour simple vitrage - Glace trempée claire 8 mm
Double vitrage clair air (6+12+6)	Glace claire - 6 mm
Double vitrage teinté air (6+12+6)	Glace claire - 6 mm, Glace teintée - 6 mm
Double vitrage peu émissif air (4+16+4)	Glace claire - 4 mm, Glace à faible émissivité 4 mm
Double vitrage peu émissif air (6+16+6)	Glace claire - 6 mm, Glace à faible émissivité 6 mm
Double vitrage peu émissif argon (4+16+4)	Glace claire - 4 mm, Glace à faible émissivité 4 mm
Double vitrage peu émissif argon (6+16+6)	Glace claire - 6 mm, Glace à faible émissivité 6 mm
Triple vitrage peu émissif argon (4+10+4+10+4)	Glace claire - 4 mm, Glace à faible émissivité 4 mm
Triple vitrage peu émissif argon (4+12+4+12+4)	Glace claire - 4 mm, Glace à faible émissivité 4 mm
Triple vitrage peu émissif argon (4+16+4+16+4)	Glace claire - 6 mm, Glace à faible émissivité 6 mm

C.1.3. Données techniques

Les paramètres techniques spécifiés pour les vitrages dans la base de données sont donnés dans le tableau C.3.

Tableau C.3. Paramètres techniques caractérisant les vitrages.

Paramètre	Unités
Coefficient de transmission thermique surfacique	$W/m^2 \cdot K$
Facteur solaire	-
Facteur de transmission lumineuse	-
Indice d'affaiblissement acoustique	dB

Les sources d'information consultées sont :

- Un document de référence de l'Institut Wallon (Institut Wallon, 2003).
- Des documents techniques de fabricants de verres (VIT, 2013 ; Saint-Gobain Glass France, 2013 ; Guardian Europe, 2009).
- Le logiciel de simulation numérique DIAL+ de la société ESTIA SA (ESTIA SA, 2014).

C.2. Menuiseries et structure porteuse de la façade vitrée

C.2.1. Données environnementales

Les profils environnementaux des fenêtres sont normalement donnés en combinant les profils de la menuiserie et du vitrage. Afin de calculer le profil environnemental de la menuiserie, les valeurs des indicateurs environnementaux du vitrage correspondant ont été déduites du profil des fenêtres. Le type de vitrage considéré pour chaque type de fenêtre est indiqué dans les FDES.

La même démarche a été suivie pour la structure porteuse de la façade vitrée. Les valeurs des indicateurs environnementaux d'un double vitrage générique a été déduit du profil de la façade vitrée complète, ainsi donnant le résultat correspondant uniquement à la structure porteuse en aluminium.

Le tableau C.4 montre les FDES consultées pour la construction des profils environnementaux des menuiseries et de la structure porteuse de la façade vitrée, y compris les fiches des vitrages correspondants. Les sources d'information consultées sont la base INIES et l'outil ELODIE.

Tableau C.4. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des menuiseries.

Type de menuiseries	FDES de la fenêtre	FDES du vitrage correspondant
Acier	CHASSIS FIXE (INIES)	VERRE FEUILLETE 44.2 (INIES)
Aluminium	Fenêtre Aluminium Double Vitrage (ELODIE)	Double vitrage (ELODIE)
Bois	Fenêtre Bois Double Vitrage (ELODIE)	Double vitrage (ELODIE)
PVC	Fenêtre PVC Double Vitrage (ELODIE)	Double vitrage (ELODIE)
Structure de façade vitrée	Façade vitrée (ELODIE)	Double vitrage (ELODIE)

C.2.2. Données économiques

Similairement au cas des données environnementales, les coûts d'acquisition des menuiseries et de la structure porteuse de la façade vitrée sont calculés comme la différence entre le coût de la baie vitrée complète (menuiserie/structure et vitrage) et le coût du type de vitrage correspondant.

En raison du grand nombre de configurations de fenêtres actuellement disponibles dans le marché, une valeur moyenne a été prise en compte dans la base de données. Les configurations considérées dans le calcul sont : croisée française, porte-croisée française, croisée oscillo-battante, croisée et porte-croisée coulissante.

