

Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Physique

Présentée et soutenue par :

M. TAMBA CAMARA

le mercredi 14 novembre 2018

Titre :

Retour d'expérience pour l'évaluation des risques dans les bâtiments performants en zone aéroportuaire

Ecole doctorale :

Aéronautique-Astronautique (AA)

Unité de recherche :

Laboratoire de Génie de Productions de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. BERNARD KAMU-FOGUEM

M. BADIE DIOURTE

Rapporteurs :

M. BLAISE NSOM, UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

M. MOUSSA MAGARA TRAORE, ENETP BAMAKO

Membre(s) du jury :

Mme NADIA SAIYOURI, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, Président

M. ABDALLAH HABBADI, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

M. BADIE DIOURTE, UNIV. DES SCIENCES TECH & TECHNO BAMAKO, Membre

M. BERNARD KAMU-FOGUEM, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : les règles applicables sur les droits à construire dans les zones d'un PEB.....	29
Tableau 1-2: Les caractéristiques du son	30
Tableau 1-3: Exemples d'indices d'affaiblissement acoustique pondérés (Rw + Ctr) et (Rw + C) de murs extérieurs.....	38
Tableau 2-1: Propriétés thermophysiques de matériaux de construction.....	53
Tableau 2-2: Analyse climatique des pays chauds, Traité d'Architecture et d'Urbanisme bioclimatiques	55
Tableau 2-3: Illustration des logements sociaux réalisés à Bamako de 2002 à 2015	70
Tableau 3-1: Matrice de pondération.....	84
Tableau 3-2: Matrice de criticité.....	85
Tableau 4-1 : Trafic passager annuel de 1999 à 2015 de l'Aéroport International Président Modibo KEÏTA de Bamako	89
Tableau 4-2: Les résultats de calculs des niveaux LAeqD, LAeqN et LDN en dB (A)	103
Tableau 4-3: Résultats des calculs des niveaux LAeqT et SEL en dB (A).....	106
Tableau 4-4: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe1	112
Tableau 4-5: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe2	113
Tableau 4-6: Niveau de criticité du risque lié au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique jugé par le groupe1	114
Tableau 4-7: Niveau de criticité du risque lié au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique jugé par le groupe2.....	115
Tableau 5-1: Niveau de criticité du risque lié à l'orientation de certains logements jugé par le groupe 1	127
Tableau 5-2: Niveau de criticité du risque lié à l'orientation de certains logements jugé par le groupe2	128
Tableau 5-3: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe1	129
Tableau 5-4: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe2	130
Tableau 5-5: Niveau de criticité du risque lié à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment jugé par le groupe1	131
Tableau 5-6: Niveau de criticité du risque lié à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment jugé par le groupe2	131
Tableau 5-7: Niveau de criticité du risque lié à la taille des parcelles jugé par le groupe1	132
Tableau 5-8: Niveau de criticité du risque lié à la taille des parcelles jugé par le groupe2	133
Tableau 5-9: valeurs moyennes des données climatiques (2012-2016) de la ville de Bamako	138
Tableau 5-10: Valeurs moyennes mesurées dans le salon durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres fermées.....	139
Tableau 5-11: Valeurs moyennes mesurées dans le salon durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres ouvertes.....	140
Tableau 5-12 : Valeurs moyennes mesurées dans la chambre à coucher durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres fermées.....	141
Tableau 5-13 : Les valeurs moyennes mesurées dans la chambre à coucher durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres ouvertes	141
Tableau 5-14: Données des degrés-jours de chauffage et de climatisation de la ville de Bamako	142

Liste des figures

Figure 1.1 : Illustration des habitations survolées par un avion.....	25
Figure 1.2 Exemple d'un Plan d'Exposition au Bruit (source : www.acnusa.fr).....	28
Figure 1.3 : Évolution du niveau sonore perçu pendant le passage d'un avion.....	34
Figure 1.4 : Représentation des niveaux fractiles et du niveau équivalent.....	35
Figure 1.5: Isolation et correction acoustiques.....	36
Figure 1.6: Modes de transmission des bruits aériens intérieurs et extérieurs.....	37
Figure 1.7: Illustration de la loi de masse.....	38
Figure 1.8: Représentation schématique d'une double paroi.....	39
Figure 1.9: Lois expérimentales de masse et de fréquence.....	41
Figure 2.1: Schéma illustratif du concept bioclimatique [Camara et al., 2017].....	48
Figure 2.2: Illustration de la disposition appropriée des pièces.....	49
Figure 2.3 : Puissance solaire reçue en kWh par orientation pour les deux saisons hiver et été [Courgey & Oliva, 2006].	50
Figure 2.4: Carte du monde avec les différentes zones climatiques chaudes.....	56
Figure 2.5: Diagramme psychrométrique adapté de Givoni.....	57
Figure 2.6 : Techniques de chauffage solaire passif (l'auvent en tant que solution de chauffage solaire passif).....	59
Figure 2.7 : Techniques d'humidification.....	60
Figure 2.8: Techniques de protection solaire.....	60
Figure 2.9 : Un patio Sevillien avec un mécanisme de protection qui évite les gains de chaleur pendant la journée et favorise la dissipation nocturne.....	61
Figure 2.10 : Techniques de refroidissement par évaporation.....	62
Figure 2.11 : Techniques de ventilation par refroidissement naturel et mécanique.....	63
Figure 2.12: Vue de quelques bâtiments coloniaux au Mali.....	65
Figure 2.13: Vue de quelques bâtiments traditionnels au Mali.....	66
Figure 2.14: vue des bâtiments bioclimatiques des pays Dogons.....	66
Figure 2.15: Vue de quelques bâtiments tendance modernes à Bamako.....	67
Figure 2.16: Bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako.....	68
Figure 2.17: Vue des logements sociaux de Bamako.....	70
Figure 2.18: Vue des logements sociaux rénovés.....	72
Figure 3.1: Positionnement des différentes classes de retour d'expérience.....	79
Figure 3.2: Les 3 phases de l'approche d'évaluation des risques.....	82
Figure 3.3: Le processus de gestion des risques.....	83
Figure 4.1 : Histogramme du trafic passager annuel de 1999 à 2015 de l'Aéroport International Président Modibo KEÏTA de Bamako.....	90
Figure 4.2: Vue de loin de l'Aéroport International Président Modibo Keita de Bamako Sénou.....	90
Figure 4.3: Vues des habitations de la zone aéroportuaire de Bamako.....	91
Figure 4.4: Le plan du bâtiment expérimental.....	92
Figure 4.5: Vues des façades du bâtiment expérimental.....	92
Figure 4.6 : Image du sonomètre Voltcraft et ses accessoires.....	98
Figure 4.7: Capteur de mesure acoustique installé à l'intérieur du bâtiment.....	99
Figure 4.8: Capteur de mesure acoustique installé à l'extérieur du bâtiment.....	99
Figure 4.9: Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 23/02/2017.....	100

Figure 4.10 : Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 04/03/2017	100
Figure 4.11 : Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 05/04/2017	101
Figure 4.12: Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 07/05/2017	101
Figure 4.13: Histogrammes des niveaux équivalents (portes et fenêtres ouvertes)	104
Figure 4.14: Histogrammes des niveaux équivalents (portes et fenêtres fermées)	104
Figure 4.15: Évolution des niveaux de pression sonores relatifs au passage d'un avion entre 10H21mn10s et 10H22mn41s.....	105
Figure 4.16: Évolution des niveaux de pression sonores relatifs au passage d'un avion entre 20H39mn30s et 20H40 mn54s.....	105
Figure 4.17: Illustration graphique de l'écart entre le niveau de pression acoustique extérieur et le niveau de pression acoustique intérieur du bâtiment le 23/02/2017.....	107
Figure 4.18: Illustration graphique de l'écart entre le niveau de pression acoustique extérieur et le niveau de pression acoustique intérieur du bâtiment le 04/03/2017.....	107
Figure 4.19: Illustration de la fenêtre en persienne métallique du bâtiment test	111
Figure 5.1: Illustration du bâtiment expérimental.....	120
Figure 5.2: Vue de loin des logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro	120
Figure 5.3: Vue de loin des différentes étapes de construction des logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro	124
Figure 5.4: Images de quelques non-qualités sur les logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro	125
Figure 5.5: Images des capteurs thermo hygromètres EasyLog GFX (Data Logger), accessoires et batteries de rechanges	135
Figure 5.6: l'interface du logiciel EasyLog-GFX	136
Figure 5.7: Le plan illustratif de l'installation des capteurs.....	137
Figure 5.8: illustratif des capteurs installés à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.....	137
Figure 5.9 : Représentation graphique de températures mesurées dans le salon avec portes et fenêtres fermées.....	139
Figure 5.10: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans le salon avec portes et fenêtres fermées.....	139
Figure 5.11: Représentation graphique de températures mesurées dans le salon avec portes et fenêtres ouvertes.....	140
Figure 5.12: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans le salon avec portes et fenêtres ouvertes.....	140
Figure 5.13: Représentation graphique de températures mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres fermées	141
Figure 5.14: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres fermées.....	141
Figure 5.15: Représentation graphique de températures mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres ouvertes	142
Figure 5.16: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres ouvertes.....	142
Figure 5.17: Représentation graphique de D-J de chauffage et D-J de climatisation de la ville de Bamako	143

Table des matières

Liste des tableaux.....	2
Liste des figures	3
Remerciements.....	11
Résumé.....	14
Abstract.....	15
Introduction générale	17
Problématique de recherche	19
Hypothèses.....	19
Objectifs de la thèse	20
Organisation générale	21
1. État de l'art sur la performance acoustique des bâtiments à proximité des aéroports	23
1.1 Introduction	23
1.2 Bâtiment à proximité de l'aéroport et le bruit de l'aéroport	24
1.2.1 Bâtiment à proximité de l'aéroport	24
1.2.2 Mesures de réduction d'exposition au bruit.....	26
1.2.3 Gestion et évaluation de bruit à proximité de l'aéroport.....	27
1.2.4 Perception des phénomènes sonores.....	30
1.2.4.1 L'évolution du bruit dans le temps	30
1.2.4.2 Niveau de pression acoustique	30
1.2.4.3 Indicateurs de gêne sonore.....	31
1.2.4.3.1 Descripteurs énergétiques intégrés.....	31
1.2.4.3.1.1 Niveau sonore équivalent.....	31
1.2.4.3.1.2 Niveaux sonores équivalents des différents moments	32
1.2.4.3.1.3 Niveaux sonores équivalents moyens	33
1.2.4.3.2 Descripteurs évènementiels.....	34
1.2.4.3.2.1 Niveau d'exposition au bruit.....	34
1.2.4.3.2.2 Le niveau acoustique fractile $L_{AN,t}$:	35
1.3 Performance acoustique du bâtiment	35
1.3.1 Condition du confort acoustique.....	36
1.3.2 Choix des matériaux	36
1.3.3 La transmission acoustique par la façade	37
1.3.4 Loi de masse.....	37
1.3.5 Principe de double paroi.....	39
1.3.6 Principe d'étanchéité	40

1.3.7	<i>Indice d'affaiblissement acoustique du bâtiment avec les portes et les fenêtres fermées à l'égard du bruit des avions</i>	40
1.3.8	<i>Isolements acoustiques relatifs aux bruits aériens</i>	42
1.3.9	<i>Isolement acoustique standardisé DnT</i>	42
1.3.10	<i>Isolements acoustiques standardisés pondérés</i>	42
1.3.11	<i>Réverbération et durée de réverbération</i>	43
1.4	Conclusion	43
2.	État de l'art sur la performance thermique du bâtiment	45
2.1	Introduction	45
2.2	Contexte énergétique	46
2.3	Un bref aperçu du concept d'architecture bioclimatique	46
2.3.1	<i>Principe bioclimatique</i>	47
2.3.1.1	Orientation des façades	48
2.3.1.2	Effet et influence de l'orientation et sur le confort hygrothermique	49
2.3.1.3	Isolation de l'enveloppe thermique du bâtiment	51
2.3.1.4	Ouverture et l'emplacement des fenêtres	52
2.3.1.5	Infiltration et étanchéité	52
2.3.1.6	Inertie thermique	52
2.3.1.6.1	Diffusivité thermique	53
2.3.1.6.2	Effusivité thermique	53
2.3.1.7	Classification des climats	54
2.3.1.8	Climat et diagrammes bioclimatiques	56
2.3.2	<i>Stratégies architecturales bioclimatiques</i>	57
2.3.2.1	Confort et zones de confort admissibles	58
2.3.2.2	Chauffage solaire passif	58
2.3.2.3	Humidification	59
2.3.2.4	Protection solaire	60
2.3.2.5	Refroidissement à travers une masse thermique élevée	61
2.3.2.6	Refroidissement par évaporation	61
2.3.2.7	Refroidissement par haute masse thermique avec rénovation nocturne	62
2.3.2.8	Refroidissement par ventilation naturelle et mécanique	62
2.3.2.9	Climatisation	63
2.4	Aperçu sur l'architecture et l'urbanisation au Mali	64
2.4.1	<i>Aperçu sur l'architecture</i>	64
2.4.2	<i>Aperçu sur l'urbanisation</i>	67
2.5	Qualité de performance de ces logements sociaux	71

2.6	Conclusion	73
3.	Méthodologie d'évaluation des risques dans les bâtiments performants	75
3.1	Introduction.....	75
3.2	Notions de risque	75
3.3	Quelques définitions sur la conceptualisation du risque	76
3.4	Le retour d'expérience (REX).....	77
3.4.1	<i>La classification de REX</i>	78
3.4.2	<i>Événements positifs et négatifs</i>	78
3.5	Concept de connaissance	79
3.6	Approche sur la méthode d'évaluation de risques	80
3.7	Description de la méthode d'évaluation et d'analyse de risque	81
3.7.1	<i>Gestion des risques</i>	83
3.7.2	<i>Hiérarchisation</i>	84
3.8	Conclusion	85
4.	Évaluation des risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports	87
4.1	Introduction.....	87
4.2	Description de l'aéroport et zone aéroportuaire de Bamako.....	88
4.3	Étude de cas : Évaluation de risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports de Bamako	91
4.3.1	<i>Présentation de l'étude de cas</i>	91
4.3.2	<i>Cadre des enquêtes in situ</i>	92
4.3.2.1	Enquêtes auprès des habitants.....	92
4.3.2.1.1	Déroulement de l'enquête	92
4.3.2.1.2	Résultats et discussions.....	93
4.3.2.2	Enquêtes auprès des acteurs de la construction.....	95
4.3.2.2.1	Déroulement de l'enquête	95
4.3.2.2.2	Résultats et discussions.....	96
4.3.3	<i>Mesures acoustiques in situ</i>	97
4.3.3.1	Résultats et interprétations.....	99
4.3.3.1.1	Les niveaux de pression acoustique de trafics aériens perçus à l'extérieur et l'intérieur du bâtiment.....	99
4.3.3.1.2	Les niveaux sonores équivalents.....	103
4.3.3.1.3	Les niveaux d'exposition aux bruits des avions.....	104
4.3.3.1.4	La performance acoustique du bâtiment test.....	106
4.3.3.2	Recommandations de solutions.....	108
4.3.3.2.1	Gestion du bruit à proximité des aéroports	108

4.3.3.2.2	Actions d'amélioration de la performance acoustique du bâtiment.....	109
4.3.3.3	Discussions	109
4.3.4	<i>Application de la méthode d'analyse et l'évaluation de risque</i>	110
4.3.4.1	Cas des risques liés à l'usage des portes et fenêtres.....	111
4.3.4.2	Cas des risques liés au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique sur le bâtiment.....	114
4.4	Conclusion	115
5.	Gestion et évaluation des risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques	118
5.1	Introduction.....	118
5.2	Étude de cas : Gestion et évaluation des risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques.....	119
5.2.1	<i>Présentation de l'étude de cas</i>	119
5.2.2	<i>Cadre général de l'enquête auprès des habitants</i>	121
5.2.2.1	Sélection et caractéristique des bâtiments.....	121
5.2.2.2	Déroulement de l'enquête auprès des habitants	121
5.2.2.3	Résultats et discussions.....	121
5.2.2.4	Synthèse	123
5.3	Enquêtes auprès des acteurs de construction	123
5.4	Évaluation des risques affectant la performance thermique du bâtiment.....	126
5.5	Application de la méthode d'analyse et l'évaluation de risque.....	126
5.5.1	<i>Cas de risque lié à l'orientation de certains logements</i>	126
5.5.2	<i>Cas de risque lié aux types d'ouvertures (portes et fenêtres)</i>	128
5.5.3	<i>Cas des risques sur l'isolation de l'enveloppe du bâtiment</i>	130
5.5.4	<i>Cas des risques liés à la taille des parcelles</i>	132
5.5.5	<i>Discussions</i>	133
5.6	Mesures climatiques sur le bâtiment test	134
5.6.1	<i>Protocole et déroulement des mesures</i>	134
5.6.2	<i>Calibrage des capteurs et exploitation des données</i>	135
5.6.3	<i>Techniques de déroulement des mesures</i>	136
5.6.4	<i>Analyse climatique de la ville de Bamako</i>	137
5.6.5	<i>Influence des données climatiques sur le confort thermique dans le bâtiment expérimental</i> 138	
5.6.5.1	Résultats et discussions.....	138
5.6.5.1.1	Extraits des données mesurées sur le bâtiment test.....	138
5.6.5.1.2	Extraits des données des degrés-jours de chauffage et de climatisation de la ville de Bamako	142

5.6.6 *Propositions de solutions pour l'amélioration du confort thermique au sein du bâtiment*
144

Conclusion générale et perspectives	147
Annexe 1	151
Annexe 2	153
Annexe 3	155
Références bibliographiques	157
Bibliographie de l'auteur	165

Remerciements

Les résultats de ces travaux de recherches, réalisés pendant trois ans, sont le fruit d'une thèse en cotutelle entre le Laboratoire Génie de Production de Tarbes (LGP) de l'Institut Polytechnique de Toulouse et le Laboratoire du Centre de Calcul de Modélisation et de Simulation (CCMS) de l'Université des Sciences Technique et des Technologies de Bamako. Un travail de recherche doctorale financé par le Service d'Action Culturelle SCAC de l'Ambassade de la France au Mali en collaboration avec le Gouvernement malien.

Je tiens donc à remercier l'Ambassade de la France au Mali pour le financement de mes séjours scientifiques en France.

Je suis très reconnaissant à tout le personnel de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes pour leur accueil et accompagnement durant tout le temps de mon séjour au Laboratoire Génie de Production (LGP).

Je remercie, l'administration de l'École Normale Supérieure de Bamako pour le soutien matériel et financier. Aussi voudrais-je remercier particulièrement mes collègues du Département d'Enseignement et de Recherches de Physique et Chimie pour leur soutien et encouragement. Je remercie sincèrement mes encadrants, **Monsieur Bernard KAMSU FOGUEM**, Enseignant-Chercheur Habilité à Diriger les Recherches (HDR) à l'ENI de Tarbes et **Monsieur Badié DIOURTE**, Professeur à la Faculté des Sciences Techniques pour leurs conseils précieux, leur disponibilité pour l'aboutissement de ce travail. J'ai beaucoup appris de votre rigueur et votre esprit scientifique.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Messieurs Jean Pierre FAYE et Fabien DUCO** qui tous enseignant-chercheur à l'ENI de Tarbes pour leurs apports très précieux dans la réalisation de mes travaux.

Je remercie, **Monsieur Blaise NSOM**, Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale et **Monsieur Moussa Magara TRAORÉ**, Professeur à l'École Normale d'Enseignement Technique et Professionnel de Bamako pour avoir accepté d'apprécier ce travail en tant que rapporteurs, ainsi que **Madame Nadia SAIYOURI** Professeur à l'Université de Bordeaux et **Monsieur Abdallah HABBADI** enseignant-chercheur à l'ENI de Tarbes pour avoir accepté de juger en qualité de membres du jury.

Je remercie, **Monsieur Moussa DOUMBIA**, Docteur en Architecture, Consultant Expert Immobilier et **Monsieur Mahamadou Alassane MAIGA**, Docteur en Acoustique, tous à l'École Nationale d'Ingénierie Abderrahmane Baba Touré de Bamako (ENI-ABT) pour leurs contributions très précieuses à l'amélioration de mes travaux de recherches.

Mes remerciements à **Mesdames Eliane CASTA, Marie TEIXEIRA et Marie Cecile De BARROS** du secrétariat du Laboratoire Génie de Production (LGP) pour leurs accueils chaleureux et leurs disponibilités.

Je remercie **Messieurs Moussa Sory TRAORE, Oumar Hamadoun CISSE** pour la relecture de mon manuscrit de thèse et **Seydou Mohomodou MAIGA** pour la relecture de mes articles publiés en anglais.

Mes remerciements à tous mes collègues et amis doctorants du Laboratoire Génie de Production de Tarbes **Messieurs Abdoulaye DIAMOUTENE, Boukaye Boubacar TRAORE, Lassana COULIBALY, Solemane COULIBALY, Mamadou Bilo DOUMBOUYA, Shahriar BAKRANI et Alsane SENE** pour leur bel esprit d'équipe.

Un grand merci à mon "Grin" de belote à Faladié et à toute l'École Prestige, le Quartier Général, où après le jeu, l'on défait et refait l'actualité nationale et internationale. Merci pour le soutien et la bonne humeur de tous les jours.

Je ne saurais terminer sans exprimer ma profonde gratitude à ma femme **Madame CAMARA Aïssetou KEITA** et à mes enfants pour leur patience et encouragements durant ces longues années d'absence.

Résumé

Dans les pays en voie de développement, le rythme croissant de l'urbanisation entraîne un rapprochement rapide des habitations au plus près des infrastructures des transports (aéroports, aéro-gares). En plus de ces constats, à cause des conditions difficiles d'accès aux ressources énergétiques et l'inadéquation des techniques de construction avec le climat et l'environnement, les pays tropicaux doivent s'orienter vers les techniques favorisant l'utilisation du potentiel de construction durable (concepts passifs et bioclimatiques) afin de garantir les confort (aspects acoustique et thermique) des habitants au sein des bâtiments. Le potentiel de construction durable, actuellement faiblement exploré, est très important dans ces pays. Face à ces défis, le concept de bâtiment durable est l'une des meilleures alternatives pour tisser l'harmonie entre le bâtiment et son environnement.

Les techniques de construction durable passent par la connaissance parfaite du site, du climat local, les besoins de confort (aspects acoustique et thermique) des habitants. Dans le cadre de notre contribution à ces problématiques, une étude d'évaluation de risques affectant les performances des bâtiments a été initiée. Toutefois, la majeure partie des travaux qu'on retrouve dans la littérature se focalise sur l'utilisation des approches analytiques qui s'avèrent parfois insuffisantes, en l'absence de la prise en compte des réalités pratiques. Une méthodologie d'analyse et d'évaluation des risques affectant la performance dans les bâtiments et basée sur l'approche de capitalisation et d'exploitation des connaissances issues des processus de retour d'expérience est développée. Deux bâtiments tests (un bâtiment aéroportuaire et un bâtiment résidentiel du type F3B) sont choisis à Bamako afin d'appliquer la méthode d'évaluation avec le concours des experts, des techniciens du secteur du bâtiment et des usagers. Pour le premier bâtiment, l'évaluation est relative aux risques affectant la performance acoustique dans le contexte aéroportuaire tandis pour le second, elle est relative aux risques affectant la performance énergétique dans le contexte bioclimatique. L'effort se concentre sur l'identification des non-qualités et des facteurs d'inconfort dont la résolution contribue à améliorer la performance acoustique, énergétique et environnementale des bâtiments. Pour ce faire, des visites de terrain (enquêtes auprès des usagers des bâtiments et interviews auprès des acteurs de la construction) ont été réalisées pour identifier d'une part les besoins et le comportement des habitants et d'autre part les techniques et les connaissances pratiques des acteurs de construction. Des fiches de questionnaires ainsi que des capteurs de mesures in situ (thermomètres, hygromètres et sonomètres) et des logiciels de traitements de données sont utilisés comme outils pour l'évaluation de risques affectant les performances sur les bâtiments tests. Des investigations sous forme de mesures in situ des paramètres (de températures, d'humidité et de niveaux de pression acoustique) respectivement à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment aéroportuaire et du bâtiment résidentiel du type F3B sont menées à l'aide de ces capteurs. Ces données sont ensuite traitées à l'aide des logiciels de traitements de données pour intégrer les connaissances et stratégies de construction durable. La capitalisation des informations issues de ces études sert de retour d'expérience à travers des propositions de solutions correctives et de bonnes pratiques pour la résolution des problèmes de performance (les pathologies, les dommages, et les autres dysfonctionnements) observés sur les bâtiments.

Mots clés : Retour d'Expérience, Évaluation, Risques, Performance, Bâtiments bioclimatiques, Aéroportuaire.

Abstract

In developing countries, the growing importance of urbanization is bringing housing closer to transport infrastructure (airports, air terminals). Beside these observations, the difficult conditions of access to energy resources and the construction techniques inadequacy with the climate and the environment must enable tropical countries to move towards lasting potential construction techniques and use (passive, bioclimatic concepts) in order to guarantee the comfort (acoustic, thermal) of the inhabitants within the buildings. The sustainable construction potential, poorly explored, is very important in these countries. In the face of these challenges, the lasting buildings concept is one of the best alternatives for weaving harmony between the building and its environment.

Lasting construction techniques go through a perfect knowledge of the site, the local climate and the inhabitants needs of comfort (acoustic, thermal). As part of our contribution to these issues, a risk assessment study and risk factors for building performance are initiated. However, most of the literature works focuses on the analytical approaches use that are sometimes insufficient, in the absence of taking into account practical realities. An analysis and assessment of risk performance methodology in buildings based on the capitalization and knowledge exploitation approach from return experience processes is developed. Two test buildings (an airport building and a F3B type residential building) are chosen in Bamako in order to apply the evaluation method with experts' assistance, building technicians and users. For the first building, the assessment is relative to acoustic performance risks in the airport context while for the second; it relative to energy performance risks in the bioclimatic context. The effort focuses on the identification of non-qualities and the discomfort factors whose resolution contributes to improving the building acoustic, energy and environmental performance. To do this, field visits (surveys with building users and interviews with construction stakeholders) were conducted to identify on the one hand the residents' needs and behavior and on the other hand, the construction actors' techniques and practical knowledge. Questionnaire forms as well as measuring sensors in-situ (thermometers, hygrometers and sound level meter) and data processing software are used as tools for the performance risks assessment on test buildings.

Investigations in the form of in-situ measurements, parameters (temperature, humidity and sound pressure levels) respectively inside and outside the airport and residential building type F3B are carried out with these sensors. These data are then treated with data processing software to integrate lasting construction knowledge and strategies. The capitalization of the information from these studies serves as experience feedback through corrective solutions propositions and good practices for the performance problems resolution (pathologies, damages, and others dysfunctions) observed on buildings.

Keywords: Experience feedback, Evaluation, Risks, Performance, Bioclimatic Buildings, and Airport.

Introduction générale

Au cours du XX^e siècle, le monde a évolué avec une augmentation de l'activité économique et un accroissement de la population dû aux progrès fantastiques de la longévité « transition démographique ». Selon les estimations, la population mondiale atteindra 9,8 milliards d'habitants en 2050 [ONU rapport, 2017] ; l'activité économique mondiale sera quintuplée d'ici 2056 et la consommation mondiale d'énergie sera presque triplée [Ilha et al., 2009]. Ce choc démographique entraînera, d'une part, une forte demande de logements dans les régions urbaines et d'autre part, le développement des activités liées aux commerces et transports (les aéroports, les gares et les auto-gares...). Nous constatons un rapprochement progressif des habitations et des entreprises aux zones aéroportuaires dans les grandes villes. L'extension des infrastructures aéroportuaires et le rapprochement rapide des habitations de ces infrastructures créent des gênes aux populations riveraines (nuisances sonores, pollution de l'air, etc.). Ces gênes peuvent apporter un inconfort sur la qualité de vie des populations. Il a été constaté par des études antérieures que ces nuisances et gaz polluants puissent être à l'origine des maladies respiratoires ou cardiovasculaires [Janssen et al., 2014].