Dans le cas de la structure de la façade vitrée, le coût de construction d'un mur-rideau en aluminium a été considéré en absence de valeurs spécifiques pour une telle structure. Une valeur moyenne de deux configurations selon le type de pose (à l'avancement et de face) a été prise ne compte.

Les noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des menuiseries et de la structure de la façade vitrée sont montrés dans le tableau C.5.

Tableau C.5. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des menuiseries et de la structure porteuse de la façade vitrée.

Type de menuiseries	Classification
Acier	Menuiserie fabriquée en atelier à rupture de pont thermique
Aluminium	Menuiserie industrialisée aluminium
Bois	Menuiserie industrialisée en bois
PVC	Menuiserie industrialisée en PVC
Structure de façade vitrée	Mur-rideau en aluminium - Trame courante avec traversé posée à l'avancement pour une largeur de 1.001 m à 1.500 m Mur-rideau en aluminium - Trame courante avec traversé posée de face pour une largeur de 1.001 m à 1.500 m

C.2.3. Données techniques

Le seul paramètre technique caractérisant les menuiseries et la structure porteuse de la façade vitrée est le coefficient de transmission thermique surfacique, donné en $W/m^2 \cdot K$. La source consultée pour

ce coefficient est le fascicule 3/5 de la réglementation thermique française dans son édition 2005 (CSTB, 2006).

C.3. Matériaux structurels et d'isolation thermique

C.3.1. Données environnementales

Les profils environnementaux des isolants thermiques sont normalement donnés par unité de surface pour une épaisseur spécifique de matériau. Dans la base de données de l'outil ici proposé, les profils environnementaux ont été normalisés à une épaisseur de référence de 100 mm. En cas de la prise en compte d'une épaisseur différente dans la conception du bâtiment, les valeurs des données environnementales sont extrapolées linéairement dans l'outil de simulation numérique.

Dans le cas des éléments en béton armé (dalles, voiles, plancher), les profils environnementaux sont donnés dans ELODIE par unité de volume. Les valeurs documentées dans la base de données ont été normalisées par unité de surface pour une épaisseur de 100 mm, afin de d'être aisément extrapolées linéairement par l'outil de simulation.

Le tableau C.6 montre les FDES consultées pour les profils environnementaux des matériaux structurels et d'isolation thermique. Les sources d'information consultées sont la base INIES et l'outil ELODIE.

Tableau C.6. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des matériaux structurels et d'isolation thermique.

Type de matériau	FDES
Brique monomur (37.5 cm)	Brique Monomur 37,5 de terre cuite rectifiée pour pose à joint mince (INIES)
Brique de terre cuite (20 cm)	Brique de 20 traditionnelle en terre cuite de type « Gelimatic » (INIES)
Parpaing/bloc de béton (20 cm)	Maçonnerie de Blocs CLIMAT collés à joints minces (INIES)
Béton armé pour planchers intermédiaires	Béton armé pour Dalles et Prédalles pour utilisation en Tertiaire ou Grand Collectif (ELODIE)
Béton armé pour murs	Béton armé pour Voiles et voiles contre terre pour utilisation en Tertiaire et Grand Collectif (ELODIE)
Béton armé pour plancher bas	Béton armé pour Plancher pour utilisation en Tertiaire ou Grand Collectif (ELODIE)
Laine de verre	Panneau isolant thermoacoustique en laine de verre (ELODIE)
Polyuréthane	Panneau isolant en Polyuréthane (ELODIE)
Polystyrène expansé	Panneau isolant en polystyrène expansé (ELODIE)
Polystyrène extrudé	Polystyrène Extrudé (ELODIE)

C.3.2. Données économiques

Comme dans le cas des profils environnementaux, les coûts des éléments en béton armé sont documentés par unité de surface pour une épaisseur de 100 mm, après conversion des valeurs d'origine données par unité de volume.

Les noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des matériaux structurels et d'isolation thermique son montrées dans le tableau C.7.

Tableau C.7. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts de matériaux structurels et d'isolation thermique.

Type de matériau	Classification
Brique monomur (37.5 cm)	Brique creuse en pose roulée - Monomur Brique ép. 37,5 cm, mur avec ouvertures
Brique de terre cuite (20 cm)	Brique creuse en pose traditionnelle - Briques creuses courantes 20 cm
Parpaing/bloc de béton (20 cm)	Bloc aggloméré de ciment - Aggloméré ciment creux 20 cm (20x20x50 cm)
Béton armé pour dalles	Béton armé - Dalle pleine (trémie déduite)
Béton armé pour voiles	Béton armé - Voile périphérique et refend
Béton armé pour plancher	Béton armé - Dalle pleine (trémie déduite)
Laine de verre	Isolation verticale entre structure - Panneau semi-rigide en laine de verre 100 mm
Polyuréthane	Doublage composite - Panneau plaque de plâtre + polyuréthane 100 mm
Polystyrène expansé	Isolation verticale entre structure - Panneau rigide de polystyrène expansé 100 mm
Polystyrène extrudé	Isolation verticale entre structure - Panneau rigide de polystyrène extrudé 80 mm

C.3.3. Données techniques

Les paramètres techniques spécifiés dans la base de données pour les matériaux structurels et pour les isolants thermiques sont donnés respectivement dans les tableaux C.8 et C.9.

Tableau C.8. Paramètres techniques caractérisant les matériaux structurels.

Paramètre	Unités
Conductivité thermique	W/m·K
Indice d'affaiblissement acoustique	dB
Capacité thermique massique	J/kg·K
Masse volumique	kg/m^3

Tableau C.9. Paramètres techniques caractérisant les isolants thermiques.

Paramètre	Unités
Conductivité thermique	W/m·K
Correction de l'indice d'affaiblissement acoustique, si isolé par l'extérieur	dB
Correction de l'indice d'affaiblissement acoustique, si isolé par l'intérieur	dB
Capacité thermique massique	J/kg·K
Masse volumique	kg/m^3

Les sources consultées pour les paramètres techniques sont les FDES des bases INIES et ELODIE, ainsi que la réglementation thermique française dans son édition 2005.

C.4. Protections solaires

C.4.1. Données environnementales

Le tableau C.10 montre les FDES consultées pour les profils environnementaux des protections solaires, les deux étant disponibles dans la base INIES.

Tableau C.10. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des protections solaires.

Type de protection solaire	FDES
Store à rouleau clair	Textile enduit ajouté pour stores
Store à rouleau noir	Textile enduit ajouté pour stores
Brise-soleil orientable clair	Store vénitien extérieur manuel
Brise-soleil orientable noir	Store vénitien extérieur manuel

C.4.2. Données économiques

Le tableau C.11 montre les noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des protections solaires.

Tableau C.11. Noms des classifications dans la base Batiprix pour les coûts des protections solaires.

Type de protection solaire	Classification
Store à rouleau clair	Store extérieur - Store vertical complet avec coffre
Store à rouleau noir	Store extérieur - Store vertical complet avec coffre
Brise-soleil orientable clair	Brise soleil orientable - A lames galbées de 80 mm
Brise-soleil orientable noir	Brise soleil orientable - A lames galbées de 80 mm

C.4.3. Données techniques

Deux paramètres techniques sont documentés dans la base de données pour caractériser les protections solaires :

- Facteur solaire
- Facteur de transmission lumineuse

Deux sources d'information ont été consultées pour la détermination de ces paramètres :

- Documentation technique du fabricant français Serge Ferrari (Serge Ferrari, 2013).
- Le logiciel de simulation numérique ParaSol de l'Université de Lund (Lund University, 2013).

C.5. Systèmes techniques

C.5.1. Données environnementales

En raison du manque de profils environnementaux de systèmes techniques dans la base INIES et l'outil ELODIE, une autre base de données a été consultée pour le système de chauffage électrique : la base PEP ecopassport (PEP ecopassport, 2014). Cette base française de profils environnementaux se spécialise sur les systèmes techniques. Néanmoins, le format des fiches environnementales de cette base n'inclut pas les indicateurs « Déchets non dangereux éliminés », « Déchets radioactifs éliminés » et « Utilisation d'énergie primaire non renouvelable ». Pour l'instant, les valeurs de ces indicateurs ont été prises comme nulles pour le système de chauffage électrique, sauf pour le dernier indicateur mentionné, où on l'a pris comme égale à l'indicateur « Utilisation d'énergie primaire totale ».