Dans les grandes villes, les impacts environnementaux engendrés par les activités de commerce, de transports sur les habitats et à la forte consommation d'énergie dans les bâtiments sont dus à l'inadaptation des techniques et des matériaux de construction aux conditions du climat local, et à l'utilisation d'équipements très énergivores. Un constat très inquiétant surtout dans les bâtiments au voisinage des aéroports dans les pays à climat tropical chaud comme le Mali qui est un pays ensoleillé et qui compte près de 300 jours d'ensoleillement par an avec des températures de 30 à 45°C à l'ombre. Le réchauffement climatique contribue à l'augmentation des températures qui aggrave les conditions d'inconfort et le besoin croissant en énergie pour la climatisation et la ventilation des bâtiments. Aussi la zone aéroportuaire de la capitale Bamako est devenue une zone urbaine habitée depuis quelques années par une partie de la population. Compte tenu du fort trafic de l'aéroport de Bamako (carrefour d'Afrique de l'Ouest) et sa proximité avec la base aérienne 101 de l'armée malienne, le rapprochement des maisons d'habitation de l'aéroport doit susciter l'attention des autorités et les scientifiques sur la sécurité, l'efficacité énergétique et acoustique des bâtiments pour un meilleur cadre de vie des occupants et de l'environnement.

Dans ce travail de recherche, nous procédons à l'évaluation des facteurs de risques (non-qualités, ou pathologies) qui affectent la performance du bâtiment. La résolution de ces problèmes contribue à améliorer la performance thermique, acoustique et environnementale des bâtiments. Il s'agit également de proposer les retours d'expériences aux acteurs de construction de futurs projets de constructions ou de rénovations.

Pour ce faire, une évaluation objective est menée ; cette évaluation consiste à faire des mesures in situ à l'aide des capteurs des paramètres climatiques, acoustiques (température de l'air, humidité relative, pression, niveau de pression acoustique) à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment test. Une autre évaluation (évaluation subjective) sous forme de questionnaires et d'entretiens adressés respectivement aux habitants et aux acteurs de construction des bâtiments est réalisée. Les données issues de ces différentes étapes sont traitées à l'aide de logiciels appropriés, et une méthode d'évaluation est proposée afin de capitaliser des connaissances et des stratégies d'efficacité acoustique, énergétique et environnementale.

Dans ce travail de recherche, nous nous fixons comme objectif de proposer une méthode d'évaluation de risques qui affectent la performance du bâtiment. Cette méthode d'évaluation s'appuie sur les connaissances pratiques (maîtrise du domaine) des acteurs de construction dans le processus d'évaluation des risques ou facteurs de risques (les désordres, les non-qualités et pathologies) affectant la performance du bâtiment. Pour aboutir à cet objectif, nous structurons le document en cinq chapitres.

Le premier chapitre développe la première partie de l'état de l'art qui passe en revue les différentes composantes liées à la problématique que nous nous sommes fixée. Ce chapitre est divisé en deux sections. La section 1 se focalise plus précisément sur le bruit du trafic aérien, l'évaluation et la gestion de bruit à proximité de l'aéroport (la perception des phénomènes sonores, les indicateurs de gênes et de gestion de nuisance sonore, les descripteurs énergétiques intégrés, et les descripteurs événementiels). La section 2 est consacrée au concept de l'acoustique du bâtiment. Dans cette section, il est notamment présenté les conditions du confort acoustique, la transmission acoustique par la façade (principe de masse, principe de double paroi, et principe d'étanchéité) et l'indice d'affaiblissement acoustique du bâtiment avec les portes et les fenêtres fermées à l'égard du bruit des avions (isolements acoustiques relatifs aux bruits aériens, isolement acoustique standardisé D_nT , et isolements acoustiques standardisés pondérés). Le second chapitre est relatif aux concepts de performance énergétique du bâtiment dans les zones à climat tropical chaud et sec. Dans cette partie, nous avons présenté le contexte énergétique du Mali, un bref aperçu du concept d'architecture bioclimatique, des notions sur l'orientation des façades du bâtiment, l'influence de l'orientation, le confort hygrothermique, l'isolation de l'enveloppe thermique du bâtiment, l'ouverture des fenêtres, l'infiltration, l'étanchéité à l'air, l'inertie thermique, la classification des climats et les stratégies architecturales bioclimatiques. Ce chapitre se termine par un aperçu sur l'architecture et l'urbanisation au Mali. Le troisième chapitre est relatif à la méthodologie adoptée. Dans ce chapitre, nous donnons quelques notions sur les risques (définition et concept) et développons la méthode d'évaluation de risques et facteurs de risques qui affectent la performance des bâtiments. Le quatrième chapitre décrit une étude de cas sur l'évaluation de risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports. Le cinquième chapitre détaille une étude de cas relative à la gestion et à l'évaluation de risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques. Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

Problématique de recherche

Aujourd'hui, le concept de construction durable des bâtiments est devenu l'un des grands enjeux de la transition énergétique. Dans les pays en voie de développement, de nombreux bâtiments subissent des nuisances sonores dues au rapprochement des habitations des infrastructures de transports (aéroports, et gares ferroviaires). En plus de cela, la consommation énergétique du secteur du bâtiment de ces pays notamment ceux ayant des climats tropicaux contribue plus que tous autres secteurs au changement climatique. Sans mesures et réactions rapides, les nouveaux bâtiments de faible performance énergétique, acoustique et environnementale seront toujours ajoutés à des millions de bâtiments existants. Pour contribuer à la résolution de ces problématiques, nous avons mené une étude dont le thème s'intitule « Retour d'expérience pour l'évaluation de risques dans les bâtiments performants en zone aéroportuaire ». Il s'agit d'une part d'identifier et d'évaluer les risques et facteurs de risques qui affectent les performances (énergétique et acoustique) des bâtiments afin de proposer des solutions à ces pathologies et aux problèmes d'inconforts constatés. Ces risques et facteurs sous-jacents sont liés aux choix des matériaux et aux techniques de réalisation des bâtiments (mauvaises pratiques des acteurs de construction). Le travail consiste à définir et à évaluer les risques et facteurs de risques affectant les performances acoustiques et énergétiques respectivement dans le contexte aéroportuaire en climat tropical. Dans la démarche de conception durable, l'évaluation de la performance d'un bâtiment ne doit pas être basée principalement sur la consommation énergétique du bâtiment durant son exploitation tout en ignorant les autres aspects de la vie du bâtiment tels que les confort sonores et visuels qui sont importants. En plus du confort thermique, nous souhaitons considérer tous les autres aspects qui peuvent améliorer de façon globale le confort des usagers au sein du bâtiment. De ce fait, une vision holistique et quantitative basée sur l'évaluation de risques et facteurs de risques qui perturbent la performance pour une conception durable sera développée. Des études sont donc menées sur les bâtiments des zones aéroportuaires à travers des visites de terrains (enquêtes auprès des usagers, et interviews des acteurs de la construction et des mesures in situ des paramètres influençant les confort acoustiques et thermiques). Les résultats issus de ces études peuvent servir de retours d'expériences qui permettent aux concepteurs d'explorer de manière échelonnée les décisions associées à chaque étape du processus de raisonnement, tout en structurant la 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 de bâtiments durables tout au long des phases des projets de construction et de rénovations.

Hypothèses

L'urbanisation galopante des grandes villes entraînera un rapprochement des habitations des infrastructures aéroportuaires dans beaucoup de pays. Ces habitations subissent les nuisances sonores du trafic aérien des avions. Le niveau de bruit des avions est relativement élevé et la répétition des bruits de vol, surtout la nuit, a une incidence importante sur l'environnement [Jagniatinskis A et al., 2016]. Des mesures de précautions sont donc nécessaires pour un meilleur

cadre de vie des habitants. Par exemple, pendant la nuit, il est nécessaire de ne pas dépasser le niveau de 50 dB(A). Aussi pour une intensité de 5 vols par heure, les événements ne doivent pas dépasser 78,0 dB(A). Ces approches ainsi que d'autres mesures permettent d'optimiser la valeur du niveau équivalent annuel au cours de la période d'évaluation en raison de l'utilisation d'aéronefs plus silencieux et de la diminution du nombre d'événements de bruit de vol. En plus de ces constats relatifs aux problèmes de gestion de bruit, les bâtiments des projets de logements sociaux à Bamako (zone à climat tropical chaud) sont soumis à des sollicitations thermiques importantes. Vu les techniques et les matériaux de construction utilisés, le niveau de confort thermique au sein des bâtiments de logements sociaux laisse à désirer. L'étude de ces problématiques sur les habitats à Bamako nous a conduits à formuler les hypothèses suivantes :

- Le niveau de performance acoustique des bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako est faible pour un confort acoustique et une meilleure qualité de vie des usagers ;
- Certaines constructions se trouvent dans les zones autour de l'aéroport où le niveau de bruit jour-nuit (L_{DN}) est très élevé pour les habitations ;
- Le niveau de performance thermique des bâtiments du projet des logements sociaux à Bamako est faible pour garantir un confort thermique et une meilleure qualité de vie des usagers ;
- Les techniques et les matériaux de construction utilisés sont inadaptés pour les exigences de performance que requièrent les bâtiments de ces zones ;
- Pour le confort des usagers et une performance environnementale, des alternatives acoustiques et énergétiques peuvent être préconisées.

Objectifs de la thèse

Objectifs généraux :

L'étude que l'on se propose de mener est motivée par la nécessité de procéder à une évaluation de facteurs de risques qui affectent la performance des bâtiments dans le contexte aéroportuaire d'une part et bioclimatique d'autre part. Une méthode analytique est basée sur l'évaluation des techniques de construction à partir de l'application des connaissances pratiques (maîtrise du domaine) des acteurs de construction dans le processus d'évaluation. La principale préoccupation est de mettre en évidence les non-qualités, les forces et les faiblesses des pratiques de construction dont la résolution permet de satisfaire le besoin de confort (volets acoustique et thermique) et un meilleur cadre de vie des usagers. Pour ce faire, l'effort est mis sur des visites de terrains (chantiers, et bâtiments en phase d'utilisation) pour les observations, les enquêtes et les mesures in situ des paramètres relatifs aux indicateurs de performance (aspects acoustiques, et thermiques). Nous tentons donc d'expertiser tout en proposant des solutions pratiques et des mesures correctives qui garantissent le confort des usagers. Ainsi nous essayons de :

- Fournir aux acteurs de construction, une procédure d'insonorisation des bâtiments de la zone aéroportuaire afin d'en faciliter la mise en œuvre et d'en optimiser les résultats sur le plan technique ;
- Formuler un cadre méthodologique de recherche basé sur l'évaluation et la gestion des risques à partir des connaissances sur les risques affectant la performance thermique,

acoustique et environnementale des bâtiments des zones aéroportuaires afin d'améliorer les conditions de vie des populations ;

- Envisager des solutions en vue de diminuer les impacts de la pollution sur l'environnement.

Objectifs spécifiques :

Les investigations, qui fixent l'objet de ces études, permettent d'apporter des propositions tangibles dans un contexte architectural pour maintenir une harmonie permanente entre modernités, patrimoine local et réalités environnementales. La prise en compte de ces techniques permettra d'améliorer le cadre de vie des usagers. Dans cette étude, nos objectifs spécifiques consistent à :

- ✓ adopter des connaissances contextuelles au processus de construction de durabilité ;
- ✓ évaluer, analyser des données acoustiques et thermiques issues des mesures in situ pour le confort des habitants et la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments ;
- ✓ modéliser un retour d'expérience pour le partage des connaissances et de la pérennité du système proposé ;
- ✓ attirer l'attention des décideurs politiques sur les nuisances acoustiques et environnementales dues à la proximité de l'aéroport.

Organisation générale

Cette étude est le résultat d'un travail effectué en plusieurs étapes incluant l'observation sur les chantiers, les enquêtes auprès des acteurs de construction et des usagers des bâtiments et les campagnes de mesures in situ sur les bâtiments tests.

Elle se résume en une réflexion fondamentale autour de plusieurs questions que nous nous sommes posées sur les bâtiments (dans le contexte aéroportuaire et bioclimatique).

Cette thèse comprend cinq chapitres :

- le chapitre 1 développe la première partie de l'état de l'art.
Dans la première partie, nous avons présenté les notions de base de l'acoustique architecturale, les notions de bruit et les indicateurs de gênes et d'expositions, et les indices de performance acoustiques du bâtiment. Ensuite, dans la seconde partie, nous abordons les stratégies pour le confort acoustique, l'isolation et la correction acoustique du bâtiment.
- le chapitre 2 présente la seconde partie de l'état de l'art. Dans cette partie, le contexte énergétique du Mali a été détaillé. Aussi les notions de performance thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments ont-elles été développées dans le contexte bioclimatique, un aperçu de l'architecture et de l'urbanisation à Bamako.
- le chapitre 3 détaille la méthodologie adoptée. Nous y présentons la méthodologie d'évaluation de risques et facteurs de risques qui affectent la performance des bâtiments expérimentaux.
- le chapitre 4 décrit une étude de cas sur l'évaluation de risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports.
- le chapitre 5 décrit une étude de cas relative à la gestion et l'évaluation de risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 : État de l'art sur la performance acoustique des bâtiments à proximité des aéroports

1. État de l'art sur la performance acoustique des bâtiments à proximité des aéroports

1.1 Introduction

La demande de transport aérien commercial devrait croître à un taux annuel moyen de 4,5 à 5% [ICAO, 2007] au cours des deux prochaines décennies. Un tel développement devrait créer une pression supplémentaire sur l'espace aérien et la capacité aéroportuaire existants et potentiels. L'un des plus grands problèmes auxquels sont confrontés les aéroports modernes est le bruit généré par le trafic aérien et l'impact de ce bruit sur ceux qui vivent à proximité, c'est-à-dire l'exposition au bruit [Netjasov, 2012]. Le bruit est un problème environnemental qui a des effets néfastes sur la vie quotidienne de nombreuses personnes. Selon de nombreux chercheurs dans ce domaine, le bruit des avions demeurera probablement la principale préoccupation des opérations, de la planification et de la conception des aéroports, principalement en raison de la plus grande sensibilité du public au bruit et à d'autres problèmes environnementaux [Ignaccolo M, 2000 ; Girvin, 2009]. Dans ces dernières décennies, l'évolution économique du monde est marquée par le développement des moyens de transport notamment le transport aérien. Ce développement est dû à la demande spectaculaire du transport des personnes et des biens d'une part et la croissance démographique des régions du monde d'autre part. Les conséquences de ces évolutions sont entre autres l'augmentation du bruit environnemental et l'atteinte à la qualité de vie des habitants des villes à proximité des aéroports. Ces constats sont évidents dans les capitales des pays africains. À Bamako, la croissance démographique de la ville entraîne une forte urbanisation et le développement des infrastructures de transports (les aéroports, les gares et les auto-gares ...). En effet on constate un rapprochement progressif des habitations et des entreprises de la zone aéroportuaire de Bamako. Une zone aéroportuaire qui commence à être habitée avec un rythme élevé depuis quelques années par une partie de la population. L'importance du trafic de l'aéroport de Bamako (carrefour d'Afrique de l'Ouest), la proximité de l'aéroport de la base aérienne 101 de l'armée malienne et les types de constructions inadaptés au climat local et aux réalités de la zone doivent susciter l'attention des autorités et des scientifiques sur la sécurité et la qualité de vie des occupants. Vu l'évolution de la démographie et de l'intensité du trafic (vols commerciaux et des missions de l'ONU au Mali), l'aéroport de Bamako a connu depuis 2014 des travaux d'extension de ces infrastructures (pistes, et terminaux). Selon les prévisions, des initiatives de projet d'agrandissement de l'aéroport doivent continuer. La réduction de l'impact environnemental, dû à la demande importante de trafic, entraîne de sérieux problèmes pour équilibrer les exigences d'expansion des aéroports [Arntzen et Simons, 2014]. De nos jours, les bruits et les fumées dégagées par les réacteurs des avions sont des problèmes particuliers lors de l'atterrissage et du décollage [Ignaccolo M, 2000]. Les impacts sonores sur les bâtiments et les populations de la zone aéroportuaire de Bamako sont des problèmes majeurs avec des conséquences directes sur la qualité de vie et l'état de santé des populations (nervosité, stress, sommeil contrarié et fatigue, otites, problèmes respiratoires, etc.). Des études menées par

certain auteurs [Janssen S.A et al., 2014; Ozkurt N et al., 2014 et Vogiatzis K, 2012] ont montré l'influence du bruit des avions sur le sommeil, les niveaux de stress, l'anxiété, la dépression, la morbidité psychologique, l'ennui, l'hypertension, les maladies coronariennes et respiratoires. La qualité de vie des habitants et la protection de l'environnement vis-à-vis des inconforts acoustiques et thermiques requièrent une technique de durabilité des constructions (efficacité acoustique et énergétique des bâtiments). Des techniques de construction adaptées à la zone permettent d'assurer un niveau de confort élevés et les préoccupations environnementales. Une alternative raisonnable à ces défis majeurs consiste à exploiter la nature et la zone de construction à travers une harmonie entre le bâtiment et son environnement d'une part et une évaluation efficace des performances acoustiques et énergétiques des bâtiments d'autre part. Pour ce faire, il faut des mesures appropriées telles que :

- le respect des zones interdites pour les constructions des habitations contre le bruit et la pollution (comme dans certains pays développés) ;
- le respect des exigences sur les techniques de réduction de la pollution (isolation acoustique des bâtiments [Ganic et al., 2015] ;
- l'utilisation des matériaux adéquats pour la construction des bâtiments dans les zones aéroportuaires ;
- le respect des procédures d'utilisation des terres [Ganic et al., 2015].

Une étude de cas dans le contexte aéroportuaire est menée sur des bâtiments existants dans la zone aéroportuaire de Bamako afin de vérifier l'application de ces mesures ou techniques et évaluer les risques et facteurs des performances acoustiques. La capitalisation des connaissances issues de ces études peut servir de retour d'expérience à travers la préconisation des bonnes pratiques et des solutions correctives et préventives pour des projets de construction et rénovation des bâtiments dans ces différentes zones.

1.2 Bâtiment à proximité de l'aéroport et le bruit de l'aéroport

1.2.1 Bâtiment à proximité de l'aéroport

Un aéroport est l'ensemble des infrastructures qui servent au traitement des passagers ou du fret aérien situé sur un aérodrome. Le bâtiment principal est, généralement, l'aérogare par où transitent les passagers (ou le fret) entre les moyens de transport au sol et les avions. Les activités de l'aéroport (les événements liés à l'atterrissage, le décollage, et le roulage d'entretien des avions) induisent le développement, mais engendrent aussi des nuisances sonores et atmosphériques. Vivre à côté d'un aéroport peut rapidement se transformer en cauchemar, car le bruit des avions intervient de façon prépondérante à proximité des aéroports. Les bâtiments à proximité sont donc exposés aux bruits engendrés par les trafics aériens à tout moment.

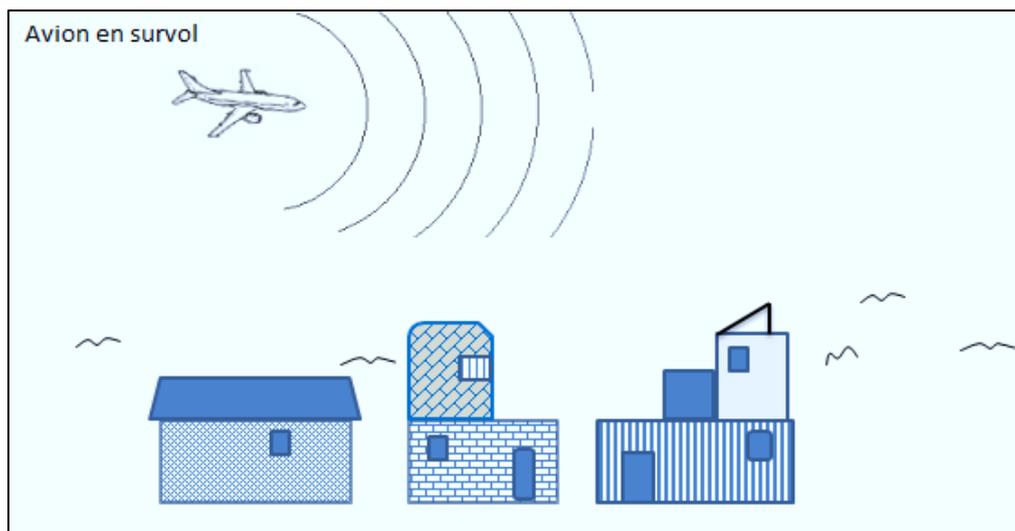


Figure 1.1 : Illustration des habitations survolées par un avion

Le bruit des avions est considéré comme moyennement gênant lorsque le niveau global durant la journée atteint ou dépasse 50 dB(A) à l'extérieur et 35 dB(A) à l'intérieur des habitations. La nuit, le bruit perturbe le sommeil pour des niveaux supérieurs à 30 dB(A) [Barbot B, 2008]. Le désagrément lié à l'écoute dépend de la distance entre les habitations et l'aéroport, aussi de la fréquence de passages des avions ou le nombre d'évènements. L'influence du niveau de bruit sur la gêne varie selon le nombre d'évènements [Vogt J, 2005], les habitants tolèrent mieux les situations avec beaucoup d'avions à faible niveau d'intensité comparativement à celles avec peu d'avions à fort niveau d'intensité sonore, le niveau maximum atteignant les 91 dB(A). Le niveau maximum des passages d'avions ne doit pas dépasser le seuil de niveau de bruit $L_{AE} = 80\text{dB(A)}$. Pour une quiétude des habitants des zones aéroportuaires, des mesures de restrictions à la gestion des nuisances sonores et à l'utilisation des terres dans les alentours doivent être adoptées. Parfois ces restrictions ne sont pas toujours respectées. Par exemple, dans certains cas, les communautés sont autorisées à vivre autour de l'aéroport et elles sont souvent ennuyées en raison du niveau élevé des émissions sonores des avions. Afin d'atténuer les impacts liés aux bruits des aéroports, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a adopté en octobre 2001 une résolution (résolution A33/7) qui définit les concepts d'approche équilibrée. Beaucoup de pays dans le monde suivent les lignes directrices de cette résolution visant à améliorer la gestion, le contrôle et l'atténuation du bruit des aéroports et de ses effets néfastes. Ces mesures efficaces pour réduire le bruit aérien s'appuient sur :

- les restrictions d'opérations : utiliser les avions les plus silencieux en période nocturne par exemple de (22H - 06H) ou (23H - 07H) ;
- l'aménagement, la planification du territoire et l'élaboration de cartes de prévisions d'ambiance sonore pour les aéroports afin de protéger à la fois les citoyens et les infrastructures ;
- l'interdiction de construire des résidences ou logements en zone d'ambiance sonore élevée ou exiger une insonorisation accrue contre le bruit extérieur provenant des aéronefs ;

- la mise en place de procédures d'opérations : pistes préférentielles, descente continue, interdiction ou restrictions de survols des zones résidentielles par des avions ou des hélicoptères effectuant des vols touristiques ;
- la combinaison de plusieurs de ces mesures.

1.2.2 Mesures de réduction d'exposition au bruit

Habiter à proximité des zones bruyantes (zones aéroportuaires, et zones industrielles) nécessite des mesures préventives ou de réduction d'exposition au bruit. Ces mesures sont relatives à la bonne gestion de bruit, aux conditions de contrôle de l'urbanisation et à l'aménagement de la zone. Ces mesures permettent de réduire l'exposition des habitations au bruit pour la quiétude et le meilleur cadre de vie des habitants. Contrairement à beaucoup de pays en Afrique, le Parlement et le Conseil de l'Union Européenne ont adopté en 2002 la directive 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement [CE, 2002]. Cette directive a pour objectif principal d'éviter, de prévenir ou de réduire en priorité les effets nuisibles y compris la gêne due à l'exposition au bruit dans l'environnement. Elle fixe comme objectifs de :

- détermination de l'exposition au bruit dans l'environnement au moyen de cartographies de bruit ou Plan d'Exposition au Bruit ;
- information du public en ce qui concerne le bruit dans l'environnement et ses effets ;
- adoption de plans d'action fondés sur les résultats des cartographies de bruit, notamment pour préserver la qualité de l'environnement sonore lorsque celle-ci est satisfaisante [CE, 2002].

Les cartographies de bruit doivent être réalisées pour les principales sources de bruit considérées séparément (transport routier, ferroviaire, aérien, et activités industrielles), pour les agglomérations, les grands axes de transport (routier et ferroviaire), ainsi que les grands aéroports. Les cartographies de bruit sont en quelque sorte une représentation de l'état acoustique moyen d'une zone donnée, et c'est l'indice L_{DEN} qui est utilisé pour représenter l'état d'exposition sonore [CE, 2002].

La planification et l'aménagement du territoire sont des mesures préventives de base à mettre en place par un zonage adéquat maintenu dans le temps. Dans les pays développés, l'installation de nouvelles populations dans des zones qui sont soumises à des nuisances sonores provenant du trafic aérien est réglementée par un document d'urbanisme (le Plan d'Exposition au Bruit, PEB). Au niveau des mairies, les cartes détaillées du Plan d'Exposition au Bruit sont annexées au Plan d'Occupation des Sols (POS) et au Plan Local d'Urbanisme (PLU). Ces plans organisent les constructions de logements neufs et leurs niveaux d'isolation acoustique. L'isolation acoustique ou l'insonorisation peut réduire le bruit à l'intérieur des lieux où habitent, travaillent ou se divertissent les personnes. En plus de l'isolation acoustique de l'enveloppe du bâtiment, il existe d'autres techniques préventives de l'exposition au bruit dès la conception des constructions à savoir :

- ✓ l'orientation du bâtiment ;
- ✓ l'agencement des pièces ;
- ✓ l'orientation des ouvertures ;
- ✓ la conception des balcons ;

- ✓ les constituants des façades (murs, toit, fenêtres, et portes) ;
- ✓ l'isolation intérieure, etc.

Les travaux d'insonorisation prévus pour les riverains tardent et la mise en place du dispositif est extrêmement longue [Barbot B, 2008]. À titre d'exemple, l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (ACNUSA) publie dans son rapport d'activité de 2006 [ACNU, 2006] qu'il faudrait au moins 50 ans pour insonoriser l'ensemble des habitations situées dans les 3 zones de forte exposition sonore.

1.2.3 Gestion et évaluation de bruit à proximité de l'aéroport

Le Plan d'Exposition au Bruit (PEB) définit des zones autour de l'aérodrome à partir de la gêne sonore susceptible d'être ressentie par les riverains au passage des avions. Les valeurs des indicateurs de gêne et de gestion des terres permettent de faire le zonage urbain autour de l'aéroport. Ces indicateurs de gêne sonore sont entre autres L_{Aeq} et L_{DEN} ou L_{DN} [Barbot B, 2008].

Les cartes de bruit sont établies au moyen des indicateurs de niveau sonore L_{DEN} ou L_{DN} (selon les pays). Ces indicateurs sont basés sur les niveaux de bruit équivalent L_{Aeq} , calculés ou mesurés sur des périodes différentes (jour, soirée et nuit) ou (jour et nuit). Les zones du PEB reflètent les limites des endroits d'exposition au bruit des avions sont classées à l'aide des indicateurs L_{DEN} ou L_{DN} à court, moyen et long terme. L'utilisation de ces indicateurs varie d'un pays à un autre. Ainsi le niveau L_{Aeq} est utilisé pour le zonage urbain au Brésil (ABNT NBR 10151, 2000). Toutefois, le zonage des aéroports est effectué à l'aide de la mesure L_{ND} (RBAC, 2011). Selon le Code des Régulations Fédérales 14 CFR 150 (2004), les États-Unis appliquent également la mesure L_{ND} pour le zonage des aéroports et certains pays européens préfèrent le niveau jour-soir-nuit L_{DEN} (Directive du Parlement européen 2002/49/CE).

L_{DN} est un niveau de pression acoustique pondéré A continu équivalent avec une addition de 10dB(A) pendant la nuit (ANSI S3.23, 1980). Le découpage jour/nuit est le suivant :

- La période du Jour est de 06H à 22H
- La période de la Nuit est de 22H à 06H (RBAC, 2011)

L_{DEN} est basé sur les niveaux de bruit équivalents L_{Aeq} , calculés ou mesurés sur les 3 périodes différentes en pondérant les niveaux de bruit pendant les soirées (+5dB(A)) et les nuits (+10dB(A)), périodes durant lesquelles plus de calme est exigé [Barbot B, 2008]. Le découpage jour/soirée/nuit est le suivant :

- La période du Jour est de 06H à 18H ;
- La période de la Soirée est de 18H à 22H ;
- La période de la Nuit est de 22H à 06H (Directive du Parlement Européen 2002/49/CE)

Le Plan d'Exposition au Bruit (PEB)

Le Plan d'Exposition au Bruit (PEB) permet de contrôler le bruit autour des aéroports. Pour ce faire, des organes de contrôle et régulation existent dans beaucoup de pays. En France, le bruit autour des aéroports est depuis 1999 (loi n°99-588) contrôlé par l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (ACNUSA) [Barbot B, 2008]. Cette autorité a un pouvoir de recommandation sur la mesure de certification du bruit des avions définie par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) sur la modification des trajectoires, l'évaluation et la maîtrise de la gêne sonore due au bruit des avions. Elle diffuse aussi des informations auprès du public, joue un rôle de médiation, et donne son avis sur les projets de Plan d'Exposition au Bruit (PEB) et de Plan de Gênes Sonores (PGS) autour des principaux aéroports. Le plan d'Exposition au Bruit (PEB) est codifié dans le Code de l'urbanisme. Il est utilisé pour limiter le développement des zones de construction autour des aéroports. Il prend en compte le nombre de mouvements, les trajectoires de circulation aérienne, l'évolution des flottes exploitées, la répartition du trafic entre jour, soirée et nuit et les infrastructures existantes autour des aéroports (voies routières et ferroviaires d'accès à la plate-forme). Il est établi à court, moyen et long terme. Au total, 4 zones d'expositions différentes sont définies en fonction des niveaux de bruit (voir figure 1.2) [Barbot B, 2008].

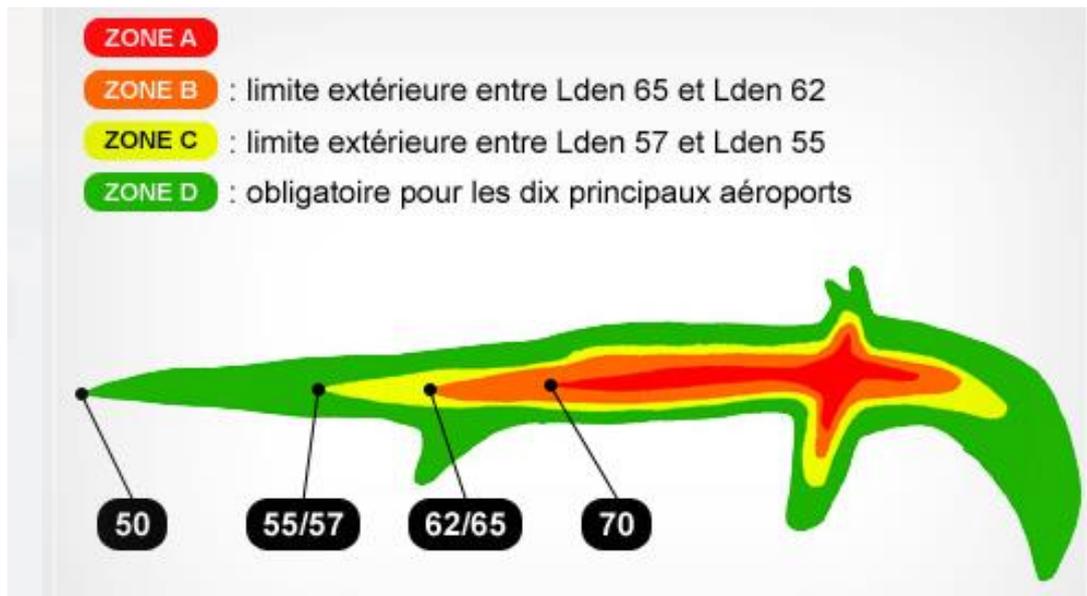


Figure 1.2 Exemple d'un Plan d'Exposition au Bruit (source : www.acnusa.fr)

Dans chacune des quatre zones de PEB (figure 1.2 ci-dessus), le contrat de location d'un immeuble à usage d'habitation doit comporter une clause claire et lisible précisant la zone de bruit où se trouve localisé le bien immobilier loué.

Dans la zone A et B, toute construction neuve à usage d'habitation et toute action sur le bâtiment existant tendant à accroître la capacité d'accueil sont, sauf rares exceptions, interdites. Dans la zone C, sont autorisées les constructions individuelles non groupées situées dans les secteurs déjà urbanisés et desservis par des équipements publics dès lors qu'elles n'entraînent qu'une

faible augmentation de la capacité d'accueil d'habitants exposés aux nuisances [ACNU, 2006]. La rénovation, la réhabilitation, l'amélioration, l'extension de bâtiments existants peuvent être admises lorsqu'elles n'entraînent pas une augmentation de la capacité d'accueil d'habitation exposée aux nuisances. La commission consultative de l'environnement examine tous les cinq ans au moins la pertinence des hypothèses ayant servi à l'établissement du plan au regard de l'activité aérienne constatée. Elle peut proposer à l'autorité compétente la mise en révision du PEB. Le tableau ci-dessous donne les règles applicables sur les droits à construire dans les zones d'un PEB.

Tableau 1-1 : les règles applicables sur les droits à construire dans les zones d'un PEB

Isolement acoustique normalisé $D_{n,T,A}$	Zone A Exposition très forte au bruit	Zone B Exposition forte au bruit	Zone C Exposition modérée au bruit	Zone D Exposition faible au bruit
Logements nécessaires à l'activité de l'aérodrome ou liés à celle-ci	Autorisés $\geq 45\text{dB}$	Autorisés $\geq 40\text{dB}$	Autorisés $\geq 35\text{dB}$	Autorisés $D_{n,T,A} \geq 30\text{dB}$
Logements nécessaires de fonction aux activités industrielles ou commerciales	Autorisés dans les secteurs déjà urbanisés $\geq 45\text{dB}$	Autorisés $\geq 40\text{dB}$	Autorisés $\geq 35\text{dB}$	
Immeubles d'habitation directement liés ou nécessaires à l'activité agricole				
Immeubles collectifs à usage d'habitation	Non autorisés		Non autorisés	
Habitat groupé (lotissement...) parcs résidentiels de loisirs				
Maisons non groupées individuelles				
Reconstructions d'habitations suite à des conditions en zone AB***			Autorisées sans accroissement de population exposée dans le respect des normes d'isolation phonique, le coût de l'isolation est à la charge du constructeur $\geq 35\text{dB}$	

1.2.4 Perception des phénomènes sonores

L'acoustique est un domaine de la physique qui étudie les sons et les notions de base en acoustique du bâtiment comme les phénomènes liés à la propagation du son, les phénomènes physiologiques de la perception sonore et la notion de gêne due au bruit ainsi que les indices de performance acoustiques de la construction. Le son est un phénomène physique qui correspond à une infime variation périodique de la pression de l'air en un point donné. Dans l'échelle des niveaux sonores, l'oreille humaine est capable de percevoir des sons compris entre 0 dB correspondant à la plus petite variation de pression qu'elle peut détecter 20 micro-Pascals (μPa) et 120 dB(A) correspondant au seuil de la douleur (20 Pa). Dans l'échelle des fréquences, les sons très graves ont des fréquences inférieures à 20 Hz (infrasons) et les sons très aigus ont des fréquences supérieures à 20 kHz (ultrasons). Ces différents sons ne sont pas perçus par l'oreille humaine qui est sensible à quatre caractéristiques d'un son (la force, la hauteur, le timbre et la durée) décrites ci-dessous [Herde A. De Liébard A, 1996-2004].

Tableau 1-2: Les caractéristiques du son

Perception	Échelles	Grandeurs physiques
Force sonore (pression acoustique)	Fort Faible	Intensité I Décibel (A)
Hauteur (son pur)	Aigu Grave	Fréquence F Hertz
Timbre (son complexe)	Aigu Grave	Spectre
Durée (laps de temps d'apparition)	Longue Brève	Durée Leq (niveau moyen équivalent)

1.2.4.1 L'évolution du bruit dans le temps

Le bruit des avions est un son indésirable qui peut causer un stress psychologique et physique aux habitants qui y sont exposés [Singh et Dev, 2010]. Le seuil de bruit est le niveau maximal de la limite du bruit autorisé dans l'environnement afin de ne pas provoquer de perturbation de la santé humaine et du confort environnemental [Sondakh D et al., 2014]. Les bruits d'avion ont un certain caractère aléatoire. Le niveau sonore de ces bruits tel qu'il est mesuré par un sonomètre correspond à une moyenne quadratique de la pression acoustique sur une certaine durée relativement courte (quelques secondes ou moins). Ce niveau global évolue au cours du temps (moyenne glissante).

1.2.4.2 Niveau de pression acoustique

La pression acoustique $P(t)$ exprimée en pascals (N.m^{-2}) varie avec le temps. On l'évalue généralement par la valeur quadratique moyenne des variations observées sur un temps T_i supérieur à une période (généralement de l'ordre de 0,1 ou 1s) appelée pression efficace P_{eff} .

$$P_{eff} = \left[\frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} P^2(t) dt \right]^2 = [P^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

La gamme des sons audibles est très large et l'usage d'une échelle logarithmique (échelle décibels) permet de représenter sur un même diagramme l'ensemble des valeurs de variation de pression. Cette échelle est définie par rapport au seuil de détection du système auditif $P_{ref} = 20\mu\text{Pa}$, de manière à fixer ce seuil à 0 dB [Barbot B, 2008]. En pratique, la pression sonore P n'est pas donnée par sa valeur absolue, mais par rapport à la quantité de référence P_{ref} qui est par convention la pression sonore pour un son pur à 1kHz au seuil d'audibilité moyenne. Le niveau de pression acoustique L_P s'exprime en décibel dB(A) [Ouis, 2001].

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^2 \text{ en dB(A)} \quad (2)$$

1.2.4.3 Indicateurs de gêne sonore

Le niveau énergétique exprimé en décibel est la grandeur utilisée pour la mesure du bruit à partir de laquelle sont calculés des indicateurs plus complexes qui modélisent la gêne ressentie. La gêne varie en fonction de l'heure et la nature de la source.

On distingue deux grandes catégories de descripteurs ou indicateurs de bruit à savoir les descripteurs énergétiques intégrés et descripteurs événementiels [Boukadoum A, 2012].

Les descripteurs énergétiques intégrés prennent en compte le cumul des bruits sur une période donnée et peuvent donc caractériser une exposition de long terme. Il s'agit :

- du niveau sonore équivalent pondéré A (L_{Aeq}) ;
- des composants du niveau de bruit jour-soir-nuit (L_{AeqD} , L_{AeqE} , L_{AeqN}) ;
- du niveau de bruit jour-nuit (L_{DN}) ou niveau de bruit jour-soir-nuit (L_{DEN}).

Les descripteurs événementiels (SEL et L_{max}) caractérisent un événement sonore et prennent en compte la caractéristique d'émergence forte de certains bruits (tels que ceux émis au passage des avions). Il s'agit :

- du niveau d'exposition au bruit SEL (Sound Exposure Level) ;
- du niveau maximum instantané (L_{max}).

1.2.4.3.1 Descripteurs énergétiques intégrés

1.2.4.3.1.1 Niveau sonore équivalent

Le niveau sonore équivalent ou la dose de bruit (noté $L_{eq,t}$) est régulièrement utilisé comme indicateur d'inconfort ou de gêne. Les niveaux sonores changent dans le temps, en raison de la variabilité des événements sonores en termes de durée, d'amplitude et de fréquence. Pour faire face à une telle variabilité, de nombreux règlements concernant les nuisances sonores dans les collectivités sont fondés sur le niveau sonore équivalent ($L_{eq,t}$) également recommandé par plusieurs normes internationales (par exemple ISO 1996 et ISO 3891). En effet, dans la pratique, on observe une bonne corrélation entre la valeur de ce niveau et la gêne auditive ressentie par un individu exposé au bruit. Le niveau acoustique équivalent correspond à une dose de bruit reçue pendant une durée de temps déterminée. Il est le résultat du calcul de l'intégrale des niveaux sonores relevés à intervalles de temps réguliers (échantillonnage de 1,2...n fois par seconde) et

pour une période donnée. L'équation pour l'événement-bruit L_{eq} est le suivant: [Sondakh D et al., 2014].

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\tilde{P}_{Aeff}}{\tilde{P}_{réf}} \right)^2 dt \right] = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} dt \right] \quad (3)$$

Avec

L_{eq} : le niveau sonore équivalent ; T : la période de durée correspondante aux mesures du bruit ;

L_{P_i} : le niveau de pression acoustique mesuré à chaque seconde.

Il y a beaucoup de mesures adoptées dans le monde entier pour évaluer le bruit des aéroports. Ces mesures sont basées non seulement sur le niveau sonore équivalent, mais aussi sur la durée et la répartition jour-nuit des événements [Bentes et Slama, 2011]. Pour une variation élémentaire $dt = 1$ seconde, l'équation du niveau sonore équivalent peut donc s'écrire :

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} \right] \quad (4)$$

1.2.4.3.1.2 Niveaux sonores équivalents des différents moments

Selon la directive des pays, la journée est découpée en différents moments (confère la section 1.1.3). Le sonomètre monté sur le bâtiment test mesure sans interruption le niveau de bruit. Les données sur une journée (soit 24 heures) permettent d'estimer le niveau sonore équivalent jour (L_{eqD}), niveau sonore équivalent soir (L_{eqE}) et le niveau sonore équivalent nuit (L_{eqN}). Les périodes de mesure des niveaux sonores équivalents :

- L_{eqD} et L_{eqN} selon la directive [RBAC, 2011](#) correspondent respectivement à (06H-22H) pour la période du jour et (22H- 06H) pour la période de nuit.
- L_{eqD} , L_{eqE} et L_{eqN} selon la [Directive du Parlement européen 2002/49/CE](#) correspondent respectivement à (06H-18H) pour la période du jour (18H-22H) pour la période du soir et (22H-06H) pour la période de nuit.

Les niveaux sonores équivalents pondérés L_{AeqD} et L_{AeqN} en fonction des durées périodes peuvent s'écrire :

$$L_{AeqD} = 10 \log \left[\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} \right] \quad (5a)$$

$$L_{AeqN} = 10 \log \left[\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} \right] \quad (5b)$$

Selon la directive ([RBAC, 2011](#)), la durée du jour est $T = 16H$ et celle de la nuit est $T = 8H$ [Sondakh D et al., 2014].

Les niveaux sonores équivalents pondérés L_{AeqD} , L_{AeqE} et L_{AeqN} en fonction des durées périodes s'écrivent :

$$L_{AeqD} = 10 \log \left[\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} 10^{\frac{L_{Pi}}{10}} \right] \quad (6a)$$

$$L_{AeqE} = 10 \log \left[\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 10^{\frac{L_{Pi}}{10}} \right] \quad (6b)$$

$$L_{AeqN} = 10 \log \left[\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 10^{\frac{L_{Pi}}{10}} \right] \quad (6c)$$

Selon la [Directive du Parlement Européen 2002/49/CE](#), la durée du jour, du soir et de la nuit sont respectivement $T = 12$ Heures, $T = 4$ Heures et $T = 8$ Heures.

1.2.4.3.1.3 Niveaux sonores équivalents moyens

Les niveaux sonores équivalents des différents moments permettent d'estimer les niveaux sonores équivalents moyens jour-nuit (L_{DN}) et jour-soir-nuit (L_{DEN}) autour de la zone aéroportuaire. Les équations (7) et (8) définissent les indicateurs L_{DN} et L_{DEN} du bruit perçu à proximité de l'aéroport de manière suivante :

$$L_{DN} = 10 \log \frac{1}{24} \left[\left(15 \times 10^{\frac{L_{AeqD}}{10}} + 90 \times 10^{\frac{L_{AeqN}}{10}} \right) \right] \quad (7)$$

$$L_{DEN} = 10 \log \frac{1}{24} \left[\left(12 \times 10^{\frac{L_{AeqD}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{AeqE}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{AeqN}+10}{10}} \right) \right] \quad (8)$$

La mesure du niveau de bruit jour-nuit L_{DN} est un indicateur important dans l'évaluation et la gestion des problèmes liés aux bruits perçus à proximité des aéroports. Elle permet de faire la corrélation avec le pourcentage de personnes hautement ennuyées [[Shultz T J, 1978](#)] et ainsi de prédire le degré de nuisances dû aux trafics aériens autour de la zone aéroportuaire. Les zones délicates au bruit autour des aéroports sont interdites à un niveau de bruit supérieur à 65dB (A), mais en pratique, des niveaux inférieurs peuvent également provoquer des ennuis. L'indicateur L_{DN} ne peut être considéré comme la seule limite entre les zones résidentielles et non résidentielles [[Slama et al., 2008](#)]. D'autres études ont été développées pour prédire la réponse humaine au bruit reliant la réaction de la communauté aux valeurs L_{DN} [[Fidell, 2003](#)]. Le bruit nocturne de l'aéroport peut augmenter la probabilité de perturbation de sommeil, ce qui pourrait être une cause de désagrément [[Slama et al., 2008](#)].

1.2.4.3.2 Descripteurs évènementiels

1.2.4.3.2.1 Niveau d'exposition au bruit

Le niveau d'exposition au bruit (SEL) correspond au niveau sonore perçu par les habitants lors du survol de la zone d'habitation du bâtiment test par les avions. La période T de survol de la zone d'habitation correspond à la différence ($t_2 - t_1$) où t_2 et t_1 sont respectivement les temps correspondants à l'intersection entre la courbe du niveau de pression acoustique mesuré et la droite d'équation ($L_{pmax} - 10\text{dB(A)}$) représentant le niveau de pression acoustique continu équivalent (Voir figure 1.3).

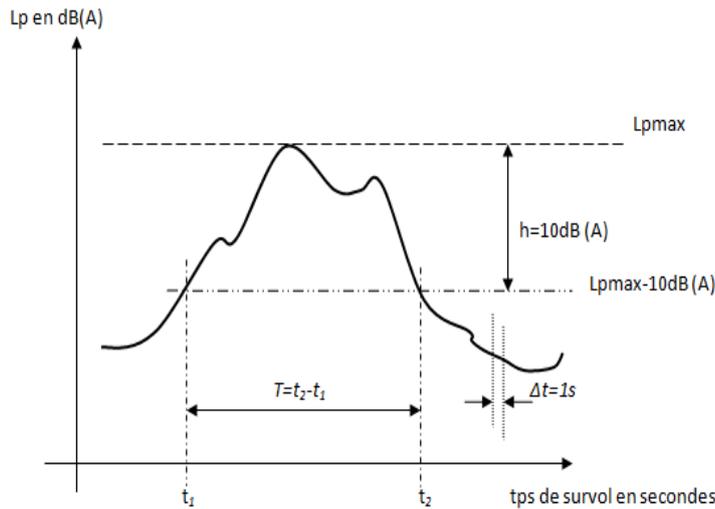


Figure 1.3 : Évolution du niveau sonore perçu pendant le passage d'un avion.

Le niveau sonore équivalent pondéré A notée $L_{Aeq,T}$ s'obtient sur l'intervalle de temps T par la relation suivante [Sondakh D et al., 2014] :

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{Pi}(t)}{10}} \right] \quad (9)$$

$L_{Aeq,T}$ est le niveau de pression acoustique d'un bruit stable qui donnerait la même énergie acoustique qu'un bruit à caractère fluctuant pendant un temps T .

En ce qui concerne des bruits non stationnaires, le niveau d'exposition au bruit SEL (Sound Exposure Level) reçu pendant la durée totale de l'événement acoustique est défini comme suit :

$$SEL = L_{Aeq,T} + 10 \log(T) \quad (10)$$

Le niveau d'exposition au bruit SEL intègre à la fois le niveau de bruit et la durée pendant laquelle le bruit est présent. Il est défini comme étant le niveau constant pendant une seconde ayant la même énergie acoustique que le son original perçu pendant une durée donnée. Cet indicateur acoustique est souvent utilisé pour quantifier l'énergie sonore d'un événement simple (passage d'un avion) et pour comparer entre eux les évènements sonores issus d'une même

source. Les niveaux L_{AeqT} et SEL sont considérés comme normes complémentaires au niveau L_{DN} pour faire la simulation du bruit acoustique à proximité de l'aéroport [Dinato et Schaal, 2014].

Sur le plan international, les niveaux SEL, L_{Aeq} et L_{max} sont des indicateurs utilisés directement pour mesurer l'effet du bruit des aéronefs sur les personnes autour de l'aéroport. Ces indicateurs sont particulièrement adaptés à la représentation de la signature acoustique du bruit des avions caractérisé par des émergences au passage des aéronefs [Júnior et al., 2012].

1.2.4.3.2.2 Le niveau acoustique fractile $L_{AN, t}$:

Le niveau acoustique fractile ($L_{AN, t}$), est le niveau de pression acoustique pondéré A dépassé pendant N % de l'intervalle de temps t considérée. Ainsi, le niveau acoustique L_{90} représente le niveau dépassé pendant 90 % du temps d'enregistrement [Pujol S, 2012].

Les principaux indicateurs utilisés sont :

L_1 : niveau de pression acoustique atteint ou dépassé pendant 1% du temps de la période choisie correspondant au bruit maximal ;

L_{10} : niveau atteint ou dépassé pendant 10% du temps correspondant au bruit de crête ;

L_{50} : niveau de pression médian définissant le bruit moyen ;

L_{90} : niveau caractérisant le bruit de fond.

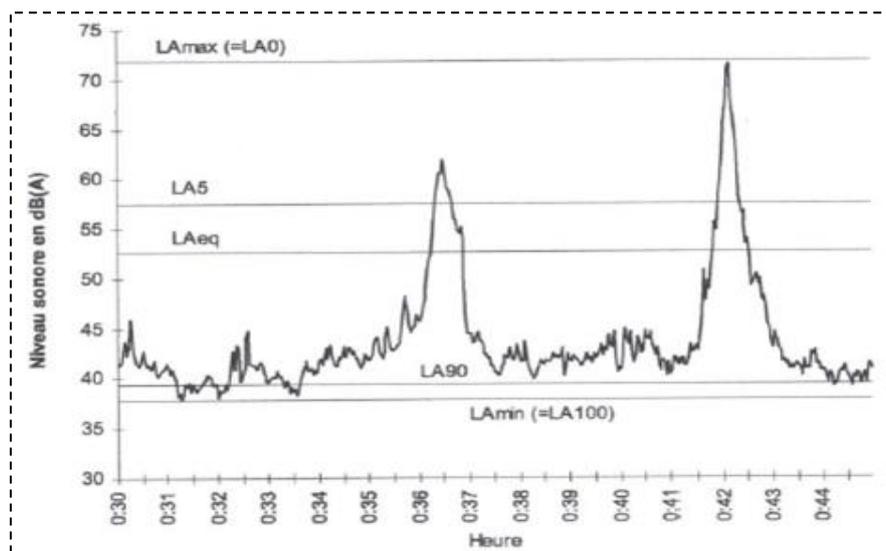


Figure 1.4 : Représentation des niveaux fractiles et du niveau équivalent

Les indicateurs de bruit, associés à des valeurs limites sont utilisés principalement dans les actions réglementaires nationales (zonage acoustique, création d'infrastructures de transport, construction de bâtiments, insonorisation de logements...).

1.3 Performance acoustique du bâtiment

L'acoustique du bâtiment est le domaine des Sciences physiques qui étudie la performance acoustique des constructions et des problèmes psychologiques liés à l'émission, la propagation et

la réception des bruits. La performance acoustique d'une maison dépend notamment de la constitution et de la qualité de ces éléments de façades.

1.3.1 Condition du confort acoustique

Pour obtenir un confort sonore à l'intérieur d'un espace aménagé, il faut distinguer :

- la correction acoustique ;
- l'isolation acoustique.

La correction acoustique consiste à maîtriser la réverbération sonore de sorte que les sons utiles et désirés puissent se propager correctement pour être facilement perçus.

L'isolation acoustique consiste à limiter la transmission des bruits en provenance de l'extérieur (moyens de transport, activités industrielles et commerciales, jeux et cris d'enfants...), des espaces adjacents (bruits aériens, bruits d'impact ou de chauffage, ventilation, ascenseur, etc.) [Lafarge, 2010].

Les niveaux acoustiques externes sont atténués par les propriétés acoustiques de l'isolant de la façade. Pour minimiser le niveau du bruit dans le bâtiment, il est nécessaire de procéder à une correction acoustique qui est surtout liée à l'aménagement intérieur en termes de matériaux absorbants. Les décisions de conception à prendre pour atteindre cette exigence n'ont pas un lien fort avec la performance énergétique du bâtiment. Les décisions de conception liées à l'isolation acoustique concernent la composition des surfaces délimitant un local : l'enveloppe du bâtiment, un élément clé dans sa performance thermique. Cependant, il ne faut donc pas confondre isolation et correction acoustique. Ces deux stratégies sont généralement indissociables pour obtenir un confort sonore, mais interviennent différemment pour ce qui est du mode opératoire (figure 1.5) [Lafarge, 2010].

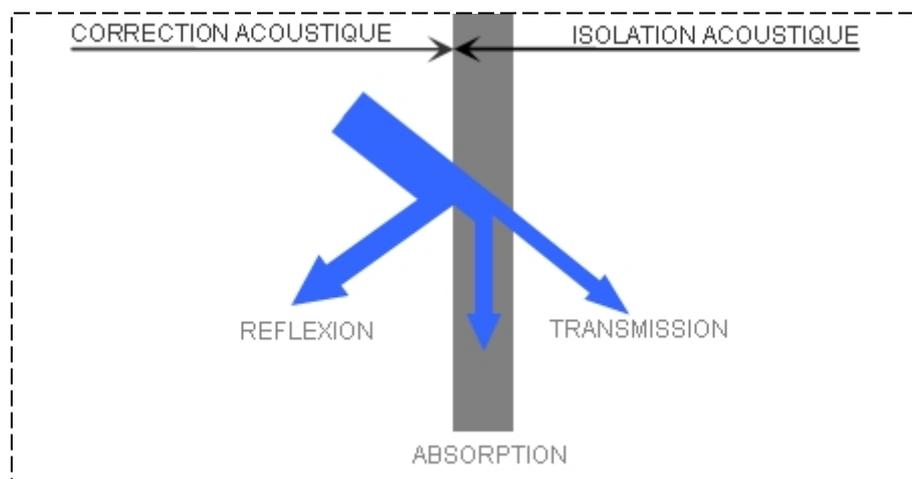


Figure 1.5: Isolation et correction acoustiques

(Source: <https://passionhifivintage.wordpress.com/2015/01/07/acoustique-notions-de-base/04/01/2017>)

1.3.2 Choix des matériaux

À la conception, il est recommandé de choisir des matériaux qui répondent à plusieurs fonctions, notamment dans le domaine acoustique (indice d'affaiblissement et coefficient d'absorption). Il faut noter qu'un matériau performant en acoustique est souvent un bon isolant thermique. Dans

tous les cas, il est recommandé de retenir des matériaux caractérisés par des coefficients d'absorption aussi élevés que possible, au moins dans les gammes de fréquences des bruits prévisibles engendrant l'exposition la plus forte [Boukadoum A, 2012].

Les revêtements épais et poreux absorbent les sons de haute et de basses fréquences. Exemples : feutre, caoutchouc-mousse, mousses de plastiques, fibres textiles, métaux frittés et céramiques. L'absorption des basses fréquences est améliorée par un coussin d'air derrière la matière absorbante.

1.3.3 La transmission acoustique par la façade

Les bruits aériens se propagent aussi à travers les trous, fissures et interstices que l'on appelle fuites sonores. Les bruits aériens se transmettent de l'extérieur du bâtiment vers l'intérieur ou d'un local à l'autre par les trois voies de transmission suivantes :

- Transmissions directes (TD) à travers les parois opaques (façade, paroi séparative, toiture, plancher et les baies) ;
- Transmissions latérales (TL) à travers les parois liées à la façade, à la paroi séparative, au plancher ;
- Transmissions parasites (TP) par les gaines techniques, VMC (entrée d'air, coffres de volets roulants, défauts d'exécution.... etc.) [Hamayon L, 2006]

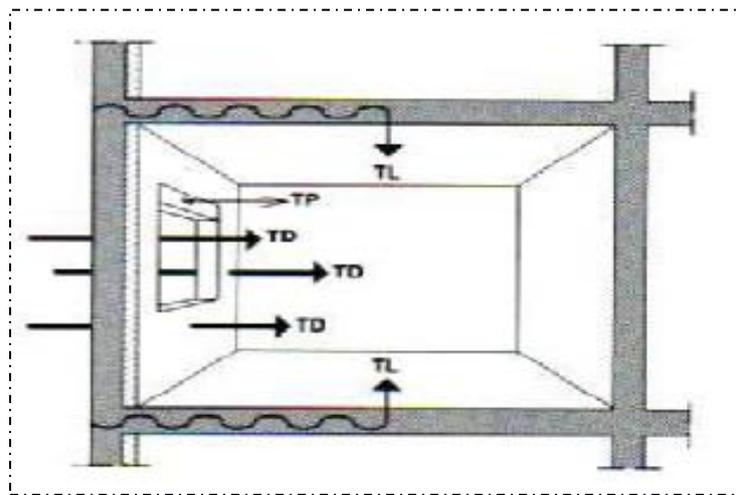


Figure 1.6: Modes de transmission des bruits aériens intérieurs et extérieurs.

1.3.4 Loi de masse

Les matériaux denses, massifs et lourds vibrent moins que les matériaux légers et minces. Un premier principe en matière d'isolation est celui de la « loi de masse » : plus un mur est lourd, plus il isole. Le fait de doubler la masse surfacique d'une paroi simple apporte en pratique une amélioration de l'indice d'affaiblissement de l'ordre de 4 dB(A). Parfois, il n'est pas possible de doubler indéfiniment la masse surfacique pour améliorer l'isolation acoustique pour des soucis de structure, de surface utile et de coût. La solution consiste à utiliser une paroi double qui a, en général, un indice d'affaiblissement acoustique supérieur à celui d'une paroi simple de même masse surfacique [Boukadoum A, 2012].

La figure 1.7 : présente les variations de l'indice d'affaiblissement de deux parois simples (épaisseur [e] courbe en noire, épaisseur [2e] courbe en bleue) en fonction de la fréquence du bruit. [<http://www.bpbplaco.com>]

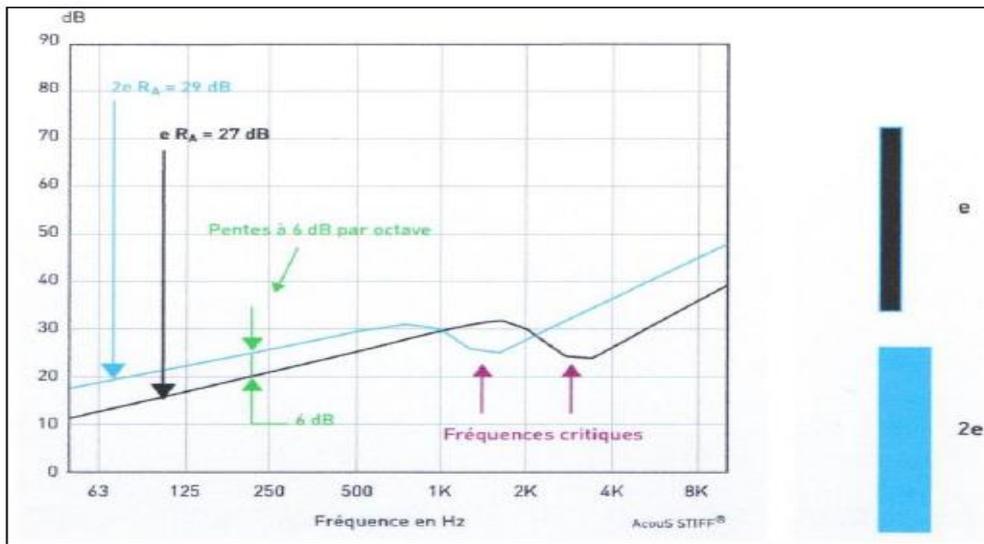


Figure 1.7: Illustration de la loi de masse

Les éléments de façade réalisés en maçonnerie ou en béton répondent, du point de vue acoustique, à la loi de masse. Ils ont un indice d'affaiblissement acoustique nettement supérieur à celui des fenêtres qui y sont insérées. Ces parois sont généralement complétées d'un doublage thermique intérieur ou extérieur qui, suivant la nature de l'isolant, améliore la protection acoustique (cas des isolants à cellules ouvertes tels que la laine minérale et les isolants plastifiés). Pour améliorer l'isolation acoustique des façades lourdes, il faut traiter plutôt ces portes (fenêtres et bouches d'entrées) au lieu des parties pleines (les murs) [Hamayon L, 2008].

Tableau 1-3: Exemples d'indices d'affaiblissement acoustique pondérés ($R_w + C_{tr}$) et ($R_w + C$) de murs extérieurs

Composition du mur extérieur	($R_w + C$) en dB(A)	($R_w + C_{tr}$) en dB(A)
Béton 16cm + PSE 80mm + PP 10mm	55	50
Béton 16cm + PSEE 80mm + PP 13mm	66-68	59-63
Béton 16cm + LM 80mm + PP 10mm	61-67	53-62
Béton 16cm + LM 85mm + PP 13mm sur SM	72	67
BBC 20cm + PSE 80mm + PP 10mm	50-54	46-51
BBC 20cm + PSEE 80mm + PP 13mm	71	64
BBC 20cm + LM 80mm + PP 10mm	62-68	55-61
BBC20cm + LM 85mm + PP 13mm sur SM	70	65

BBC : Bloc de Béton Creux, **PSE** : Polystyrène Expansé, **LM** : Laine Minérale, **SM** : Structure Métallique, **PSEE** : Polystyrène Expansé Plastifié, **PP** : Plaque de Plâtre.

1.3.5 Principe de double paroi

La double paroi (système masse-ressort-masse) est constituée de deux parois simples séparées par une lame d'air remplie et non d'un matériau absorbant. Dans ce type de paroi, l'air joue le rôle d'un ressort et le matériau absorbant (laine minérale ou mousse élastique) absorbe l'énergie des molécules d'air en mouvement ; jouant ainsi le rôle d'amortisseur. L'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi double est largement supérieur à celui d'une paroi simple de même masse surfacique (sauf pour certains vitrages doubles) [Boukadoum A, 2012].

L'indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi double dépend des paramètres suivants :

- ✓ la masse surfacique des parements,
- ✓ l'épaisseur de la lame d'air,
- ✓ l'épaisseur et la nature de l'absorbante acoustique entre les deux parements,
- ✓ la fréquence critique des parements,
- ✓ la nature des liaisons (ponctuelles, linéiques, surfaciques, rigides, souples, etc.)

Quand les deux parements sont identiques, leurs fréquences critiques ont la même valeur et la chute de l'indice R de la paroi est très accentuée. Il est donc préférable d'utiliser des parements d'épaisseurs différentes [Hamayon L, 2006].

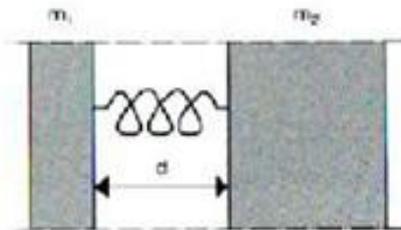


Figure 1.8: Représentation schématique d'une double paroi

Cependant, une double paroi possède une fréquence de résonance pour laquelle les sons ne subissent pas une atténuation efficace (indice R diminue). La fréquence de résonance f_r est obtenue par la formule suivante :

$$f_r = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (11)$$

Avec d : distance séparant les deux parements (m) ; m_1 et m_2 : masses surfaciques des deux parements (kg/m^2).

Afin que l'indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi double soit efficace ; la fréquence de résonance doit être la plus basse possible. Aussi il faut augmenter la distance entre les parements et la masse surfacique des parois [Boukadoum A, 2012].

1.3.6 Principe d'étanchéité

Habituellement tout lieu de passage de l'air est aussi perméable au bruit. Fenêtres, bas de portes, coffres de volets roulants, entrées d'air, mauvaise étanchéité en pied de cloison, sont autant de sources de mauvaise étanchéité qu'il convient de ne pas négliger pour obtenir une acoustique satisfaisante.

L'utilisation d'une paroi double permet donc d'atteindre des isolements très largement supérieurs à ceux d'une paroi simple [Park H K et Kim H, 2015]. En rénovation, il s'agit en premier lieu d'améliorer l'étanchéité à l'air des parois existantes par un enduit. Sinon, on a recourt à des panneaux de laine minérale ou de polystyrène expansé qui peuvent être collés soit sur la paroi existante pour améliorer sa performance acoustique soit fixés sur les murs ou plafonds grâce à une ossature métallique.

La détérioration de l'isolation acoustique des fenêtres se produit en raison de l'espace formé entre le cadre extérieur et le châssis de la fenêtre. Fondamentalement, l'amélioration de l'étanchéité des fenêtres nécessite le cadre de fenêtre de structure imperméable. Les performances acoustiques d'une fenêtre sont également liées à la nature du matériau constituant la menuiserie. Quels que soient l'huissierie et le vitrage, la performance finale dépend de la parfaite étanchéité de la fenêtre. Les fenêtres et les baies constituent les éléments de façade les plus critiques du point de vue acoustique [Park H K et Kim H, 2015]. Leurs efficacités dépendent de l'étanchéité à l'air, de la qualité du vitrage et de la menuiserie et du type d'ouvrant. L'épaisseur des verres utilisés est généralement déterminée par la nécessité de résister aux chocs. Cependant, pour une protection suffisante vis-à-vis des bruits extérieurs ; on choisit des verres plus épais, donc plus lourds. Dans ce cas, les menuiseries et leurs organes de manœuvre doivent être adaptés aux poids des vitres. Les simples vitrages présentent, en général, de mauvaises qualités acoustiques et thermiques si leurs épaisseurs sont faibles. Du point de vue acoustique, les simples vitrages se distinguent essentiellement par leur masse. Au voisinage de la fréquence critique du vitrage, l'isolement acoustique est diminué [Boukadoum A, 2012]. Dans les pays industrialisés, les doubles vitrages à feuilleté acoustique sont de plus en plus utilisés pour améliorer les performances acoustiques des façades. Quand la surface vitrée est doublée, les pertes d'isolement sont estimées à 3dB(A). À masse surfacique égale ; un vitrage feuilleté a très souvent un affaiblissement acoustique supérieur à un double vitrage composé de vitrages identiques avec lame d'air. Les vitrages à feuilleté acoustique permettent d'atténuer l'effet des fréquences critiques et obtiennent un $R_{A,fr}$ supérieur à 35dB(A). Les vitrages à feuilleté acoustique montés en double vitrage permettent un gain de l'affaiblissement acoustique de 10dB(A) par rapport à des doubles vitrages d'épaisseurs similaires.

1.3.7 Indice d'affaiblissement acoustique du bâtiment avec les portes et les fenêtres fermées à l'égard du bruit des avions

En vue de quantifier l'atténuation acoustique des parois du bâtiment, des mesures in situ doivent être effectuées. Ces mesures consistent à relever dans le bâtiment test pendant une période donnée simultanément les niveaux de bruit à l'extérieur et à l'intérieur du local exposé au bruit du trafic aérien. Les mesures à l'intérieur sont réalisées dans des chambres à coucher dont les portes et fenêtres sont fermées. Les niveaux de pression acoustiques élémentaires ont été relevés

en continu aux différents points pendant toute la période de mesure. La différence entre le niveau du bruit à l'extérieur et le niveau du bruit à l'intérieur est ensuite calculée pour chaque passage d'avion identifié. Cette différence représente l'indice d'affaiblissement global du local considéré à l'égard d'une ambiance sonore donnée. L'indice calculé nous permet d'avoir une idée sur la performance acoustique des parois du bâtiment test et le niveau de confort ressenti à l'intérieur des habitations. L'indice d'affaiblissement acoustique R caractérise l'aptitude des parois à atténuer la transmission des bruits. Il est mesuré en laboratoire en l'absence de toutes transmissions latérales [Brutel-Vuilmet C, 2005]. Il est exprimé en dB(A) et est obtenu par la formule suivante :

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (12)$$

Avec τ le facteur de transmission de la paroi obtenu par la formule :

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (13)$$

W_t : la puissance rayonnée par la paroi (ou la puissance transmise) par unité de surface (w/m^2)
 W_i : la puissance incidente excitant la paroi par unité de surface.

Plus l'indice R est élevé, plus la paroi est isolante acoustiquement [Brutel-Vuilmet C, 2005]. Pour une paroi simple constituée d'un seul matériau, l'indice d'affaiblissement acoustique R varie avec la masse surfacique de la paroi et la fréquence du son incident. Selon la loi expérimentale de masse, plus la paroi est lourde, plus son indice R est élevé. L'indice R varie également avec la fréquence du son frappant la paroi. Selon la loi de fréquence, plus la fréquence de l'onde incidente est élevée, plus l'indice R est élevé. C'est pourquoi les fréquences aiguës sont mieux 'stoppées' que les fréquences basses. Les graphes suivants donnent l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi en fonction de sa masse surfacique à 500 Hz et l'indice R d'une paroi en fonction de la fréquence de l'onde incidente, la masse surfacique de la paroi considérée est de 100 kg/m^2 [Hamayon L, 2008].

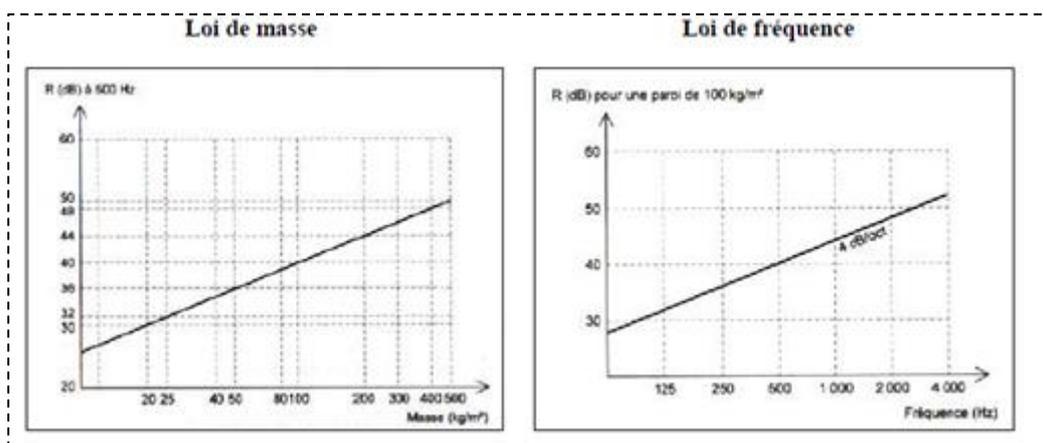


Figure 1.9: Lois expérimentales de masse et de fréquence.

1.3.8 Isolements acoustiques relatifs aux bruits aériens

L'isolement acoustique brut aux bruits aériens, D_b exprimé en dB, mesure l'isolement entre deux locaux d'un bâtiment. C'est la différence entre le niveau de pression acoustique L_1 du local d'émission du bruit et le niveau de pression acoustique L_2 du local de réception :

$$D_b = L_1 - L_2 \quad (14)$$

$$D_b = R + 10 \log \frac{A}{S_p} \quad (15)$$

Avec R : indice d'affaiblissement acoustique de la paroi séparative dB(A) ;

A : aire d'absorption équivalente du local de réception (m^2) ;

S_p : surface de la paroi séparatrice (m^2).

L'isolement acoustique est fonction de l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi séparative ; de la surface de la paroi séparative ; des transmissions latérales par les parois liées à la paroi séparative. Attention aux parois créant des phénomènes de réverbération qui amplifient le niveau de pression acoustique du local de réception [Brutel-Vuilmet C, 2005].

1.3.9 Isolement acoustique standardisé D_{nT}

Pour chaque bande de fréquences, le facteur correctif est défini par rapport au temps de réverbération T_0 de référence. T_0 est fixé à 0,5 s selon la norme UNE-EN ISO 140-5 pour les mesures in situ de l'insonorisation aérienne pour les éléments de façades des bâtiments [Pérez G et al., 2016].

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad \text{avec } T_0 = 0,5 \text{seconde} \quad (16)$$

1.3.10 Isolements acoustiques standardisés pondérés

L'isolement d'un local est évalué en fonction de l'isolement acoustique D_{nT} exprimé en dB(A) et par rapport à un bruit rose ou par rapport à un bruit route. Le bruit rose est la référence pour caractériser les qualités des structures d'une construction telles que les murs, les planchers, les façades, les menuiseries, les toitures, etc. Pour les fréquences croissantes, les niveaux sont décroissants à raison de 3 dB/octave. Un bruit route est un bruit normalisé. Il est une référence pour le bruit des trafics routiers et ferroviaires. Son spectre est enrichi en basses fréquences et appauvri dans les fréquences aiguës par rapport à un bruit rose. Pour l'isolement entre deux locaux, l'indice pondéré est symbolisé par $D_{nT,A}$ [Pérez G et al., 2016]. Pour l'isolement vis-à-vis de l'espace extérieur, l'indice pondéré est symbolisé par $D_{nT,A,tr}$. Le passage de ces indices à l'indice unique $D_{nT,w}$ exprimé en dB(A) est obtenu par l'utilisation de deux termes correctifs (C et C_{tr}) :

$$\text{Pour un bruit rose,} \quad \text{on a:} \quad D_{nT,A} = D_{nT,w} + C \quad (17)$$

$$\text{Pour un bruit route,} \quad \text{on a:} \quad D_{nT,tr} = D_{nT,w} + C_{tr} \quad (18)$$

1.3.11 Réverbération et durée de réverbération

Aux basses fréquences, une pièce a un comportement acoustique dominé par de discrètes résonances. Lorsque la fréquence augmente, le nombre de ces résonances augmente, celles-ci se rapprochent et finissent par se confondre tout en diminuant d'intensité. Elles forment alors un phénomène appelé réverbération. Autrement dit, la réverbération est donc la persistance d'un son dans un espace clos après interruption brusque de la source sonore.

La durée de réverbération T_r d'un local est le temps nécessaire pour que la densité d'énergie acoustique moyennée dans l'espace d'une enceinte diminue de 60 dB(A) après que l'émission de la source ait cessé [ISO 3382-2 :2008]. Elle s'exprime en secondes. Elle dépend du volume de la salle et des qualités absorbantes des surfaces.

On calcule généralement le temps de réverbération d'un local à l'aide de la formule de Sabine :

$$T_r = 0,16 \frac{V_l}{A} \quad (19)$$

T_r : durée de réverbération en seconde (s), V_l : le volume du local en mètre cube (m^3),

A : l'aire d'absorption équivalente en mètre carré (m^2).

L'aire d'absorption A est définie par la somme des surfaces ; (S_i) : la surface de l'élément i qui est multipliée par son coefficient ; (a_i) est appelé coefficient de Sabine et qui est propre à chaque matériau.

$$A = \sum_{i=1}^n a_i S_i \quad (20)$$

Entre deux locaux de mêmes dimensions, le meilleur local est celui où le temps de réverbération est le plus petit possible. La durée de réverbération (T_r) est proportionnelle au volume ; (plus le local est grand, plus il est réverbérant). La durée de réverbération (T_r) est inversement proportionnelle à l'aire d'absorption équivalente.

1.4 Conclusion

Les études bibliographiques contenues dans cette partie de l'état de l'art ont permis d'éclaircir les notions de durabilité des bâtiments dans les contextes aéroportuaires. Ainsi, ceci s'est fait par les éléments descriptifs sur les phénomènes sonores à proximité des aéroports, les techniques d'évaluation et la gestion de bruit des avions. Il s'agit des notions sur la perception des phénomènes sonores, les indicateurs de gênes ou de nuisance sonore, les descripteurs énergétiques intégrés, et les descripteurs événementiels). Nous avons également effectué d'autres descriptions portant sur le concept de l'acoustique du bâtiment à savoir les conditions du confort acoustique, la transmission acoustique par la façade, le principe de masse, le principe de double paroi, et le principe d'étanchéité et l'indice d'affaiblissement acoustique du bâtiment avec les portes et les fenêtres fermées à l'égard du bruit des avions.

Chapitre2 : État de l'art sur la performance thermique du bâtiment

2. État de l'art sur la performance thermique du bâtiment

2.1 Introduction

Le bâtiment est le siège de multiples sollicitations tant à l'extérieur qu'à l'intérieur. Dans les pays sahéliens comme le Mali, il s'agit, des sollicitations thermiques comme la température ambiante, le flux solaire reçu par les parois extérieures de l'habitat. Sur le plan énergétique, les pays africains sont caractérisés par un taux d'accès faible à l'énergie et font face à un déficit de production. Dans ces pays, le secteur du bâtiment est responsable jusqu'aux 4/5 de la consommation énergétique [François S et al., 2012] contre 60% de consommation mondiale en énergie des bâtiments résidentiels et tertiaires [Habitat ONU, 2014]. Le Mali est un pays à climat tropical chaud et sec où la durée de l'ensoleillement quotidien varie peu au cours de l'année et avoisine les 10 à 12 heures. Les rayons solaires sont la plupart du temps très près de la verticale donc apportent un fort réchauffement [Vikidia, 2015]. Dans les pays à climat tropical chaud et sec, on observe des températures très élevées, une hygrométrie faible et une différence de température entre le jour et la nuit relativement importante [François S et al., 2012]. La très forte température provoque un énorme besoin de refroidissement des bâtiments (climatisation, ventilation), ce qui explique les dépenses énergétiques et les énormes impacts sur l'environnement. Aussi la forte consommation énergétique dégage d'énormes émissions de gaz à effet de serre (pollution de l'air) sans compter les émissions indirectes liées aux différents processus d'obtention des matériaux de construction. Dans les pays en voie de développement, le taux d'urbanisation des villes augmente rapidement et passera de 47% en 2011 à 65% à l'horizon 2050 [Habitat ONU, 2014]. Les conséquences de cette urbanisation rapide provoquent une forte pression sur les infrastructures et équipements collectifs (demande croissante des services sociaux notamment en logement) et la dégradation de l'environnement et du cadre de vie. Pour minimiser ces impacts sur l'environnement et le confort thermique des usagers, les techniques de construction et de rénovation des bâtiments doivent s'inspirer du concept « harmonie entre le bâtiment et son environnement » [Lombera et Rojo, 2010]. Un concept appelé concept bioclimatique dont la définition dépend généralement de l'environnement, donc des conditions climatologiques du site de construction. Le concept bioclimatique consiste à mettre l'accent sur les aspects architecturaux (la forme, la disposition, le choix de matériaux, l'enveloppe du bâtiment) pour une meilleure réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments. Dans ce chapitre, nous donnons les enjeux du secteur énergétique du Mali, un bref aperçu du concept d'architecture bioclimatique, des notions sur l'orientation des façades du bâtiment, l'influence de l'orientation, le confort hygrothermique, l'isolation de l'enveloppe thermique du bâtiment, l'ouverture des fenêtres, l'infiltration, l'étanchéité à l'air, l'inertie thermique, la classification des climats et les stratégies architecturales bioclimatiques. Ensuite, nous terminons ce chapitre par un aperçu sur l'architecture et l'urbanisation au Mali.

2.2 Contexte énergétique

L'énergie est l'un des facteurs essentiels du développement socio-économique [Davidson et Sokona, 2002]. Les liens étroits entre l'énergie et les objectifs du millénaire pour le développement rendent les défis et les perspectives de la fourniture de services énergétiques plus importants à relever dans les pays d'Afrique subsaharienne [Modi et al., 2005 ; Porcaro et Takada., 2004]. Dans ces pays, les taux d'accès à l'électricité varient considérablement d'une zone urbaine à une zone périurbaine et rurale. Dans la région de la Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CÉDEAO), moins de la moitié des populations des communautés rurales et périurbaines ont accès aux services énergétiques modernes [Abeeku B H, 2010]. Au Mali, le secteur de l'énergie couvre des enjeux importants en termes de développement économique. En effet, la demande énergétique augmente plus rapidement que l'évolution du Produit Intérieur Brut (PIB), ce qui pose un problème de compétitivité économique d'une part et de sécurité d'approvisionnement énergétique d'autre part. Le PIB croît d'environ 5% par an contre 14% pour la demande d'énergie primaire hors biomasse et plus de 10% pour l'électricité. La demande apparente d'énergie au Mali est dominée par le secteur résidentiel qui représente environ 70% de la consommation totale du pays. Le taux national d'accès à l'électricité était de 18% en 2009 et 27,1 % en 2010. La demande d'électricité a une croissance annuelle de 10%. Le taux d'accès à l'électricité est de l'ordre de 55% en milieu urbain tandis qu'il ne représente que 15% en milieu rural. [Rapport ORWB, 2010]. En plus de l'urbanisation rapide au Mali, on constate que les matériaux utilisés et les techniques de construction sont inadaptés pour répondre aux besoins socioculturels et économiques réels du pays. Ces matériaux et techniques de construction ont conduit au choix des concepts de constructions occidentales tout en ignorant systématiquement le contexte énergétique et climatique du Mali. C'est pour cela que les grands établissements humains (ruraux et urbains) sont confrontés au besoin d'augmenter la production d'énergie pour accélérer le développement et améliorer le niveau de vie des populations. Vu les réalités du changement climatique, la forte demande énergétique du secteur des bâtiments d'une part, les défis de prix d'énergie et la forte urbanisation des grandes villes au Mali d'autre part, une orientation vers des projets de construction durables est capitale. Cela permet de diminuer la demande énergétique du secteur résidentiel et d'influencer de façon positive le taux national d'accès à l'électricité. Ces projets de constructions durables représentent des opportunités pour une démarche écologique et l'efficacité énergétique. Aussi, les constructions durables assurent un environnement plus sain et plus productif. L'adaptation de la construction des bâtiments (conception bioclimatique) au contexte climatique du Mali (climat tropical chaud et sec) permet d'améliorer les conditions de vie des citoyens et de diminuer les risques qui pèsent sur leur état de santé et leur productivité.

2.3 Un bref aperçu du concept d'architecture bioclimatique

Depuis ses origines, l'architecture a eu pour objectif principal de protéger toujours l'homme contre l'environnement extérieur (le confort climatique). Dans ce cas, l'architecture bioclimatique tente d'atteindre le confort thermique en interagissant énergiquement avec le climat extérieur. Tout au long de l'histoire, l'architecture vernaculaire a marqué les évolutions architecturales. Dans tous les pays et tous les climats, ces évolutions ont eu lieu pour atteindre les meilleurs niveaux de confort dans les espaces intérieurs. Un certain nombre d'études à travers le monde ont développé l'architecture vernaculaire [Singh M K et al., 2009 ; Pourvahidi P, 2010 ;

Pourvahidi P et Ozdeniz M B, 2013]. La Révolution industrielle a favorisé le peu d'attention accordée à l'analyse énergétique de l'interaction entre les formes et les solutions de conception architecturale [Coch H, 1998] et l'orientation des concepts de construction vers une architecture basée sur des technologies intensives de consommation d'énergie. Cependant, les dommages environnementaux causés par les bâtiments ont été constatés dans les années 1980, ce qui donna naissance au concept de durabilité [Metallinou V, 2006]. Aujourd'hui, la considération des effets environnementaux locaux, globaux ainsi que l'orientation des connaissances vers la durabilité ont permis un retour aux valeurs de l'architecture associée au terme général de « commodités » [Levy A, 2009]. L'architecture vernaculaire est dans un processus de développement visant à récupérer les valeurs architecturales de protection contre le réchauffement climatique avec la sobriété énergétique en poursuivant l'objectif de modes de consommation et de production durables. En ces temps de crise environnementale et de l'urbanisation rapide des villes, il apparaît logique que les architectes pratiquent une conception écologique durable [Bay J H, 2010]. Présentement, les concepts bioclimatiques reposent principalement sur trois axes : l'énergie, le bien-être et la durabilité [Metallinou V, 2006]. L'application du concept bioclimatique nécessite la considération des conditions climatiques du site de construction ainsi que le climat général et le microclimat [Gaitani N, et al., 2007]. Le confort thermique de l'utilisateur est défini [Vanos J, 2010] comme une condition d'esprit exprimant la satisfaction de confort thermique [ASHRAE, 2013]. Le confort est également la condition thermique optimale dans laquelle le moindre effort supplémentaire est nécessaire pour maintenir l'équilibre thermique du corps humain.

2.3.1 Principe bioclimatique

Le concept bioclimatique consiste à préserver la nature à travers une harmonie entre l'habitat et son environnement (le climat local, la végétation, et les matériaux locaux) pour un confort thermique des occupants au sein des pièces (voir Figure 2.1). Il rétablit l'architecture dans son rapport avec l'homme et le climat. Vu la diversité des climats tropicaux, il est difficile de donner une définition typique de l'architecture bioclimatique. Ceci est d'autant plus évident que le confort de chacun se déplace avec les conditions climatologiques. L'architecture bioclimatique passe donc nécessairement par une excellente connaissance de son environnement. Les principes sont basés sur l'intégration du bâtiment dans son environnement tout en respectant certaines exigences. L'architecture bioclimatique se préoccupe donc des paramètres qui conditionnent le bien-être de l'habitant. Le climat est l'élément décisif dans le concept bioclimatique, puisque ce sont ses caractéristiques à savoir l'ensoleillement, les températures, le régime des vents et les précipitations qui contribuent à déterminer un environnement physique auquel l'architecte se réfère.

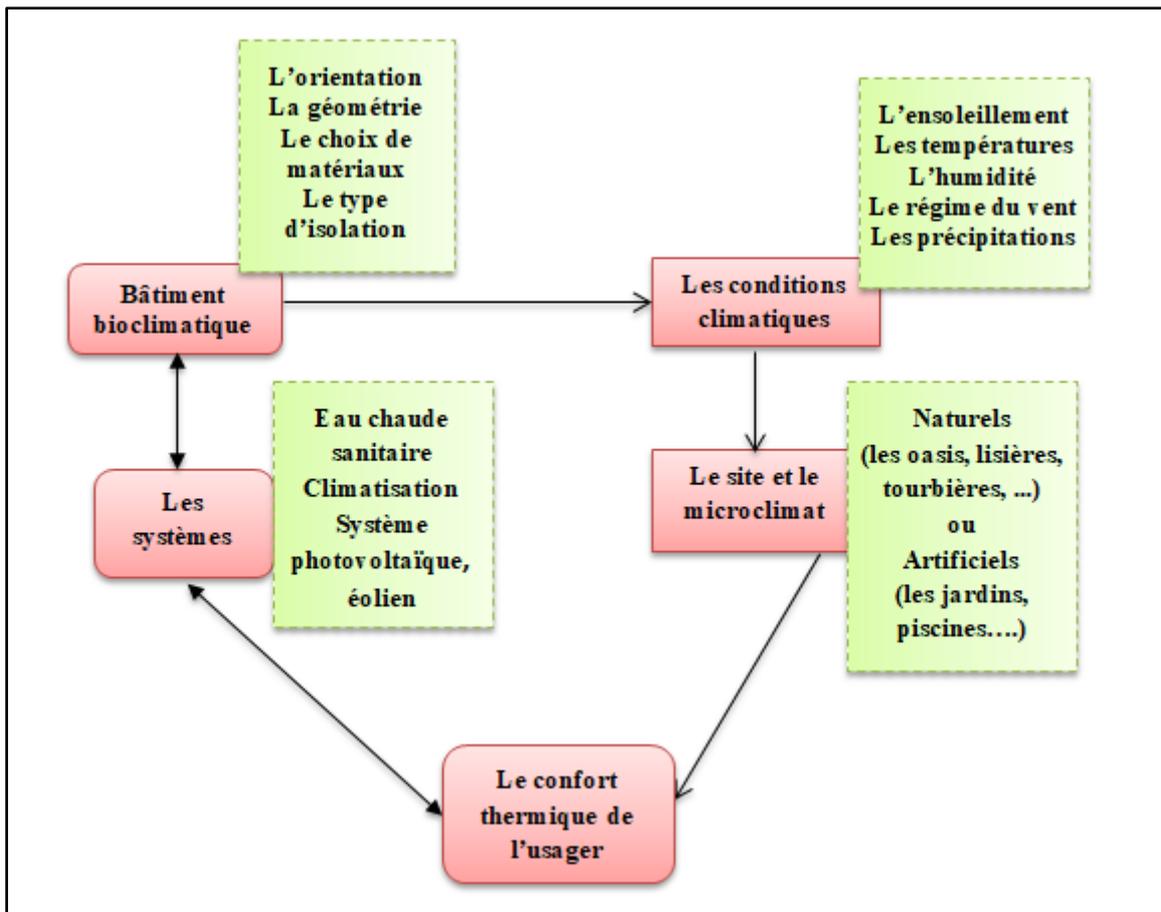


Figure 2.1: Schéma illustratif du concept bioclimatique [Camara et al., 2017].

2.3.1.1 Orientation des façades

Pour optimiser le confort des occupants tout en préservant le cadre naturel de la construction, de nombreux paramètres sont à prendre en compte. Une attention toute particulière sera portée sur l'orientation du bâtiment (afin d'exploiter l'énergie et la lumière du soleil), le choix du terrain (climat, topographie, zones de bruit, ressources naturelles ...) [Exp-concept., 2012]. L'orientation représente un gain énergétique de 15 à 20%. L'orientation suivant l'axe du vent permet de bénéficier des vents dominants et d'évacuer la chaleur interne ou les apports solaires (la ventilation naturelle). Suivant l'axe longitudinal Est/Ouest, elle permet de réduire l'exposition au soleil en climat chaud sauf pour le climat désertique ou méditerranéen où les apports solaires sont utiles durant la saison froide (en direct par les vitrages) ou la nuit (en déphasage par l'inertie). L'objectif d'une bonne orientation de la maison ainsi que la conception intérieure des chambres est de récupérer le maximum de gain solaire en hiver et de le réduire en été [Exp-concept., 2012]. Les espaces de vie doivent donc être orientés vers le sud, avec au moins 60% des surfaces de verre comme objectif, car le Sud est constamment exposé au soleil, quel que soit l'angle solaire ou la hauteur (21° en hiver et 68° en été) (voir figure 2.2).

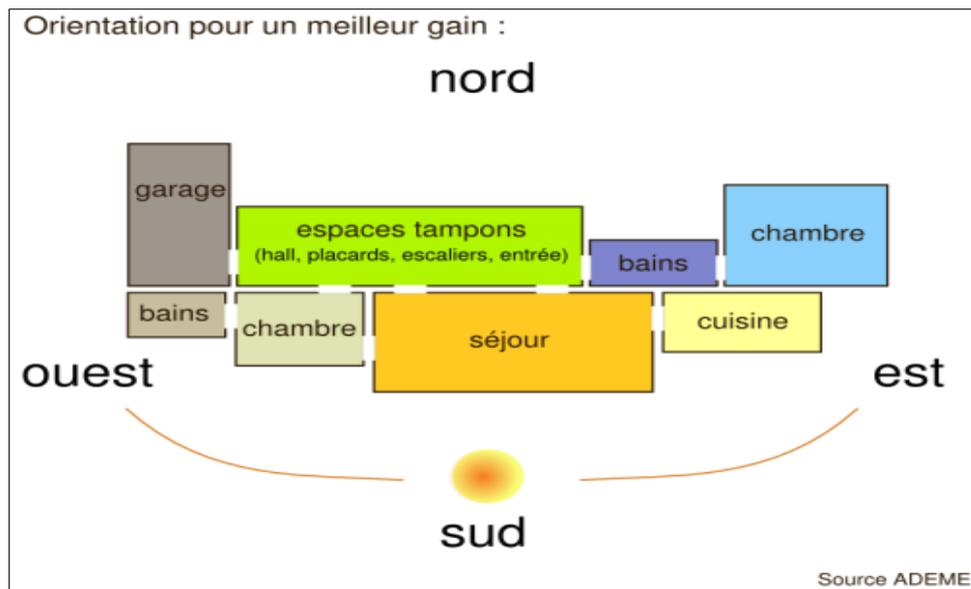


Figure 2.2: Illustration de la disposition appropriée des pièces

2.3.1.2 Effet et influence de l'orientation et sur le confort hygrothermique

L'orientation d'un bâtiment est la direction vers laquelle les façades font face par rapport à un point cardinal. Le facteur d'orientation ne se borne pas uniquement à une question d'implantation correcte du bâtiment sur un site, mais correspond également à une organisation spatiale et fonctionnelle raisonnable du plan. Plusieurs considérations interviennent sur le choix d'orientation des façades telles que la vue, la position par rapport aux voies, la topographie du site, les sources de nuisances et les conditions climatiques disponibles (ensoleillement et pression du vent) [Givoni, 1978]. En fait, c'est cette dernière considération qui compte le plus dans la question de l'amélioration du confort intérieur de l'habitat.

L'orientation la plus favorable pour une façade est celle durant laquelle la façade et ses ouvertures profitent au mieux du soleil et du vent dominant suivant les exigences climatiques de la région. Le pionnier du bioclimatisme, l'architecte Victor Olgyay a conclu que la forme allongée dans la direction Est-Ouest, dans le climat chaud et aride, est plus performante que les formes carrées ou allongées dans la direction Nord-Sud. Orienter le bâtiment vers le Sud est en principe, une stratégie passive efficace parce que les façades dans cette orientation reçoivent moins d'apports solaires en été qu'en hiver. Cela aide naturellement à maintenir une qualité d'ambiance thermique intérieure optimale. Par contre, les orientations Est et Ouest sont, respectivement, les plus gênantes et les plus défavorables, car elles reçoivent des radiations solaires rasantes et très intenses qui entraînent, à leur tour, une augmentation dans la température de l'air intérieur. Bien que les deux orientations reçoivent, théoriquement, la même quantité d'énergie, il est notable qu'en début de matinée, après la nuit, la température de l'air est encore fraîche ce qui rend l'orientation Est moins pénalisante, figure (2.3) [Hussein. H, 2012].

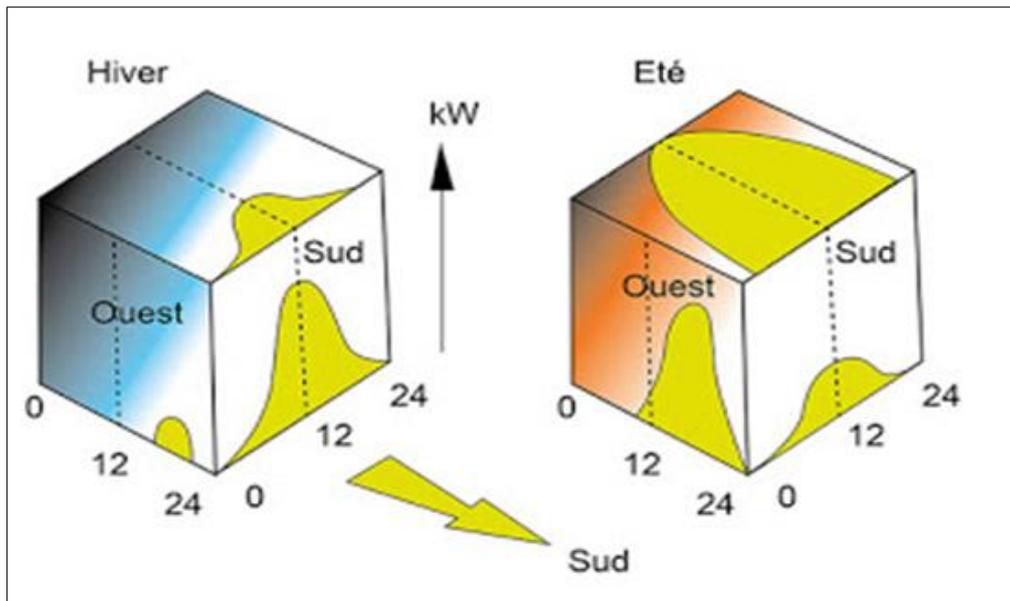


Figure 2.3 : Puissance solaire reçue en kWh par orientation pour les deux saisons hiver et été [Courgey & Oliva, 2006].

Du point de vue bioclimatique, une orientation de l'habitat vers l'axe longitudinal en suivant la direction Est-Ouest engendre certaines sollicitations. Cela augmentera ses surfaces au Sud et ainsi la quantité d'énergie solaire absorbée par celles-ci pendant les mois d'échauffement et, en contrepartie, diminuera les surfaces sur les côtés Est et Ouest [Givoni, 1978 ; Mazria, 2005]. Mais cela n'est pas toujours possible, surtout lorsque le site (topographie, forme, proportions, etc.) ne permet pas la mise en place de cette prescription. Il est, par exemple, allongé Nord-Sud. Dans de tels cas qui sortent du cadre de l'influence du promoteur et de l'architecte, la façade Ouest aura donc besoin de plus d'attention parce qu'elle se réchauffe rapidement dans l'après-midi. Les ouvertures sur cette orientation doivent être évitées, sinon elles doivent être suffisamment ombragées (occultées). Mais les balcons/loggias peuvent-ils être efficaces dans ce cas. Par ailleurs, la ventilation naturelle présente un impact direct sur les conditions des ambiances autant intérieures qu'extérieures [Hussein. H, 2012]. Par conséquent, l'orientation de la façade y compris ses ouvertures va donc déterminer la performance de celle-ci. Une légère amélioration peut être gagnée en termes de température intérieure et de distribution de l'air dans l'espace, lorsque le vent incident est oblique par rapport à la façade réceptrice. Dans une cour fermée, on observe une zone protégée plus grande sur un des côtés en fonction de l'orientation de la cour par rapport à la direction de vent incident [Brown & Dekay, 2001]. Des baisses de températures internes sont engendrées lorsque les ouvertures et les volets (intérieur et/ou extérieur) sont fermés. D'après les constatations de Givoni [Givoni, 1978], l'ouverture des fenêtres et des volets provoque une élévation de près de 3°C de la température interne et cela en particulier lorsque l'ouverture est orientée vers l'Ouest (orientation du vent dominant). Mise à part l'orientation des ouvertures par rapport à la direction du vent dominant, leurs dimensions, leur nombre, leur position dans l'espace et l'aménagement intérieur du plan (agencement) affectent fortement l'efficacité de la ventilation naturelle intérieure. A l'encontre d'un habitat extraverti pour lequel l'occultation de ses façades et ses ouvertures est devenue une exigence primordiale en fonction de leur orientation, l'habitat à cour présente une forme d'auto-ombrage

(self-shading) plus ou moins efficace selon ses proportions et son orientation. Beaucoup d'études se sont basées sur la question de l'effet de l'orientation, par simulation des modèles génériques simplifiés, vis-à-vis de la répartition des tâches solaires sur ses façades intérieures et la quantité d'énergie reçue par celles-ci. En effet, Wazeri et Muhaisen ont révélé que l'effet de changement de l'orientation de la cour est plus noté en été qu'en hiver [Wazeri, 2002 et Muhaisen, 2006]. Dans une étude portée sur la répartition des zones ombragées et ensoleillées dans la cour, Muhaisen [Muhaisen, 2006] a noté que les ombres minimales sont générées en été dans quatre régions climatiques différentes, quand la cour est allongée Est-Ouest (angle d'orientation est égal à 0°). Alors qu'en hiver, les surfaces ensoleillées deviennent légèrement supérieures à l'approche d'un angle d'orientation de 90°.

2.3.1.3 Isolation de l'enveloppe thermique du bâtiment

La performance thermique des bâtiments repose en partie sur l'isolation et l'inertie thermique de l'enveloppe. Des indicateurs physiques tels que la conductivité thermique, chaleur spécifique, effusivité et l'émissivité déterminent la qualité des isolants et l'inertie des matériaux de l'enveloppe du bâtiment.

L'isolation thermique joue un rôle dominant dans la réduction de la consommation d'énergie de chauffage et refroidissement des bâtiments et des émissions de CO₂ en raison du contenu élevé en carbone des combustibles fossiles et de l'électricité utilisée. L'enveloppe des murs et des toits peut améliorer les performances du bâtiment passif par l'utilisation judicieuse de l'isolation thermique et des matériaux de meilleures capacités de stockage de chaleur. L'influence du stockage thermique de l'eau sur l'environnement thermique interne d'une maison solaire passive a été analysée par [Wang et al., 2013]. L'isolation thermique de la paroi composite Trombe aide à réaliser des économies de 46% en hiver et 80% en été par rapport à un bâtiment ordinaire, dans lequel la capacité de stockage du mur Trombe contribue seule à hauteur de 20,7%. Cependant, les systèmes de mur Trombe ne sont pas favorables pour les immeubles de grande hauteur résidentiels en raison du poids supplémentaire de la structure, la surchauffe possible dans des conditions estivales chaudes et des préoccupations esthétiques [Al-Obaidi KM et al., 2014]. Dans un bâtiment tropical, le toit peut contribuer à hauteur de 70% au gain total de chaleur [Al-Obaidi KM et al., 2014], de sorte que l'utilisation de réflexion, matériaux rayonnants et isolants est considérée comme des méthodes efficaces pour réduire le gain de chaleur et de créer un environnement intérieur confortable. L'adoption des matériaux de surface d'émission thermique, une toiture verte de végétation ou d'autres matériaux d'isolation peuvent réduire de manière significative le gain externe à travers les toits des bâtiments bioclimatiques. Le concept bioclimatique encourage des toits de couleur moins sombres qui absorbent moins de chaleur pour réduire la consommation d'énergie du bâtiment et cette mesure est généralement adoptée pour les bâtiments situés dans la chaude région Sud-Ouest des États-Unis comme suggérée par l'enquête statistique sur la prévalence de stratégies passives [Kruzner K et al., 2013]. L'isolation du toit dans de ces maisons passives a permis de réduire à la fois le refroidissement et les charges de chauffage en augmentant légèrement la température moyenne de l'air en hiver et en diminuant les températures de sol en été [Benhamou et Bennouna, 2013].

2.3.1.4 Ouverture et l'emplacement des fenêtres

Les ouvertures de configurations différentes de fenêtres pour pièces dans un immeuble de grande hauteur ont un impact important sur l'efficacité de la ventilation naturelle. La modélisation par la Simulation en Dynamique des Fluides (SDF) et les mesures de gaz traceur sur le terrain ont prouvé que de meilleures performances de ventilation peuvent être réalisées lorsque deux ouvertures sont opposées ou perpendiculaires l'une à l'autre [Gao CF et Lee WL, 2011]. La position de la fenêtre, la position de la porte et l'orientation sont trois paramètres identifiés avec des influences possibles sur la ventilation naturelle. La combinaison des trois a été étudiée et le changement simultané de deux paramètres s'est avéré être plus efficace que le changement de tous les trois en raison des effets de neutralisation entre les paramètres. Le brise-soleil fixe est en mesure de réduire la charge de pointe de refroidissement, au détriment de l'accès à la lumière du jour et de la récolte de la chaleur en hiver. L'ombrage réglable, donc, contrôlé par la lumière du jour ou un contrôleur de climat est un moyen attrayant pour maximiser la lumière naturelle et fournir le chauffage passif en hiver [Pacheco R, 2012].

2.3.1.5 Infiltration et étanchéité

L'infiltration et l'étanchéité des fenêtres et ouvertures sont indispensables à la maîtrise du taux d'étanchéité à l'air requis en construction de maison bioclimatique. Les condensats sur les surfaces murales causent la contamination biologique et compromettent la qualité de l'air à l'intérieur. Un moyen efficace d'atténuer l'infiltration incontrôlée est d'améliorer l'étanchéité du bâtiment. L'étanchéité à l'air est mesurée par la pressurisation du bâtiment jusqu'à 50 Pa et l'enregistrement de son taux de renouvellement d'air par heure est fait grâce à un test d'infiltrométrie [Badescu V et Sicre B, 2003]. Pour un bâtiment défini comme une maison conçue passive, ce taux devrait normalement être inférieur à 0,6 [Mahdavi A et Doppel bauer, 2010 ; Allard et al., 2013]. Dans une maison passive située en Allemagne, le taux de renouvellement d'air par heure à une pression de 50 Pa a été mesuré à seulement 0,27 du volume interne à la suite d'une bonne étanchéité à l'air. Cependant, un tel test d'étanchéité pourrait ne pas être applicable à des grands bâtiments de la zone, dans ce cas, un champ maquette ou imagerie thermique est plus réaliste. Le calcul de la charge d'infiltration a été divisé en charges sensibles et latentes en utilisant une fonction linéaire reliant les charges de la température extérieure [Wang Z, 2014]. Les études de l'analyse de la sensibilité menées par [Tian W et al., 2014] ont révélé que l'infiltration est le troisième contributeur le plus élevé de la charge de chauffage après la fenêtre valeur U et le point de consigne de chauffage.

2.3.1.6 Inertie thermique

La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender [Chahwane L, 2012]. L'inertie thermique joue globalement le rôle de déphaseur et d'amortisseur. Autrement dit, elle retarde et réduit l'amplitude des effets des potentielles sollicitations climatiques. Quand on s'intéresse aux sollicitations subies par l'enveloppe extérieure (température extérieure, et flux solaires), on parle d'inertie de transmission [Munaretto F, 2014]. La réponse du bâtiment face aux sollicitations dépend en grande partie des propriétés thermiques des matériaux qui le constituent. D'après leurs capacités à stocker et à véhiculer la chaleur, le bâtiment réagira différemment, d'où le problème couplé de la conductivité et de la capacité thermique, ce qui conduit à l'introduction des deux

notions de diffusivité et d'effusivité [Chahwane L, 2012]. L'inertie thermique d'un matériau se caractérise par deux grandeurs :

- la diffusivité (D) qui s'exprime en m²/s,
- l'effusivité (E) qui s'exprime en J/m².K.s^{1/2}.

2.3.1.6.1 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique « D » d'un matériau caractérise sa vitesse de transmission des flux de chaleur d'une de ses parois à l'autre ou sa capacité à ralentir ce transfert de chaleur. Elle n'est pratiquement jamais connue directement, mais elle peut être déterminée par calcul connaissant les caractéristiques de masse volumique ou densité ρ et de chaleur spécifique ou chaleur massique C et la conductivité thermique λ du matériau. Sa formule s'écrit :

$$D = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (21)$$

Plus la diffusivité est élevée et plus la vitesse de transmission est rapide. Inversement, plus elle est faible et plus la vitesse de transmission est lente. Elle n'a d'intérêt que lorsqu'il existe de fortes variations de température et que le transfert du flux de chaleur doit être ralenti ou stabilisé. Sa valeur, en elle-même, n'a pas grand intérêt, la différence avec les autres matériaux non plus, ce qui compte c'est son rapport avec les autres. La fibre de bois a une diffusivité pratiquement 1000 fois plus faible que celle du cuivre, mais elle est seulement environ 7 fois inférieure à celle du béton comme, d'ailleurs, celle du polystyrène expansé ou de la laine de verre. Cet écart est suffisant pour avoir une importance marquée sur la qualité du confort estival sans climatisation [Chahwane L, 2012].

Tableau 2-1: Propriétés thermophysiques de matériaux de construction

Matériaux de construction	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C (J/kg.K)	D (m ² /s)
Béton lourd	1,7	2300	1000	$7,72.10^{-7}$
Béton léger	1,0	1500	1000	$6,77.10^{-7}$
Bloc pierre	1,4	1895	1000	$7,38.10^{-7}$
Brique pleine	1,0	1850	1000	$5,40.10^{-7}$
Bois lourd (hêtre, chêne)	0,2	800	2700	$9,25.10^{-8}$
Bois léger (sapin, épicéa)	0,14	540	2400	$1,08.10^{-7}$
Granite	2,8	2600	1000	$1,07.10^{-6}$

2.3.1.6.2 Effusivité thermique

L'effusivité thermique « E » d'un matériau caractérise son aptitude à jouer un rôle d'éponge thermique, sa capacité à réguler l'ambiance intérieure. Comme pour la diffusivité, elle n'est pratiquement jamais connue directement, mais elle peut être déterminée par un calcul simple qui nécessite de connaître les mêmes caractéristiques thermiques. Sa formule s'écrit :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad \text{ou} \quad E = \rho C \sqrt{D} \quad (22)$$

Plus l'effusivité est élevée et plus le matériau est capable de réguler l'ambiance intérieure. Inversement, plus elle est faible et moins le matériau est en mesure d'assurer ce rôle. Comme pour la diffusivité, elle n'a d'intérêt que lorsqu'il existe de fortes variations de température et que le microclimat intérieur doit être stabilisé. Sa valeur, en elle-même, n'a pas grand intérêt, ce qui compte c'est son rapport avec les autres. Alors que le béton a une effusivité seulement 17 fois plus faible que celle du cuivre, elle est environ 50 fois supérieure à celle des isolants habituels tels que la laine de verre, le polystyrène ou le polyuréthane. Cet écart est plus que suffisant pour avoir une importance capitale sur la qualité du confort estival sans climatisation [Chahwane L, 2012].

2.3.1.7 Classification des climats

Pour une application de l'architecture bioclimatique, il est fondamental de tenir compte du climat. Dans l'ouvrage intitulé *Traité d'Architecture Bioclimatique* [Herde A. De Liébard À, 1996-2004], les climats sont classés en fonction de la température moyenne annuelle. Il est possible de distinguer quatre types de climats en fonction de la température :

- ✓ froid, pour des températures moyennes annuelles de moins de 10°C ;
- ✓ tempéré, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 10 et 20°C ;
- ✓ chaud, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 20 et 30°C ;
- ✓ très chaud, pour des températures moyennes annuelles supérieures à 30°C. Ensuite, en fonction de l'humidité, il est aussi possible de discerner deux catégories de climats :
- ✓ sec, pour une humidité relative inférieure à 55% ;
- ✓ humide, pour une humidité relative supérieure à 55%.

Le tableau 2.2 récapitule les principaux types de climats chauds. Ces climats sont localisés géographiquement sur la carte du monde de la figure 2.4 les caractéristiques ainsi que des recommandations sur le choix de l'inertie thermique des constructions sont données pour chaque cas.

Tableau 2-2: Analyse climatique des pays chauds, *Traité d'Architecture et d'Urbanisme bioclimatiques*

Climat	Zone géographique	Caractéristiques	Amplitude jour/nuit	Humidité	Préconisations	Exemples
Equatorial	Autour de l'équateur	Température varie de 22 à 32°C toute l'année	$\leq 5^{\circ}\text{C}$	Très importante proche de la saturation	Éviter les matériaux susceptibles de stocker la chaleur	Belem (Amazonie), Singapour (Indonésie), Afrique centrale....
Tropical (humide + mousson)	22°N à 20°S	Précipitations abondantes, vents forts,...	$\leq 10^{\circ}\text{C}$ (saisons de pluies), $\leq 15^{\circ}\text{C}$ (saisons sèches)	Humidité relative très élevée (entre 60 et 90% toute l'année)	Favorise les constructions légères	Jakarta, Caracas, Bombay (mousson) ...
Tropical sec	10°N à 15°N et 15°S à 30°S	Savane sèche, 3 saisons	$\leq 7^{\circ}\text{C}$ (saisons de pluies), $\leq 11^{\circ}\text{C}$ (saisons sèches)	Entre 20 et 55% en saison sèche et 95% en saison des pluies	Favorise les constructions légères	Nord Mexique, Burkina Faso, Centre-Nord Australie, Nord-Est Namibie, Sénégal...
Désertique	15°N à 30°N	Température élevée, vents chauds et violents.	$\leq 25^{\circ}\text{C}$ (saisons chaudes), $\leq 17^{\circ}\text{C}$ (saison froide)	Entre 1 à 45% toute l'année, les variations journalières peuvent atteindre 15%	Construction vernaculaire, murs à forte inertie	Algérie, Assouan (Égypte), Phoenix (USA), Namibie, Bagdad (Irak), pays du Golfe....
Chaud d'altitude	La même que le climat équatorial, mais en altitude		$\leq 14^{\circ}\text{C}$	Uniformes et presque constantes, ne dépassent pas les limites de confort.	Grande inertie	Nairobi
Méditerranéen	30°N à 40°N	Été très chaud, hiver tempéré, voire froid	En été, en jour de 25 à 38°C, la nuit de 16 à 30°C, en hiver l'amplitude est plus faible	Entre 60 et 70%	Constructions à forte inertie pour atténuer les fluctuations importantes de la température, aussi pour la mi-saison	Sud de la France, Tunis, ...

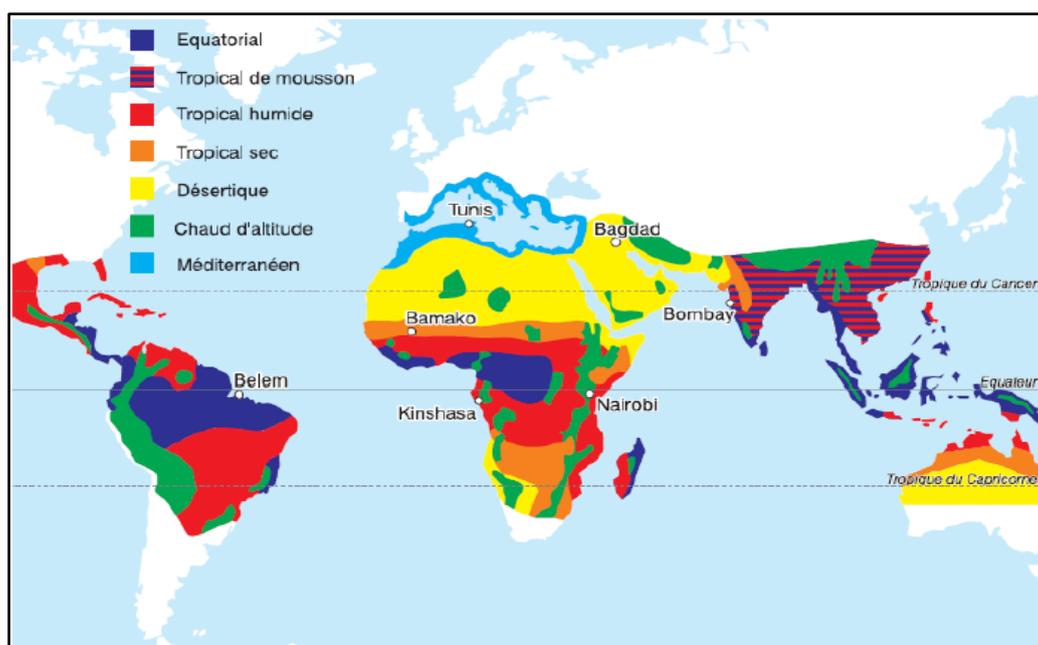


Figure 2.4: Carte du monde avec les différentes zones climatiques chaudes

2.3.1.8 Climat et diagrammes bioclimatiques

Le confort humain est influencé par divers facteurs environnementaux (la température de l'air, la température de surface environnante, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air) et psychosociaux (vêtements, activités, âge et sexe) [Callejon-Ferre A J et al., 2001]. Différents diagrammes bioclimatiques sont utilisés comme outils pour déterminer les niveaux de confort. Les diagrammes plus utilisés incluent celui développé par [Olgay V et Olgay A, 1963 ; Olgay V, 1967] pour déterminer le confort extérieur, le confort intérieur et la température effective (l'indice de confort thermique). L'indice de confort thermique est calculé en utilisant l'humidité relative et les valeurs de température intérieure adoptée par ASHRAE [Freire R Z et al., 2008]. Sur la base des mêmes paramètres, le diagramme de Givoni (Figure 2.5) permet de prédire la stratégie architecturale bioclimatique pour chaque zone. Les valeurs des paramètres de confort externes qui interagissent pour déterminer le confort thermique sont indiquées dans les diagrammes bioclimatiques [Givoni B, 1992].

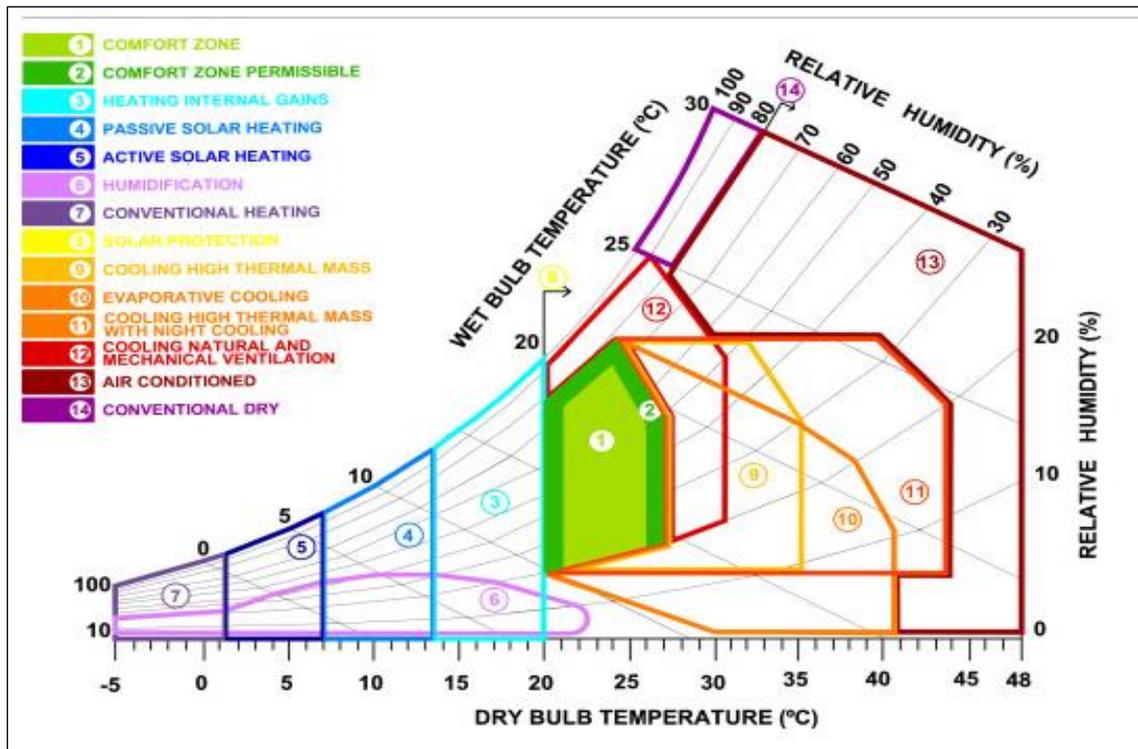


Figure 2.5: Diagramme psychrométrique adapté de Givoni

Les conditions climatiques nécessitent pour une utilisation adéquate de l'inertie des matériaux de construction. La température maximale pour laquelle la stratégie du stockage est liée à l'inertie dépend de la limite supérieure de confort thermique dans les bâtiments non climatisés [Givoni B, 1994]. Cette limite est fonction de la pression de vapeur ambiante et de la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. La limite varie de 25°C pour un climat semi-humide (avec une pression de vapeur de 18 mm Hg à 20 mm Hg) à 28°C pour un climat aride (avec une pression de vapeur inférieure à 15 mm Hg). De plus, cette limite peut encore être repoussée en augmentant la vitesse de l'air intérieur sans pour autant laisser entrer l'air extérieur. Par brassage de l'air intérieur à une vitesse de 2 m/s, cette limite est repoussée à 28°C pour un climat semi-humide et 30°C pour un climat aride. Pour un climat humide, si la pression de vapeur devient supérieure à 22 mm Hg et l'amplitude thermique (jour/nuit) trop faible, le rafraîchissement nocturne par la ventilation ne peut pas être assuré. Pour une stratégie de rafraîchissement nocturne, la variation de température extérieure doit être suffisamment importante avec une température et une humidité moyennes comprises dans la zone de confort, tout en évitant les infiltrations d'air durant la journée [Givoni B, 1994].

2.3.2 Stratégies architecturales bioclimatiques

Le diagramme de Givoni, représenté sur la figure 2.5, est un diagramme bioclimatique divisé en différentes zones pour lesquelles il est nécessaire d'utiliser des stratégies architecturales pour atteindre le confort dans un bâtiment [Morillón-Gálvez D et al., 2004]. L'axe des abscisses représente la température du bulbe sec et l'axe des ordonnées correspond à l'humidité de l'air frais; les courbes psychrométriques sur le graphique représentent l'humidité relative. Sur la base

des définitions de la température et de l'humidité de l'air, le diagramme de Givoni représenté en figure 2.5 est divisé en 14 zones [Givoni B 1992]. Les zones de confort idéales correspondent à la zone 1 et à la zone 2. Ainsi, nous pouvons définir les conditions climatiques et les stratégies architecturales associées pour améliorer les conditions environnementales de la maison dans la zone de confort. Autant que possible, des stratégies passives sont proposées, car elles consomment moins d'énergie. Ces stratégies sont appliquées pour aider à réduire l'utilisation des dispositifs énergétiques. Si le bâtiment est situé dans la zone de confort idéal, son architecture ne demande pas de corrections thermiques à effectuer. Dans le cas contraire, des stratégies architecturales peuvent être mises en œuvre pour atteindre la zone de confort. Dans cette étude, les raisonnements bioclimatiques font référence à des zones à climats tropicaux chauds secs et chauds humides.

2.3.2.1 Confort et zones de confort admissibles

La zone de confort symbolisée par zone 1 sur la figure 2.5 présente les conditions idéales pour le corps humain. Statistiquement, cette zone est confortable pour 70% de la population [de Villermay D 1980]. Elle correspond à la zone dans laquelle le corps humain, avec des vêtements légers et peu d'activité, ne nécessite pas de dépenses énergétiques pour rester à l'aise. Dans cette zone, les valeurs de température sont comprises entre 21 et 26°C et des valeurs d'humidité relative comprises entre 20% et 70%. Aucune stratégie ne doit être mise en œuvre pour le confort thermique. Les conditions de température et d'humidité sont également acceptables pour certains corps humains en fonction du sexe, du métabolisme interne, de la taille et de la performance de l'activité. La zone 2 sur le diagramme est la seconde zone confortable située entre les valeurs de températures 20°C et 27°C et les valeurs d'humidité relative comprises entre 20% et 80% et la ligne entre la température de 24°C et 80% d'humidité relative ainsi que l'intersection de la ligne de température 27°C et 50% d'humidité relative.

2.3.2.2 Chauffage solaire passif

Le terme « passif » concerne la conception de l'enveloppe du bâtiment. Le chauffage solaire passif a été largement utilisé tout au long de l'histoire avec un grand succès [Butti K et Perlin J 1980]. La zone concernée est définie par des températures comprises entre 7°C et 13,5°C (voir zone 4 sur la figure 2.5). Pour se rapprocher de la zone de confort, il est nécessaire d'adopter une stratégie d'absorption solaire permettant le gain d'énergie thermique dans l'espace. L'objectif est d'augmenter la température de 7°C à plus de 13,5°C pour cela il faut que la conception du bâtiment favorise l'accumulation du rayonnement solaire et distribue ensuite cette énergie à d'autres dépendances ou la restitue au bâtiment au fil du temps. La distribution d'énergie peut être directe par rayonnement (gradients de température) ou convection (réchauffement de l'air au contact du terrain émetteur). Aussi, elle peut être indirecte en forçant l'air à circuler dans l'espace. Différentes solutions sont prévues pour cette zone, car l'énergie peut être captée par n'importe quelle partie de l'enveloppe du bâtiment, y compris le sol, les murs, le toit et surtout les ouvertures. Ces dernières peuvent permettre l'entrée des radiations pendant les périodes où cela est nécessaire. Aussi peuvent-elles empêcher ces radiations de s'échapper du bâtiment en utilisant, par exemple, la menuiserie et les fenêtres de verre appropriées. Les grandes fenêtres de la façade orientées vers le sud d'une maison passive contribuent fortement au chauffage des bâtiments [Badescu et Staicovici, 2006].

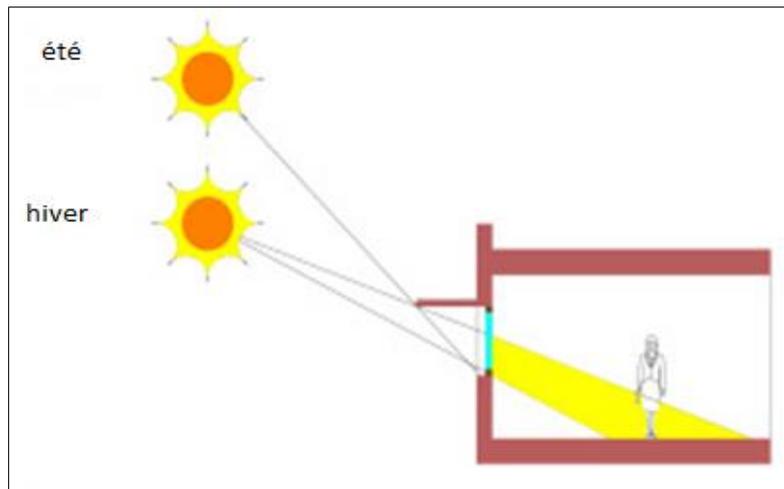


Figure 2.6 : Techniques de chauffage solaire passif (l'auvent en tant que solution de chauffage solaire passif)

La figure 2.6 montre un exemple d'auvent dans des zones chaudes qui permet la capture du rayonnement solaire pendant la saison hivernale et qui limite ce processus pendant l'été. Ainsi, les ouvertures du bâtiment peuvent faciliter l'entrée du rayonnement solaire pour le stockage dans le plancher du bâtiment qui peut être retourné avec une différence de phase temporelle.

2.3.2.3 Humidification

Un manque d'humidité dans l'air peut provoquer des troubles respiratoires chez les humains en provoquant une sécheresse excessive des voies respiratoires et peut également provoquer une dermatite caractérisée par une peau sèche. Pour cette raison, il est nécessaire de compléter l'air intérieur par de la vapeur d'eau dans certaines zones climatiques. L'objectif de cette stratégie est de parvenir au confort en augmentant l'humidité relative. Ceci est accompli en introduisant de l'air qui a traversé une surface d'eau. Cet air peut être déplacé par des différences de pression (passive) ou par des dispositifs mécaniques (actifs). Cette stratégie correspond à la zone de température allant jusqu'à 22,5°C. Les niveaux d'humidité relative sont variables, mais peuvent atteindre 40% à 10°C comme le cas de la zone 6 du diagramme [Givoni, B., 1992]. Les stratégies d'architecture bioclimatique les plus courantes visent à introduire de l'humidité à travers les courants d'air, pour lesquels il est nécessaire de prendre en compte les conditions de circulation d'air dominantes afin de fournir de l'humidité aux pièces environnantes [Francisco M A et al., 2015]. Les stratégies les plus fréquentes comprennent la présence de végétation à proximité (figure 2.7a) ou à l'intérieur du bâtiment (par exemple dans un patio, figure 2.7b).

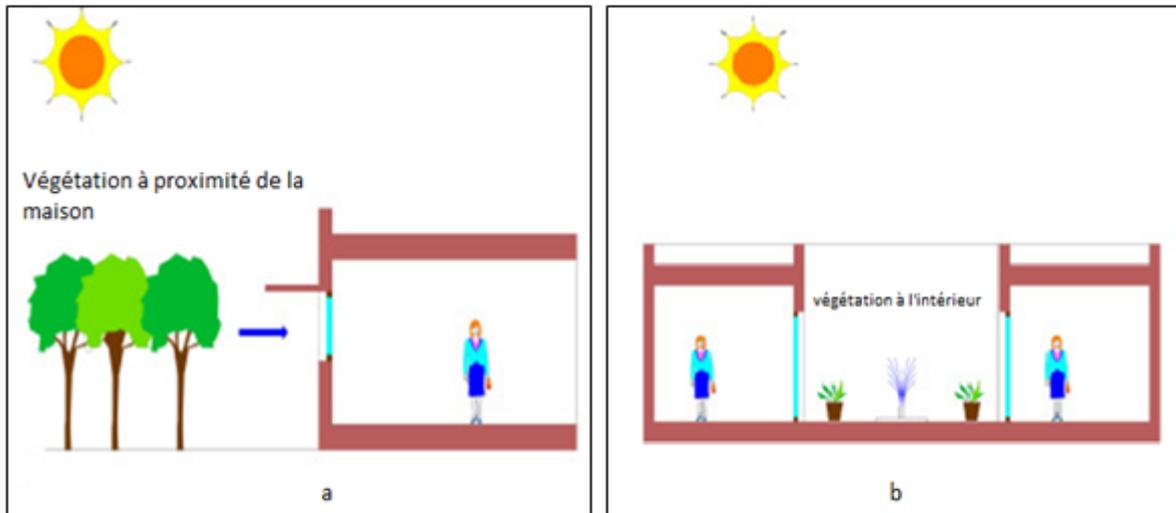


Figure 2.7 : Techniques d'humidification

- a) Exemple d'humidification de l'air par contact avec la végétation ;
- b) Exemple d'humidification de l'air par contact avec la végétation à l'intérieur du bâtiment (patio).

2.3.2.4 Protection solaire

Pour les zones dont les conditions climatiques correspondent à celles de la zone 8 sur la figure 2.5, les valeurs de température atteignent 20°C ou plus [Givoni B, 1992]. Dans ce cas, les stratégies d'architecture bioclimatique tentent d'éviter les gains de chaleur à travers le rayonnement solaire et d'éviter que les augmentations de température restent dans la zone de confort. La protection est concentrée sur toutes les ouvertures du bâtiment, mais peut également être appliquée à l'enveloppe du bâtiment [Francisco M.A et al., 2015]. La protection solaire peut être mise en œuvre naturellement comme l'utilisation d'arbres à feuilles caduques (figure 2.8a) ou d'éléments architecturaux tels que des pergolas à végétation décidue (figure 2.8b), des stores extérieurs (Figure 2.8c).

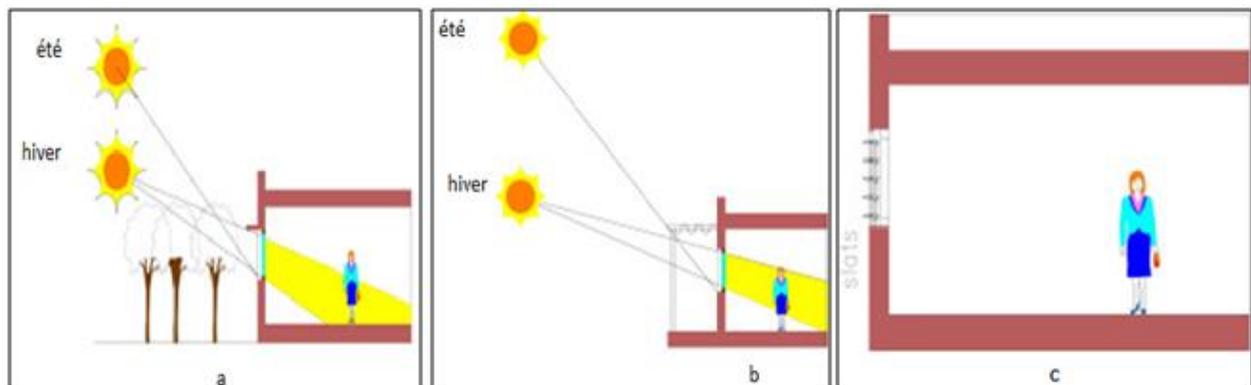


Figure 2.8: Techniques de protection solaire

- a) Protection solaire assurée par la végétation feuillue ;
- b) Pergola avec protection solaire induite par la canopée de la végétation caducifoliée ;
- c) Utilisation des stores extérieurs en tant que stratégie de protection solaire.

2.3.2.5 Refroidissement à travers une masse thermique élevée

La stratégie de refroidissement à travers une masse thermique élevée correspond à la zone 9 de la figure 2.5 et est liée à des températures comprises entre 20 et 35°C et une ligne qui s'étend de l'intersection de 24°C et 80-50% d'humidité relative jusqu'à l'intersection de 35°C et 30% d'humidité relative [Givoni B, 1992]. Cette stratégie comprend l'inertie ou la masse thermique de l'enveloppe du bâtiment qui reçoit et transmet ensuite le rayonnement à l'intérieur avec une différence de phase pour atteindre l'uniformité climatique tout au long de la journée [Francisco M.A et al., 2015]. Les matériaux capacitifs aident à créer cette différence de phase dans la transmission d'énergie quotidienne et tempèrent l'intérieur du bâtiment. La dissipation nocturne par la façade et le toit est nécessaire. Il est idéal de placer un dispositif de protection mobile de jour pour éviter les gains et favoriser la dissipation nocturne ; un exemple de ceci comprend les auvents qui couvrent les patios à Séville (Figure 2.9).

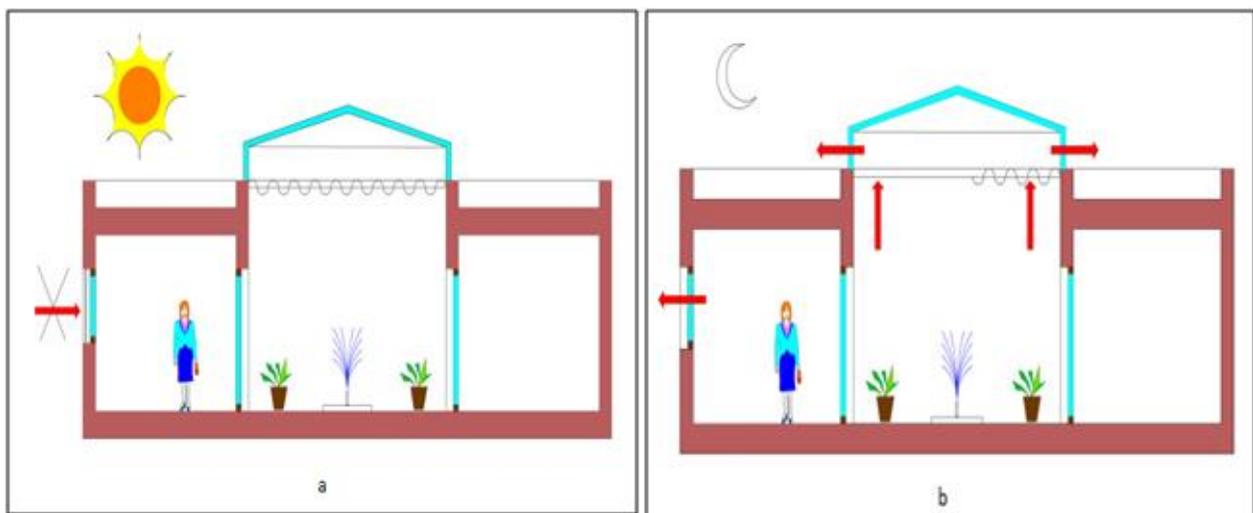


Figure 2.9 : Un patio Sévillien avec un mécanisme de protection qui évite les gains de chaleur pendant la journée et favorise la dissipation nocturne.

2.3.2.6 Refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation correspond à la zone 10 (figure 2.5) et est liée à des températures entre 20°C et 40,5°C et la ligne pointillée qui s'étend de l'intersection de 25,5°C et 75% d'humidité relative jusqu'à l'intersection à 38,5°C et 20% d'humidité relative à une troisième intersection à 40,5°C et 10% d'humidité relative [Givoni B, 1992]. Cette stratégie est très recommandée dans les climats secs et arides [Francisco M.A et al., 2015]. Elle vise à atteindre le confort en réduisant la température par l'évaporation de l'eau tout en augmentant simultanément l'humidité relative. A travers le refroidissement par évaporation, l'humidification peut être obtenue par :

- végétation extérieure (figure 2.10a) ;
- couverture végétale du toit (figure 2.10b) ;
- arrosage du toit (figure 2.10c).

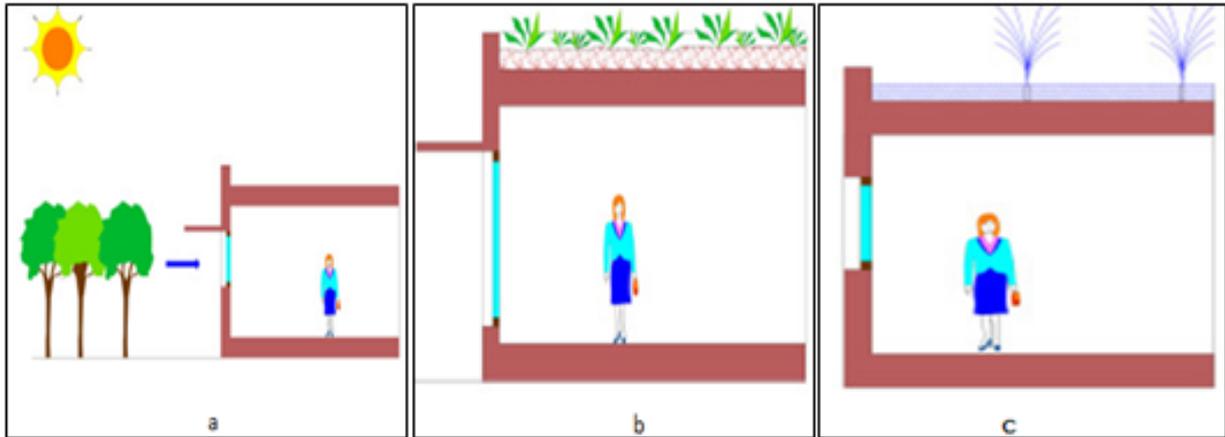


Figure 2.10 : Techniques de refroidissement par évaporation

- a) Végétation extérieure pour le refroidissement par évaporation ;
- b) Végétation du toit pour le refroidissement par évaporation ;
- c) Arrosage du toit pour le refroidissement par évaporation.

2.3.2.7 Refroidissement par haute masse thermique avec rénovation nocturne

Le refroidissement par haute masse thermique avec rénovation nocturne correspond à la zone 11 du diagramme de Givoni et est lié à des températures comprises entre 20°C et 44°C et la ligne qui passe de l'intersection à 44°C et 5% d'humidité relative à une autre intersection à 31,5°C et 32% d'humidité relative jusqu'à une intersection finale à 24°C et 80% d'humidité relative [Givoni B, 1992]. Cette stratégie crée une différence de phase entre l'effet des températures extérieures de jour et de nuit pour effectuer une rénovation nocturne [Francisco M.A et al., 2015]. Elle est efficace lorsque le climat présente des différences thermiques importantes entre les périodes de jour et de nuit. L'enveloppe du bâtiment doit comprendre des matériaux capacitifs qui transmettent l'énergie avec la plus grande différence de phase possible (environ 12 h) avec un peu d'amortissement. La nuit, la dissipation et la rénovation doivent être effectuées à travers les ouvertures, les patios et les toits.

2.3.2.8 Refroidissement par ventilation naturelle et mécanique

La stratégie de refroidissement par ventilation naturelle et mécanique correspond à la zone 12 (figure 2.5) et est liée par des valeurs de température comprises entre 20°C et 31,5°C, des humidités relatives entre 95% et 20% et la ligne qui s'étend d'une intersection à 31,5°C et 50% humidité relative à une autre intersection à 26,5°C et 95% d'humidité relative [Givoni B, 1992]. Une grande sensation thermique est obtenue alors que l'air intérieur est nettoyé simultanément. Ceci peut être réalisé naturellement en utilisant la ventilation transversale des façades nord-sud ou les vents dominants (figure 2.11a), l'effet de cheminée (figure 2.11b), une ventilation souterraine (figure 2.11c), des espaces verticaux à l'intérieur d'un bâtiment ou des patios (figure 2.11d). De plus, cet effet peut être obtenu mécaniquement en utilisant des ventilateurs ou des soufflantes.

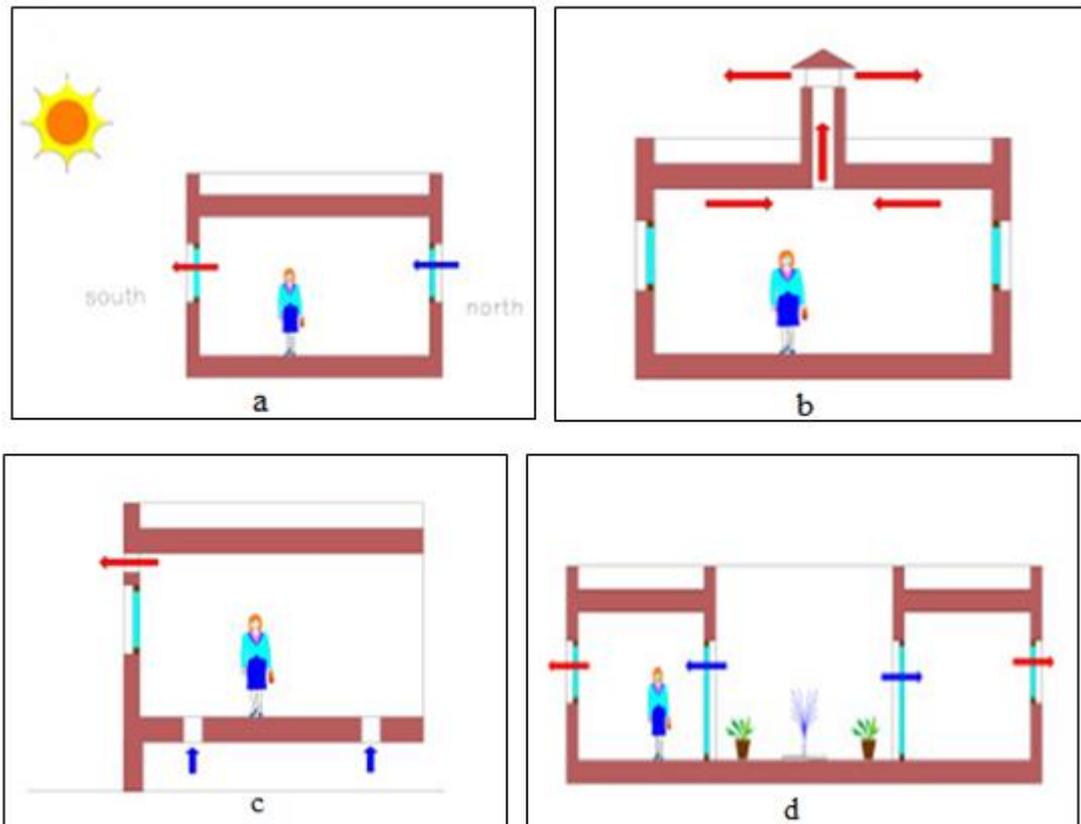


Figure 2.11 : Techniques de ventilation par refroidissement naturel et mécanique

- a) Ventilation transversale dans le sens nord-sud ;
- b) Effet de cheminée ;
- c) Ventilation souterraine ;
- d) Patio en tant que solution de refroidissement naturelle à ventilation.

2.3.2.9 Climatisation

La stratégie de climatisation correspond à la zone 13 de la figure 2.5 [Givoni B, 1992]. Elle a pour objectif de parvenir au confort en installant des machines de climatisation pour réduire la température et l'humidité relative. Cependant, une température de 26°C est suffisante pendant l'été et ne nécessite pas la consommation d'énergie excédentaire. Lorsqu'il n'est pas possible de réaliser une zone de confort dans un bâtiment en utilisant uniquement des stratégies d'architecture bioclimatique, des solutions naturelles devraient être utilisées en complément de stratégies mécaniques [Mileto C et al., 2012 ; Cook J, 1983]. La climatisation se définit comme le contrôle et la gestion de la température et de l'humidité à l'intérieur de la maison tout en incluant les tentatives de chauffage dans les climats froids ainsi que les tentatives de refroidissement dans les climats chauds. Une isolation thermique appropriée de la maison permettra de réduire les fuites de chaleur en hiver et la demande de refroidissement en été. Une maison avec des murs et un toit très bien isolés et des fenêtres en verre à double vitrage permettra de réaliser des économies dans la consommation d'énergie utilisée pour le chauffage et le refroidissement et de réduire la pollution sonore. Aussi, une orientation optimale du bâtiment où la façade principale est vers le sud tout en évitant que les fenêtres et les murs ouest soient mal isolés contribue de façon considérable à réduire des dépenses énergétiques. Cependant, si les

rayonnements solaires sont évités en été, des économies importantes peuvent être réalisées dans le refroidissement. L'usage des auvents, des stores et rideaux permet la conservation de la chaleur pendant les nuits d'hiver et évite l'entrée de chaleur pendant l'été [Francisco M A et al., 2015]. Dans les climats chauds, le toit léger et les couleurs éclatantes des murs extérieurs reflètent le soleil, empêchant ainsi le chauffage et améliorant l'éclairage des espaces intérieurs. Les équipements installés pour refroidir la maison doivent être très efficaces avec la prise en compte des utilisations prévues ainsi que les dimensions et les caractéristiques des espaces à climatiser. De même, il est recommandé d'effectuer des travaux de maintenance et d'inspection appropriés des équipements de climatisation pour prolonger la durée de vie de ces machines et améliorer la sécurité de leur utilisation.

2.4 Aperçu sur l'architecture et l'urbanisation au Mali

2.4.1 Aperçu sur l'architecture

Le Mali est un pays sahélien qui a brillé par sa culture et ses traditions avec une architecture diversifiée pendant des décennies. Depuis l'antiquité les architectes maliens ont conçu les habitats en fonction des besoins. Des habitations qui prenaient des formes dont l'interprétation ne pouvait se limiter à ces besoins. Elles présentent aussi des identités sociale et culturelle du pays. Les différentes formes d'habitations illustrent l'harmonisation de deux entités (l'homme et l'environnement). Au Mali, l'évolution architecturale se conjugue surtout avec son évolution historique. Chaque groupe ethnique du pays, à travers l'histoire, a su développer sa propre tradition architecturale. « Dans certains cas, des styles plus larges peuvent être identifiés, tels que l'architecture des grandes villes comme Tombouctou, ou Djenné. Cependant, comme avec la plupart des traditions architecturales, l'architecture au Mali a été soumise à de nombreuses influences extérieures en fonction de l'évolution historique du pays, comme en témoignent les bâtiments coloniaux à Bamako, et dans les capitales régionales à travers le pays » (Figure 2.12).



Figure 2.12: Vue de quelques bâtiments coloniaux au Mali

- a) : Hôtel de ville sur l'avenue de la Liberté à Bamako ;
- b) : Bâtiment colonial à Kayes ;
- c) : Bâtiment colonial à Ségou ;
- d) : Lycée des jeunes filles de Bamako.

Au Mali, des cités entières ont été construites en banco stabilisé ou en pierres taillées. Aujourd'hui encore, certains architectes maliens ont développé des compétences avérées dans ce domaine et le résultat est assez impressionnant. Les mosquées de Djenné, Djingareyber à Tombouctou sont parmi les plus beaux exemples de cette tradition séculaire (voir figure 2.13).



Figure 2.13: Vue de quelques bâtiments traditionnels au Mali

- a) : Mosquée de Djenné ;
- b) : Mosquée de Djingareyber (Tombouctou).

Ces types d'habitats montrent comment l'architecture traditionnelle malienne a su s'adapter dans les milieux les plus hostiles, ou encore les remodeler et profiter de ce qu'offrent les sites comme l'inertie thermique (les pierres dans les constructions dans le pays Dogons) afin de supporter les conditions, les plus sévères. C'est le cas des bâtiments bioclimatiques des pays Dogons sur le flanc des collines dans les falaises de Bandiagara au Mali. Ces bâtiments offrent des avantages de confort thermique et acoustique très impressionnants dans une zone où le climat est chaud avec des vents secs et forts (Figure 2.14).

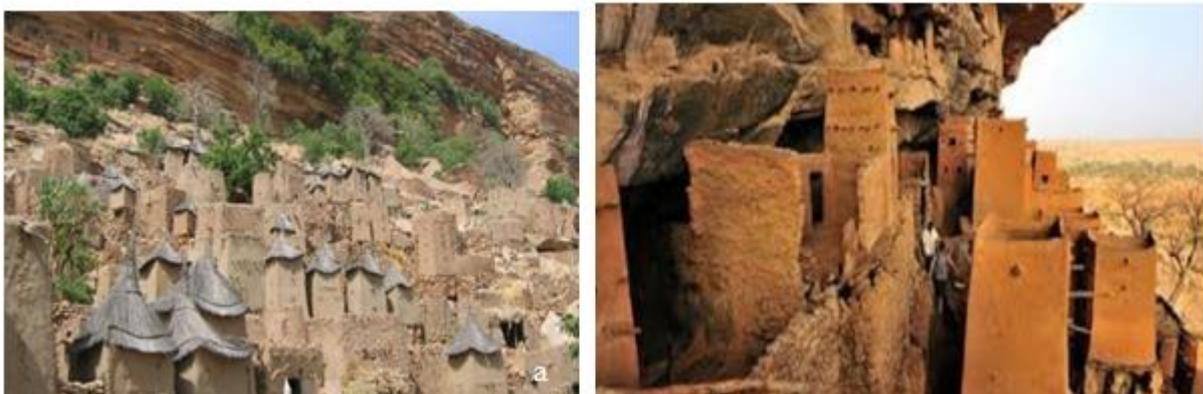


Figure 2.14: vue des bâtiments bioclimatiques des pays Dogons

Des matériaux de construction (banco ou argile) et techniques de construction (orientation et nature des ouvertures) qui sont adaptés au climat local et à la zone. Ces matériaux de construction dont l'inertie thermique permet de réguler l'ambiance interne. Dans les grandes villes comme Bamako, l'utilisation de ces matériaux dans la construction commence à disparaître, et cela au profit du ciment et autres produits industriels. Ce qui fait qu'aujourd'hui, la plupart des bâtiments à Bamako sont plus énergivores que les précédents ; ceci étant dû à l'utilisation des systèmes de climatisation, de ventilation mécanique et des ouvertures en vitrage pour le confort au sein des bâtiments (figure 2.15).



Figure 2.15: Vue de quelques bâtiments tendance modernes à Bamako

2.4.2 Aperçu sur l'urbanisation

En Afrique, l'une des caractéristiques majeures du développement des grandes métropoles reste l'urbanisation spontanée. En effet, partout les quartiers des zones périphériques des capitales africaines continuent de s'étendre. Les quartiers spontanés abritent plus de 40% de la population résidente à Bamako [Ogalama Y G, 2013]. L'évolution démographique a considérablement modifié la production de logements due à l'augmentation du solde migratoire et la décohabitation des ménages. Ce qui a beaucoup participé à l'extension rapide des quartiers dans la ville de Bamako. Dans la capitale comme dans la plupart des grandes villes du Mali, les grands projets ou chantiers témoignent de la forte urbanisation du pays. Cette tendance d'urbanisation favorise depuis ces dernières années des problèmes d'occupations de terres (rareté des espaces pour construction, et le prix élevé dans certaines zones dans la ville de Bamako avec les spéculations foncières). Les terrains constructibles font l'objet de convoitise dans tous les centres urbains et périurbains avec leur lot de conflits sociaux. Ces problèmes de terres engendrent la prolifération et le rapprochement des chantiers sur des zones déclarées comme des zones interdites (zones industrielles, aéroportuaires) (figure 2.16).



Figure 2.16: Bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako

- a) Image des chantiers dans la zone aéroportuaire de Bamako ;
- b) Habitations à proximité de l'aéroport de Bamako côté Nord ;
- c) Bâtiments industriels à proximité de l'aéroport de Bamako ;
- d) Habitations à proximité de l'aéroport de Bamako côté Sud.

La construction dans ces zones demande généralement des exigences pour une meilleure qualité de vie des habitants et une efficacité environnementale. Dans les pays développés, ces exigences tiennent compte des normes et réglementations dans les constructions. Par exemple, nous pouvons citer entre autres :

- ✓ les limites de zonage de construction à proximité des aéroports ;
- ✓ le respect de typologie d'habitat pour une zone indiquée et l'utilisation judicieuse de la zone ;
- ✓ l'attention sur les techniques adéquates de construction (orientation des bâtiments, isolations des façades ou insonorisation) et l'utilisation appropriée des matériaux de construction.

Au Mali, les bâtiments construits à proximité des aéroports ne respectent pas ces exigences, car les normes et réglementations ne sont pas scrupuleusement appliquées.

L'accession à la propriété est l'option judicieuse adoptée par les différents gouvernements du Mali. Une vision globale de sa mission sociale de vouloir contribuer au développement de l'accession à la propriété a nécessité des programmes de construction de logements dans le pays.

Cette politique de l'habitat est l'expression de la volonté des plus hautes autorités de notre pays de créer les conditions en vue de faciliter l'accès du plus grand nombre de Maliens à un logement décent et à moindre coût. Ces logements sociaux sont destinés généralement aux citoyens à revenus intermédiaires. À partir des années 1960 et jusqu'à nos jours, ces programmes de constructions ont été élaborés dans certaines villes du pays [Rapport OMH, 2010]. De 1960 à 1992, la politique de l'habitat de l'État malien s'est traduite par des réformes et des actions. Les réformes ont concerné entre autres:

- la mise en place d'un crédit immobilier au sein de la Banque de Développement du Mali (BDM) en 1960 ;
- la création de la Société d'Équipements du Mali (SEMA) en 1961 ;
- l'adoption en 1967 des décrets n°130/PG-RM du 29 août et n°146 du 27 septembre portant respectivement sur les « modalités de fixation des loyers plafonds des maisons à usage d'habitation » et la réglementation des rapports entre propriétaires et locataires ;
- la création du Fonds National du Logement (FNL) en 1967 au sein de la SEMA en vue de mobiliser des ressources financières pour subventionner les programmes de logements de ladite Société ;
- le désengagement de l'État quant à son intervention directe dans la promotion de l'habitat ;
- l'arrêt de tout lotissement dans les villes en 1979 avant l'élaboration des Schémas Directeurs d'Aménagement et d'Urbanisme et leur approbation ;
- la viabilisation de tout lotissement préalablement à toute attribution de parcelles ;
- la création de l'Agence de Cessions Immobilières (ACI) intervenue en 1992 pour la vente des parcelles de Baco-Djicoroni dans le cadre du deuxième Projet Urbain du Mali ;
- la prise de mesures législatives et réglementaires ;
- la promotion des matériaux de construction ;
- la mise en place d'un mécanisme de financement de l'habitat [Rapport OMH, 2010].

Le plan d'action a considérablement contribué à la réalisation des projets de logements par la SEMA soit 400 logements. En 1996 des mécanismes de financement ont été mis en œuvre à savoir la création en 1996 de l'Office Malien de l'Habitat (OMH) apportant des appuis techniques et financiers à tous les intervenants dans le secteur de l'habitat et la création en 1996 de la Banque de l'Habitat du Mali (BHM) en tant qu'institution spécialisée dans le financement de l'habitat.

De 1997 à 2002, nous avons constaté une période d'arrêt de ces campagnes de construction de logements sociaux. En 2002, le programme de réalisation des logements sous le nom du Projet de construction des logements sociaux a été réinitié. Ces premiers logements étaient destinés aux fonctionnaires de l'État sous forme de contrats de bail sur une période de 15 à 20 ans. Le premier projet est lancé en 2002 et concernait la construction de 100 logements à Sotuba un quartier de Bamako. Les éditions qui ont suivi ont concerné toutes les régions du pays. Les logements construits sont destinés aux Maliens de toutes les catégories de la couche sociale (fonctionnaires, non-salariés, et la diaspora). Selon le revenu des bénéficiaires, les logements sont de divers types (F2 en tôle, F3A et F3B en dalle, F4 en dalle, F5 en étages) (Figure 2.17).



Figure 2.17: Vue des logements sociaux de Bamako

- a) logements type F5 ;
- b) logements type F3 ;
- c) logements type F4.

Depuis cette date jusqu'aujourd'hui, le programme suit son cours. Le tableau ci-dessous donne les logements construits à Bamako depuis 2002 à nos jours.

Tableau 2-3: Illustration des logements sociaux réalisés à Bamako de 2002 à 2015

Années	Nombre de logements sociaux construits	Localités à Bamako
2002	100	Sotuba
2004	1008	Yirmadio
2005	525	Yirmadio
2006	880	Lassa + Yirmadio
2007	1087	N'Tabacoro
2009	1027	N'Tabacoro
2010	1551	N'Tabacoro
2015	1552	N'Tabacoro

Source : OMH

2.5 Qualité de performance de ces logements sociaux

Pour la réalisation de ces logements, des partenaires privés ont été impliqués dans les phases de financements et d'exécutions. Des entreprises de BTP (Entreprises privées nationales et chinoises) ont pris part à des travaux de construction. Certaines de ces entreprises privées nationales sont souvent mal équipées en matériels et en ressources humaines. Ces entreprises privées nationales et chinoises sous-traitent les contrats des marchés de construction des logements avec les maçons et techniciens du bâtiment. Des maçons et techniciens dont les compétences s'avèrent insuffisantes pour faire ces genres de travaux. En plus de cela, le contrôle et le respect des cahiers charges ne se font pas de façon rigoureuse. Ces réalités sur le terrain influencent beaucoup les résultats des prestations.

Par conséquent, les bénéficiaires de ces logements (les citoyens à revenus moyens) sont souvent obligés à procéder des travaux de rénovation pour des problèmes de confort (thermique, acoustique et environnemental) après quelques années d'occupation. Ces travaux de rénovation sont entre autres :

- Installations des systèmes de climatisation ou de refroidissement pour le confort thermique ;
- Modifications des types des ouvertures (portes et fenêtres) pour des confort thermique et acoustique (les logements situés dans les zones aéroportuaires) ;
- Modifications de l'isolation des façades pour des confort thermique et acoustique ;
- Réaménagement ou réinsertion des balcons, des cours, des hangars pour le confort thermique, visuel ;
- Reboisement pour la végétation des cours, des murs, des devantures pour atténuer les rayonnements solaires sur les façades afin d'obtenir plus de confort et un meilleur cadre de vie environnemental.



Figure 2.18: Vue des logements sociaux rénovés

- a) Reboisement autour du logement ;
- b) Végétation des murs du logement type F5 ;
- c) Renforcement de l'isolation des façades du logement type F5 ;
- d) Végétation des murs du logement type F3.

Ces travaux de rénovation engendrent des dépenses supplémentaires en plus des frais de mensualités du logement. Cela affecte fortement l'aspect social du projet. Pour préserver et assurer les objectifs des projets de construction des logements sociaux, les décideurs et responsables des projets doivent veiller sur :

- le contenu du cahier de charges qui doit se refléter sur des concepts de construction pertinents et l'utilisation des matériaux compatibles aux réalités des zones de construction ;
- le respect strict des exigences du cahier de charges.

Pour ce faire, l'évaluation de risques affectant les performances des logements déjà réalisés (qui fait l'objet de cette étude) est capitale pour un retour d'expérience des futurs projets de constructions. Ces différentes mesures peuvent servir pour l'amélioration de la performance des bâtiments et donc le confort des usagers à travers les recommandations des bonnes pratiques, solutions préventives et correctives aux difficultés et dysfonctionnements constatés. Dans le

chapitre 4, un logement du type F3B du projet fait l'objet d'étude de cas pour la gestion et l'évaluation des risques affectant la performance pour les bâtiments bioclimatiques.

2.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons abordé, en premier lieu, le contexte énergétique du Mali. Les études bibliographiques relèvent que la consommation du secteur résidentiel représente la grande partie de la demande énergétique au Mali (environ 70 % de la consommation totale du pays). Cette forte consommation du secteur du bâtiment est due au choix inadapté des matériaux et les techniques de construction aux réalités du climat local. Ensuite un regard sur le concept de l'architecture bioclimatique utilisant des techniques immuables en étroites relations avec le climat a été développé à travers une description détaillée du principe bioclimatique, des notions d'orientation, d'infiltration, d'étanchéité des ouvertures, d'inertie thermique, d'isolation de l'enveloppe du bâtiment de climat et de diagramme bioclimatique. Aussi une classification des climats est donnée pour une meilleure application de l'architecture bioclimatique. Nous avons terminé le chapitre par un aperçu général sur l'architecture et l'urbanisation au Mali. Dans cette partie, l'évolution de l'architecture du Mali (l'architecturale traditionnelle à l'architecturale contemporaine) a été décrite tout en mettant l'accent les influences extérieures en fonction de l'évolution historique du pays.

Chapitre 3 : Méthodologie d'évaluation des risques dans les bâtiments performants

3. Méthodologie d'évaluation des risques dans les bâtiments performants

3.1 Introduction

Le secteur du transport aérien est l'un des secteurs de l'économie dans le monde qui a connu la plus grande croissance avec un taux annuel moyen d'environ 5% au cours des 20 dernières années [Vespermann et Wald, 2011]. Le nombre de passagers a augmenté de 6,5% [OACI, 2012], une hausse de 5,6% par rapport à 2010 [IATA., 2014] et 7,5% prévisions du marché mondial 2011-2031 [Airbus., 2012]. Cette augmentation devrait se poursuivre suite au développement de l'économie mondiale. Les opérations des trafics aériens (cycle atterrissage-décollage et roulage, etc.) affectent principalement le territoire à proximité des aéroports (les bâtiments et autres infrastructures). Le développement des activités de l'aviation entraîne l'expansion des infrastructures aéroportuaires vers les zones habitées. Aussi l'évolution rapide de la démographique entraîne une forte urbanisation des villes dans les pays en voie de développement ; notamment ceux de l'Afrique subsaharienne. Dans ces pays, les réglementations acoustiques et thermiques sur les bâtiments ne sont pas appliquées ou n'existent même pas. Les impacts environnementaux dus aux trafics aériens (nuisances sonores) et aux consommations d'énergie des bâtiments (émissions CO₂) constituent des préoccupations pour un développement durable. Face au manque ou à la non application de réglementations pour les constructions, le secteur du bâtiment est confronté à des défis de performance acoustique et énergétique dans les zones aéroportuaires des pays à climat tropical chaud. Il est donc nécessaire que les bâtiments de ces zones répondent à un niveau de performance acoustique et énergétique pour le confort et le bien être des habitants. Pour ce faire, une évaluation de risques affectant la performance de quelques bâtiments habitables de la zone aéroportuaire est d'importance capitale. Cette étude permet de mettre en évidence les facteurs de risques affectant la performance (les pathologies, les non-qualités, etc.) et d'en proposer des bonnes pratiques et des solutions correctives. Dans ce chapitre, nous développons les notions de risque et les quelques définitions qui lui sont associées. Aussi, nous introduisons le processus de retour d'expérience et développerons les différents concepts en termes d'organisation et de représentation des connaissances. Ensuite nous établissons la relation entre l'évaluation des risques et le retour d'expérience qui sont deux concepts liés par des objectifs complémentaires. Puis nous mettons l'accent sur les connaissances pratiques au niveau de connaissances des acteurs et experts de construction dans le processus d'évaluation et gestion des risques.

3.2 Notions de risque

Depuis quelques années, la notion et le concept d'évaluation de risques ont été établis en tant que domaine scientifique. Des principes et des méthodes ont été développés pour conceptualiser, évaluer et gérer les risques. Aujourd'hui, ces principes et méthodes représentent encore dans une

large mesure la base du domaine de risques. Beaucoup d'études liées à la fois aux notions théoriques, aux modèles et aux procédures pratiques ont été réalisées. La littérature recense de nombreuses définitions de la notion de risques. Plusieurs auteurs ont tenté d'explicitier l'interprétation du sens de cette notion de risque. Ils ont souvent conçu une définition qui s'accorde avec les domaines d'études considérés. Selon le domaine d'étude, de nombreuses définitions dans la littérature scientifique sont données sur la notion de risque. De façon fréquente, le risque peut se confondre au danger (ambiguïté dans l'expression du risque) comme on le constate dans la définition de [Ewald, 2002] pour qui : le risque est soit quelque chose que l'on évite, soit quelque chose que l'on prend. Au sens de cette définition, le risque est un obstacle que l'on essaie d'éviter (danger) alors que le risque se prend en fixant un objectif. De nombreuses définitions du risque révèlent la complexité du concept en mettant en évidence ces diverses dimensions. Entre autres, on peut citer le vocabulaire associé qui porte sur les événements, la probabilité d'occurrence, les causes, la gravité, les conséquences, le danger, l'incertitude ... Toutefois, dans un contexte d'évaluation des systèmes complexes, le cadre générique de définition du risque est considéré en intégrant explicitement les incertitudes et les connaissances associées.

3.3 Quelques définitions sur la conceptualisation du risque

Plusieurs tentatives ont été faites pour établir des définitions largement acceptées de termes clés liés à des concepts fondamentaux pour le domaine des risques [Thompson et al., 2005]. Dans beaucoup de littératures, le risque est présenté en mettant l'accent sur les conséquences négatives et indésirables. Différentes définitions introduisent le risque comme un concept qui a plusieurs facettes. Chaque définition met l'accent sur une dimension particulière du risque, mais prend parfois en compte des aspects provenant d'autres points de vue. Selon [Sienou, 2009], il est possible de distinguer quatre facettes du risque regroupant chacune des définitions. Les quatre facettes identifiées permettent de percevoir le risque comme un événement, une mesure, une incertitude et un état. Les définitions ci-après permettent d'illustrer séparément ces facettes. Ce qui est commun à toutes ces définitions, c'est que le concept de risque comprend des événements (événements initiateurs, et scénarios), des conséquences (résultats) et des probabilités. Les incertitudes sont exprimées par des probabilités. La gravité est un moyen de caractériser les conséquences.

1) risque perçu comme une mesure

- ✓ Le risque est une mesure de la probabilité et de la gravité des effets indésirables [Lowrance, W., 1976] ;
- ✓ Le risque est la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences [ISO., 2002] ;
- ✓ Le risque est la mesure du danger », dans le domaine de l'industrie [Kervern et Rubise, 1991].

2) risque perçu comme un événement

- ✓ Le risque est un aléa dont la survenance prive un système d'une ressource et l'empêche d'atteindre ses objectifs dans le milieu industriel [Wybo, 1999] ;

- ✓ La possibilité que quelque chose se passe, qui aura un impact sur les objectifs [Standards Association of Australia., 1999].

3) risque perçu comme un état

- ✓ Situation ou circonstance indésirable qui a, à la fois, une probabilité de se produire et une conséquence négative potentielle sur un projet [ISO, 2003] ;
- ✓ Le risque commercial est la menace qu'un événement ou une action affectera négativement la capacité d'une entité à atteindre ses objectifs commerciaux et à exécuter ses stratégies avec succès [Marrs et Mundt., 2007].

4) risque perçu comme une incertitude

- ✓ Certaines définitions présentent le risque comme intégrant la notion d'incertitude : la possibilité que survienne un événement dont l'occurrence entraînerait des conséquences (positives ou négatives) sur le déroulement de l'activité du projet dans le cadre de la gestion de projet [Gourc, 2006]. Cette vision considère donc le risque comme l'occurrence d'un événement probable et s'intéresse plus particulièrement aux causes et aux conséquences de cet événement sans toutefois les mesurer ;
- ✓ Le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs [ISO, 2009a, b] ;
- ✓ Le risque est l'incertitude et la gravité des conséquences (ou des résultats) d'une activité par rapport à quelque chose que les humains apprécient [Aven et Renn, 2009].

L'incertitude est donc l'état qui signifie le manque d'information concernant la compréhension ou la connaissance d'un événement, de ses conséquences ou de sa vraisemblance. La notion «d'incertitude» est ainsi introduite, mais elle reste un concept encore assez nouveau dont la méconnaissance est importante malgré les derniers travaux incorporant cette notion dans la définition du risque [Aven et Renn, 2009, Aven et Zio, 2011].

Les définitions présentées ci-dessus exposent une présentation des différentes manières d'appréhender le risque. Dans sa forme la plus générale, nous pouvons décrire le risque en utilisant le triplet (C', Q, K), où C' est la conséquence spécifiée, Q est une mesure d'incertitude exprimant l'incertitude sur C' et K est la connaissance Q. Les connaissances sont essentiellement des croyances justifiées, fondées sur des données, des informations, des modèles, des arguments ou des tests. Partant de cette prémisse, une approche d'évaluation des risques est développée et illustrée dans le contexte de secteur de bâtiment. Ceci permet d'obtenir un niveau de précision plus élevé lorsqu'il s'agit d'approfondir la compréhension de situations complexes dans un contexte d'évaluation des risques relatifs aux problèmes de qualité de vie et de confort des habitants au sein des bâtiments.

3.4 Le retour d'expérience (REX)

Contrairement au concept de risque, le retour d'expérience est un processus qui est moins connu. Toutefois, la démarche du retour d'expérience consiste à réutiliser les expériences passées pour améliorer leurs conditions de vie et éviter de répéter les erreurs passées. Le retour d'expérience consiste donc à l'analyse des faits passés et leur contexte pour réutiliser les connaissances. Cependant, les définitions du retour d'expérience varient en fonction du domaine considéré.

Ainsi, l'accent sur les notions « d'anomalies » et de « dysfonctionnement » c'est à dire sur le traitement d'événements négatifs [REXAO, 2003 ; Vérot, 2001]. Le retour d'expérience est une méthode de gestion des connaissances qui nécessite une meilleure compréhension des notions liées à l'organisation des connaissances et l'utilisation d'un formalisme de représentation pour la capitalisation et l'exploitation des connaissances issues de l'analyse d'événements positifs et/ou négatifs [Béler, 2008, Clermont et al., 2007]. Elle met en œuvre un ensemble de ressources humaines et technologiques qui doivent être organisées pour contribuer à réduire les répétitions d'erreurs et à favoriser certaines pratiques performantes. La relation entre l'évaluation des risques et le retour d'expérience est un phénomène assez délicat. L'évaluation d'un risque a pour objectif de comparer les phénomènes déjà observés à un nouveau risque. Donc le retour d'expérience s'intègre tout naturellement dans cette démarche pour fournir les connaissances nécessaires à l'évaluation d'un risque.

3.4.1 *La classification de REX*

Il existe plusieurs types d'application du retour d'expérience. Nous pouvons citer entre autres :

- le retour d'expérience correctif « le REX correctif », utilisé pour résoudre un problème en s'appuyant sur la résolution de problèmes similaires dans le passé ;
- le retour d'expérience préventif « le REX préventif », appliqué pour éviter qu'un événement redouté ne se produise ou pour limiter l'impact de cet événement en analysant les événements similaires passés ;
- le retour d'expérience positif « le REX positif » ou retour d'expérience basé sur les « bonnes pratiques » consiste à identifier et à capitaliser les « bonnes pratiques » pour travailler sur des informations positives. Au final, le but est de créer une dynamique encourageant les gens à employer et à partager les « bonnes pratiques » afin d'améliorer leurs outils et conditions de travail, mais aussi l'organisation et la qualité de la production [Villeneuve E, 2012].

3.4.2 *Événements positifs et négatifs*

Il est possible de différencier les techniques de retour d'expérience en fonction du type d'événement qu'elles exploitent. Les connaissances issues d'événements négatifs (surprises ou accidents, incidents, anomalies) sont souvent plus simples à exploiter, en particulier à l'aide des méthodes de résolution de problèmes. Ces méthodes sont facilement intégrables aux processus opérationnels existants. La majeure partie des travaux menés actuellement en retour d'expérience se concentre sur ce type d'événement. La principale difficulté liée à cette méthode réside dans la réticence des personnes à signaler ou à décrire objectivement ces événements. Il est fréquent que la gravité d'un problème soit atténuée ou que le problème soit complètement ignoré par la personne responsable de peur d'être sanctionnée. Ce qui gêne considérablement la capitalisation et la validité des expériences capitalisées [Villeneuve E, 2012]. Les données et informations traitées déterminent la classe du retour d'expérience. Dans la littérature, on distingue deux grandes classes de retours d'expérience (statistiques et cognitifs) qui diffèrent principalement par la quantité des données manipulées et donc par les méthodologies utilisées pour appliquer le retour d'expérience (Figure 3.1).

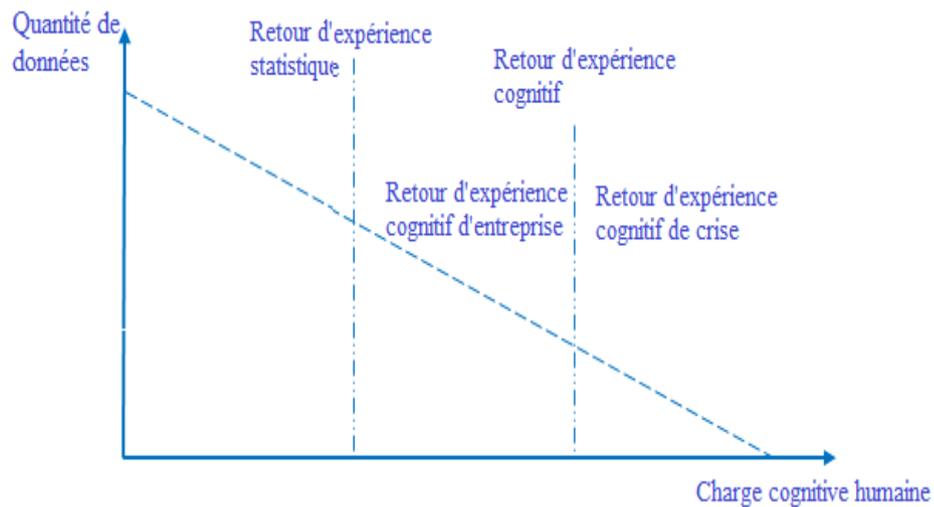


Figure 3.1: Positionnement des différentes classes de retour d'expérience

Lorsque les données sont en nombre suffisant, le retour d'expérience employé peut être qualifié de « statistique », car les méthodes mathématiques de traitement peuvent être employées sur les informations capitalisées pour extraire des tendances intéressantes sur le déroulement de l'activité étudiée. Son principal avantage est qu'il peut facilement être informatisé, car les informations manipulées sont simples et majoritairement numériques. Toutefois, la quantité très importante de données nécessaires aux méthodes statistiques pour fournir des connaissances fiables rend ce type de retour d'expérience difficile à utiliser dans certains contextes où le nombre d'expériences accumulées n'est pas suffisant [Villeneuve E, 2012]. À l'inverse, lorsque le nombre de données ne permet pas d'utiliser les méthodes de traitement statistique ; la connaissance des experts du domaine peut être utilisée pour combler le manque de données. Dans ce cas le retour d'expérience est qualifié de « cognitif ». L'expérience et l'analyse de l'expert permettent en effet de mettre en évidence les points importants pour le sujet étudié malgré l'absence de données statistiques. La méthodologie qui lui est associée nécessite une phase spécifique de formalisation des connaissances tenant compte du contexte des événements étudiés. À ce type de retour d'expérience, sont associées différentes méthodes selon les objectifs à atteindre ainsi que la gravité et le contexte de l'événement étudié. Le retour d'expérience de crise est un retour d'expérience de type « cognitif ». Il est utilisé suite à un événement particulièrement grave tel qu'une catastrophe naturelle, technologique ou humaine (tsunami, accident industriel, ou attentat). Dans cette étude, le domaine du retour d'expérience est basé sur des retours d'expérience de type « cognitif » et à événements négatifs, car les informations traitées concernent principalement des défauts et leurs conséquences « négatives » sur les bâtiments tests. En effet, il est utile de noter que les données et informations capitalisées ne concernent pas uniquement les cas où il y a des défauts avérés.

3.5 Concept de connaissance

Le concept de connaissance dans l'évaluation de risques est vague et très difficile à appréhender dans sa globalité. Généralement, la connaissance est beaucoup liée au savoir et à ses différentes formes. La connaissance concerne donc la maîtrise du savoir sur les objets ou le système étudié ; concepts et entités diverses qui composent l'univers étudié ainsi que les faits concernant ces entités (par exemple les phénomènes et lois de la physique s'expliquant le fonctionnement du

systeme). En plus du savoir de base, il est possible d'ajouter des notions issues de l'observation, c'est-à-dire des événements associés à un objet ou encore une classification des différents objets entre eux. Pour finir, la connaissance contient également les notions de savoir-faire et de méta connaissance (la connaissance ou le recul pris sur le domaine d'activité étudié). Ce qui correspond généralement à l'expertise humaine.

3.6 Approche sur la méthode d'évaluation de risques

Pour mieux refléter les incertitudes et les imprévus dans l'évaluation et l'analyse de risques, nous avons adopté une approche d'évaluation de risques qui affectent les performances (acoustique et thermique) dans les bâtiments. Une approche repose sur la dimension connaissance du domaine (force de connaissance des acteurs de construction) dans le processus d'analyse et d'interprétation de risques. Les acteurs de construction (les exécutants et d'autres experts du domaine) constituent les équipes d'analystes à des différents niveaux. L'évaluation d'un projet de construction nécessite une meilleure connaissance ou maîtrise du domaine de la part de chaque acteur, car un certain nombre de pratiques individuelles ou collectives peuvent provoquer des non-qualités ou facteurs de risques affectant la performance et influencer le développement du risque. Le problème est de savoir comment les techniciens et les maîtres d'œuvre font pour prévenir les risques et de proposer des solutions appropriées ? La gestion des risques dépend de la capacité des experts à les anticiper afin de réduire la probabilité de l'incertitude et de proposer des solutions correctives. Des constats ont révélé qu'il existe d'énormes différences dans la compréhension du risque entre les acteurs de construction de bâtiments. Certains peuvent avoir les connaissances requises tandis que d'autres peuvent avoir des insuffisances de connaissances. La raison de ce manque de connaissances est souvent une mauvaise communication. Dans d'autres cas, tout le personnel est impliqué dans une mauvaise compréhension des risques en raison du manque d'informations par exemple sur le site de construction (données climatiques ou autres spécificités sur la localité). Une évaluation des risques constitue un outil important pour assurer une bonne compréhension des risques. Cependant, une évaluation des risques ne garantit pas que le personnel concerné ait bien compris le risque. Il peut y avoir plusieurs obstacles, tels que :

- l'évaluation des risques qui peut être médiocre au point qu'elle ne tient pas compte des risques importants ;
- le suivi des informations reçues lors de l'évaluation des risques.

Des conditions dangereuses peuvent être identifiées dans l'évaluation des risques, mais la culture de sécurité où les questions sous-jacentes peuvent conduire le personnel à ne pas gérer les risques de manière appropriée.

Dans ce chapitre, une attention particulière est accordée au premier point. Dans plusieurs études, la pensée dominante accorde trop peu d'attention à la dimension de la connaissance du risque. Cette question a fait l'objet de discussions approfondies dans les études de [Aven T, 2013]. Dans ces études, les auteurs soutiennent que :

- ✓ les façons courantes de résumer le risque sont basées sur des probabilités assignées ; par exemple en utilisant des matrices de risques. Cette approche ne reflète souvent pas la

force des connaissances qui soutiennent l'évaluation et la description des risques basée sur la probabilité produite et ceci peut induire les décideurs en erreur. Il est possible d'avoir deux situations avec des probabilités identiques. Mais dans un cas la solidité de la connaissance est forte et dans l'autre, elle est faible. La probabilité elle-même ne présente pas cet aspect du risque. Un événement à risque jugé acceptable sur la base d'une évaluation de probabilité associée à une faible force des connaissances devrait être moins pris en compte lors de la prise de décision par rapport à une situation où la même évaluation est associée à une connaissance forte [Aven T, 2013] ;

- ✓ Les approches communes d'évaluation des risques n'accordent pas convenablement d'attention au fait que les hypothèses, les explications et les croyances dominantes peuvent masquer des aspects importants des incertitudes et des risques.

3.7 Description de la méthode d'évaluation et d'analyse de risque

La méthode d'évaluation et d'analyse de risque proposée a pour objectif d'améliorer la compréhension du risque dans le domaine étudié. Elle repose sur l'aspect connaissance pratique (maîtrise du domaine) des acteurs impliqués dans la gestion du risque et la prise de décision dans les projets de constructions de bâtiments. L'interprétation des risques et de facteurs de risques affectant la performance des bâtiments est basée sur :

- la force des connaissances des acteurs et des experts de construction qui soutiennent l'évaluation et la description des risques en appui des jugements de probabilité attribuée ;
- les perspectives d'événements de risque évalués à faibles probabilités et à conséquences élevées ;
- l'identification des éventuelles surprises.

Pour assurer la performance des bâtiments, les acteurs intervenant dans les différentes phases de construction doivent travailler en synergie afin de garantir l'harmonie entre le bâtiment et son environnement. Les processus de construction des bâtiments requièrent une meilleure connaissance ou maîtrise du domaine de la part de chaque acteur. L'évaluation et la gestion de risques nécessitent la compréhension et le consensus entre les différents intervenants sur les phénomènes et les conséquences de risque. Le but est d'identifier les non-qualités ou les facteurs de performance afin de proposer des solutions correctives pour l'amélioration de la qualité de vie et la quiétude des usagers. L'étude permet d'améliorer la compréhension des acteurs de construction sur des notions d'analyse de risques à travers :

- l'identification et la mise à jour de la connaissance des différents acteurs ;
- le renforcement des savoirs de jugement de probabilités affectées ;
- les connaissances récentes sur les événements de risques à faibles probabilités et de fortes conséquences ;
- l'anticipation et l'évaluation des éventuelles surprises.

Pour ce faire, le processus d'évaluation des risques affectant la performance dans les bâtiments tests nécessite deux groupes d'analystes de risques groupe 1 et groupe 2 (voir figure 3.2). Dans cette étude, le groupe 1 est le groupe dont les membres ont participé à la réalisation du projet de construction du bâtiment. Le groupe 2 ignore les différentes étapes de planification de projet de

construction. Il a une réflexion impartiale de l'étude du projet sous un nouvel angle avec un esprit critique afin de mieux identifier les différents aspects de risque que le groupe 1 avait mal appréhendé ou estimé [Camara et al., 2018].

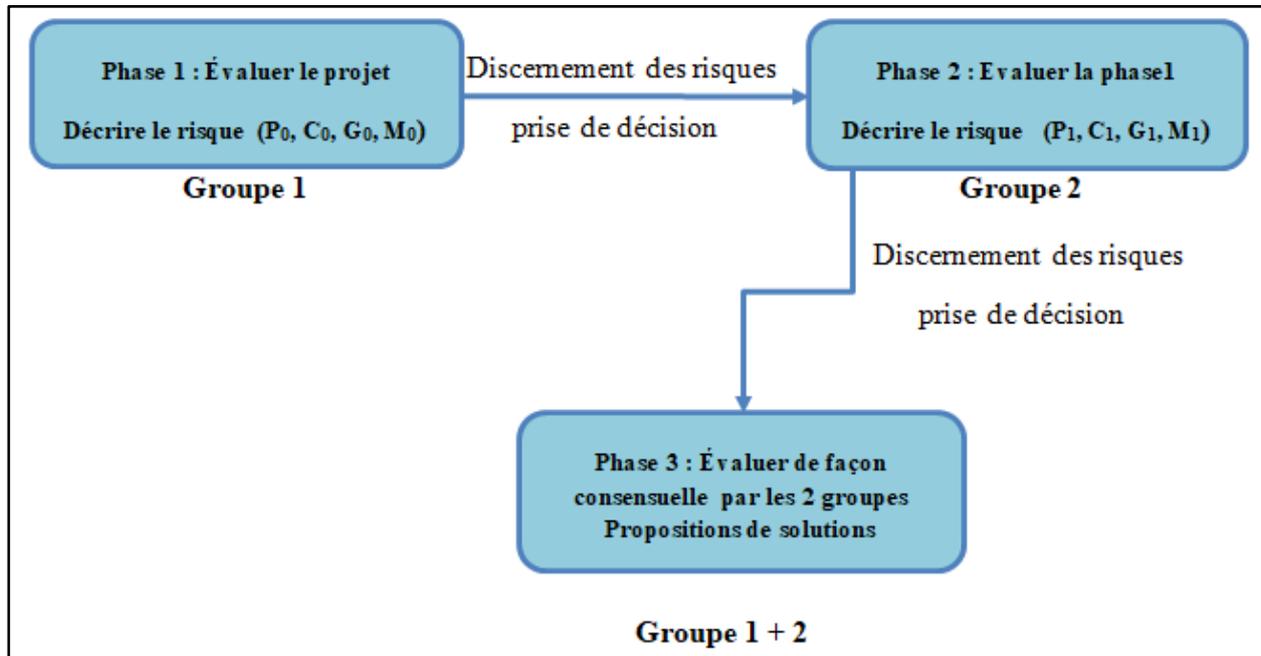


Figure 3.2: Les 3 phases de l'approche d'évaluation des risques

Le processus d'évaluation des risques affectant la performance dans le bâtiment expérimental est réalisé en trois phases.

Phase1 : le groupe 1 procède à une évaluation des risques standards, des analyses de risques basées sur la description des risques en fonction de (P_0, C_0, G_0, M_0) [Aven T, 2013]. Les termes P_0 et C_0 sont respectivement la probabilité des événements et le niveau de criticité spécifique identifié dans l'analyse. G_0 est la description de la gravité de la mesure de l'incertitude de P_0 et C_0 et M_0 est le niveau de la force de connaissance (la maîtrise du domaine) des acteurs de construction. Le niveau de la force de connaissance est fonction de la pertinence des hypothèses, des opinions sur le choix des techniques et matériels de construction, des données et informations, des modèles de probabilité et les jugements donnés par les experts. Le groupe 1 effectue l'évaluation du projet sous forme d'auto-évaluation tout en justifiant la force de la connaissance M_0 des acteurs de construction.

Phase2 : le groupe 2 joue un rôle de juge. Il évalue le résultat de la description des risques (P_0, C_0, G_0, M_0) faite par le groupe 1 à partir des modèles argumentés des risques ajustés (P_1, C_1, G_1, M_1) . Son jugement s'appuie sur l'estimation de la force de connaissance ou la maîtrise du domaine du groupe 1 à travers les réponses aux questionnements suivants :

- les hypothèses retenues représentent-elles de fortes simplifications ?
- les informations et les données sont-elles (fiables et pertinentes ?)
- les avis des experts constituent-ils un consensus ?
- le choix des techniques et matériels de construction est-il pertinent ?

- les phénomènes impliqués sont-ils compris ?
- les modèles sont-ils existants ?
- les prédictions sont-elles cohérentes ? [Flage et Aven, 2009].

Dans le domaine de construction des bâtiments, les réponses à ces questions s’obtiennent à travers une meilleure connaissance du terrain, la pertinence de techniques appliquées, le choix adéquat des matériaux de la part des acteurs de construction.

Phase3: En commun accord, les deux équipes fournissent leur apport en faisant une description détaillée des risques. Cela permet d’obtenir une base de données sur le discernement du risque et donner un appui fort pour la prise de décision. Les savoirs et les connaissances acquises par les différents acteurs de construction peuvent motiver des commentaires sur les jugements d’incertitude de la gravité G et peuvent constituer des aspects importants des connaissances de base sur la maîtrise du domaine.

3.7.1 Gestion des risques

La gestion des risques est un processus qui utilise différents outils et démarches pour optimiser la prise de décision. Les liaisons entre les différentes étapes du processus sont représentées comme suit :

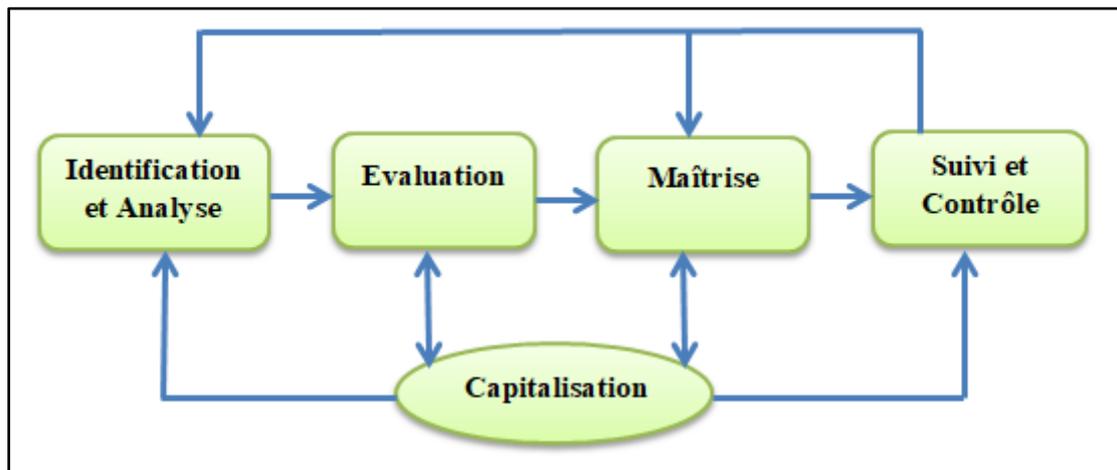


Figure 3.3: Le processus de gestion des risques

L’identification et d’analyse du risque correspondent à la première phase. Cette phase consiste à caractériser la situation étudiée en collectant et en formalisant l’ensemble des données nécessaires à sa compréhension. Ces données seront ensuite utilisées pour analyser chaque situation de risque. Après cette phase suit celle d’évaluation du risque qui vise à définir un niveau de risque soit en classant la situation par rapport à d’autres risques connus (hiérarchisation) [Villeneuve E, 2012].

La phase de maîtrise des risques, qui suit la phase d’évaluation, nécessite de prendre des décisions parmi plusieurs actions envisageables pour les acteurs de construction. Ceux-ci peuvent accepter de prendre le risque, c’est-à-dire qu’ils n’engagent aucune action pour contrer les causes ou les conséquences de l’événement redouté. Dans le domaine de construction des bâtiments, ils peuvent également refuser ce risque. Dans ce cas ils tenteront alors de le réduire en

prenant des actions correctives. Ces mesures correctives visent à éviter que l'événement redouté ne se produise en agissant sur les causes par des méthodes de prévention. Il s'agit de réduire la probabilité d'occurrence de l'événement ou de réduire la gravité (ou l'impact) de l'événement (agir sur les conséquences par des actions de protection).

3.7.2 Hiérarchisation

La méthode de hiérarchisation vise à établir un positionnement relatif de la situation étudiée par rapport à un ensemble de situations-témoins généralement représentées sous la forme d'une matrice de criticité.

Le recueil des données nous permet de renseigner une matrice de criticité. La matrice de criticité est un outil d'exploration de données afin de déterminer et de hiérarchiser les non-qualités ou les facteurs de risques affectant la performance. L'architecture de la matrice de criticité s'inspire du principe d'extraction des connaissances à partir des données. Les résultats issus des processus d'évaluation de risques avec les différents acteurs de construction permettent de hiérarchiser les facteurs de risques affectant la performance pour une meilleure qualité de vie et du confort des habitants au sein des bâtiments. Le niveau de criticité C est défini comme le produit des niveaux pondérés de la probabilité d'occurrence P du facteur de risque, la gravité de ses conséquences G et le niveau de la force de connaissance du domaine M. L'évaluation et l'analyse des risques des différents scénarios se font à l'aide de la formule classique ci-dessous :

$$C = P * G * M \quad (23)$$

Avec

C : le niveau criticité de risque ;

P : le niveau pondéré de la probabilité d'occurrence du facteur de risque ;

G : le niveau pondéré de la gravité de conséquences du facteur de risque ;

M : le niveau pondéré de la force de connaissance de l'évaluateur sur le domaine d'étude.

Dans la matrice, les termes de criticité de risque sont pondérés suivant le critère sur :

- P est pondéré en fonction du degré de pertinence des techniques et les matériaux de construction utilisés ;
- G est pondéré en fonction de la qualité de fonctionnement et à la capacité de redondance ;
- M est pondéré en fonction de la compétence des concepteurs, la pertinence des choix de techniques et matériels utilisés [Camara et al., 2018].

Les trois critères sont qualifiés et quantifiés selon la matrice de pondération suivante :

Tableau 3-1: Matrice de pondération

Probabilité		Gravité		Force de connaissance	
Nature	Niveau	Nature	Niveau	Nature	Niveau
Forte	4	Catastrophique	4		
Moyenne	3	Importante	3	Forte	0,6
Faible	2	Tolérable	2	Moyenne	0,8
Très faible	1	Mineure	1	Faible	1

Dans la matrice de criticité, le choix sur la pondération du niveau de la force de connaissance est basé sur le concept de la théorie de l'argumentation [Doubouya et al., 2015] pour soutenir la prise de la décision. Les critères de décision optimistes et pessimistes définis dans une prise de décision qualitative sous incertitude, peuvent s'articuler en termes de processus d'argumentation [Amgoud L et Prade H, 2009]. De ce fait, l'utilisation des arguments pour prendre et expliquer des décisions permet de considérer des principes décisionnels dans lesquelles deux scénarios d'opinions (scénario optimiste et scénario pessimiste) sont possibles. Selon ces deux options, il est possible d'attribuer la pondération la plus forte (cas du tableau 3-1) pour la faible force de connaissance du domaine (scénario pessimiste de conséquence du risque) ou la pondération la plus faible pour la forte connaissance du domaine (scénario optimiste de conséquence du risque). Pour l'évaluation du risque, la matrice de criticité est élaborée selon l'une des options relatives aux scénarios pessimistes ou optimistes.

Le niveau de criticité C vise à évaluer et prévenir les risques.

Quatre niveaux de criticité pour le jugement des risques sont définis (Faible / Moyen / Fort / Très fort) respectivement associés à un code couleur (vert, orange, rouge, noire) [Camara et al., 2017].

Tableau 3-2: Matrice de criticité

Code des couleurs	Nature	Niveau de