Trois types de systèmes de chauffage électrique sont identifiés dans la base PEP ecopassport : convecteur, rayonnant et radiateur. Ainsi, pour le système de chauffage électrique, la valeur moyenne des profils environnementaux de trois éléments considérés représentatifs de chaque catégorie a été prise en compte.

Le seul type de pompe à chaleur documenté dans les bases de données consultées est la variante eau/eau dans l'outil ELODIE. Afin de déterminer le profil environnemental des pompes à chaleur air/air et air/eau, un traitement mathématique a été réalisé pour identifier quelle partie des impacts environnementaux d'une pompe à chaleur eau/eau est due à la mise en place du réseau géothermique et quelle partie est associée au système technique lui-même. Ainsi, le profil environnemental des pompes à chaleur de type air/air et air/eau a été considéré égal à la partie des impacts uniquement associée au système d'une variante eau/eau.

Les valeurs des indicateurs environnementaux des tous les systèmes techniques ont été normalisées à une unité fonctionnelle de 1 kW de puissance installée.

Le tableau C.12 montre les FDES consultées pour les profils environnementaux des systèmes techniques dans les bases ELODIE et PEP ecopassport.

Tableau C.12. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des systèmes techniques.

Type de système technique	FDES
Pompe à chaleur eau/eau	PAC géothermale eau-glycolée/eau 30 kW sur capteurs enterrés verticaux (ELODIE)
Pompe à chaleur air/air	PAC géothermale eau-glycolée/eau 10 kW sur capteurs enterrés horizontaux, (ELODIE), PAC géothermale eau-glycolée/eau 10 kW sur capteurs enterrés verticaux (ELODIE)
Pompe à chaleur air/eau	PAC géothermale eau-glycolée/eau 10 kW sur capteurs enterrés horizontaux (ELODIE), PAC géothermale eau-glycolée/eau 10 kW sur capteurs enterrés verticaux (ELODIE)
Chaudière à fioul	Chaudière fioul 10 kW pour MI ttes technologies confondues (ELODIE)
Chaudière à gaz	Chaudière gaz pour MI ttes technologies, P variée (10 kW) (ELODIE)
Radiateurs électriques	Atlantic Solius (rayonnant) (PEP ecopassport), Thermor Mozart (radiateur) (PEP ecopassport), Atlantic F617 (convecteur) (PEP ecopassport)

C.5.2. Données économiques

Comme dans le cas des indicateurs environnementaux, le coût du système de chauffage électrique a été calculé comme la moyenne des coûts de trois éléments considérés représentatifs des catégories identifiées dans la base PEP ecopassport.

Les valeurs des coûts des tous les systèmes techniques ont été normalisées à une unité fonctionnelle de 1 kW de puissance installée.

Les noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des systèmes techniques sont montrés dans le tableau C.13.

Tableau C.13. Noms des classifications consultées dans la base Batiprix pour les coûts des systèmes techniques.

Type de système technique	Classification
Pompe à chaleur eau/eau	Pompe à chaleur eau/eau - PAC réversible PC 15,3 kW, PF 11,3 kW
Pompe à chaleur air/air	Pompe à chaleur air/air - PAC unité extérieure PC 8 kW, PF 11 kW, PAC unité intérieure type plafonnier gainable PC 7,9 kW, PF 11 kW
Pompe à chaleur air/eau	Pompe à chaleur air/eau - PAC PC 11 kW + ballon préparateur 200 L
Chaudière à fioul	Chaudière compris fourniture - Chaudière fioul, fonte, chauffage seul 90 à 115 kW
Chaudière à gaz	Chaudière compris fourniture - Chaudière gaz au sol, fonte, chauffage seul 99 kW
Radiateurs électriques	Panneau rayonnant façade perforée gamme design 2000 kW (rayonnant), Radiateur à inertie maîtrisée à fluide haute performance 2000 kW (radiateur), Convecteur en tôle standard 2000 W (convecteur)

C.5.3. Données techniques

Comme expliqué dans la section 2.3.10.3 de ce travail, aucune donné technique n'est nécessaire pour la méthode de simulation thermique dynamique.

C.6. Ressources énergétiques

C.6.1. Données environnementales

Le tableau C.14 montre les FDES consultées pour les profils environnementaux des ressources énergétiques, dont la source est l'outil ELODIE.

Tableau C.14. Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire consultées pour les profils environnementaux des ressources énergétiques.

Type de ressource énergétique	FDES
Electricité	Electricité - Mix Electrique (France)
Gaz naturel	Gaz naturel - Chauffage
Fioul	Fioul - Chauffage

C.6.2. Données économiques

Les coûts des ressources énergétiques correspondent aux dernières valeurs disponibles dans la base de données française Pégase du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, 2014). Le tableau C.15 montre les noms des classifications consultées dans cette base ainsi que la dernière année des valeurs de coûts disponible.

Tableau C.15. Noms des classifications et dernières années de valeurs disponibles dans la base Pégase pour les coûts des ressources énergétiques.

Type de ressource énergétique	Classification	Année
Electricité	Electricité, tranche IA	2012
Gaz naturel	Gaz naturel, tranche I1	2013
Fioul	Fioul lourd, 100 kWh PCI de FOL TBTS	2013

PROCESSUS DE CONCEPTION ENERGETIQUE DE BATIMENTS DURABLES

RESUME : L'objectif de ce travail de thèse est de développer une méthodologie d'aide à la prise de décisions pour la conception énergétique de bâtiments durables. La méthodologie proposée est composée de : (1) une base de seize indicateurs caractérisant la performance énergétique du bâtiment, couvrant les trois dimensions du concept de la durabilité (aspects environnementaux, économiques et de confort des occupants) et suivant une approche de type cycle de vie ; (2) une méthode d'évaluation de ces indicateurs adaptée au niveau de précision de la connaissance du bâtiment dans les premières phases de projet ; (3) une logique de progression des décisions de conception donnée comme un modèle de répartition séquentielle des choix à effectuer à chaque phase de projet ; et (4) une base de connaissances d'éléments du bâtiment comprenant les données techniques, environnementales et économiques nécessaires pour la méthode d'évaluation. Cette méthodologie est destinée à être utilisée par la maîtrise d'œuvre d'un projet de construction, y compris architectes et bureaux d'études concernés par la performance énergétique, pour la conception de bâtiments de bureaux dans un contexte français. Un outil numérique d'évaluation a été mis en place comme une première application de la méthodologie proposée afin d'étudier ce qu'elle peut apporter au concepteur comme éléments d'aide à la prise de décisions. L'intérêt de la mise en œuvre de la méthodologie a été validé par divers cas d'étude à chaque stade du processus de conception : de la phase d'Esquisse à la phase d'Avant-Projet Détaillé. En particulier, l'intégration d'une façade double peau vitrée, dont l'impact sur la performance du bâtiment est encore peu maîtrisé, a été évaluée.

Mots clés : performance énergétique, phases de conception, bâtiments, durabilité, aide à la décision, façade double peau vitrée.

ENERGY DESIGN PROCESS OF SUSTAINABLE BUILDINGS

ABSTRACT: The aim of this thesis work is the development of a decision-support methodology for the energy design of sustainable buildings. The proposed methodology consists of: (1) a set of sixteen indicators of energy performance, covering the three dimensions of the concept of sustainability (environmental, economic and user comfort aspects) and based on a whole life-cycle approach; (2) a framework for the calculation of these indicators, adapted to the level of knowledge and detail of buildings in the early design phases; (3) a decision making roadmap, proposed as a sequential model for structuring decision making throughout the design process; and (4) a knowledge base of building elements, compiling the necessary technical, environmental and economic data for evaluating energy performance. This methodology is aimed to assist architects and engineers who participate in the energy design of office buildings within a French context. An assessment tool has been developed as a first application of the proposed methodology in order to determine its contribution to the process of decision making. The methodology has been validated through various case studies at each stage of the design process: from the schematic design phase to the detailed design phase. In particular, the integration of a double skin facade, whose impact on building performance is still not fully understood, was assessed.

Keywords : energy performance, design process, buildings, sustainability, decision support, double skin facade.

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY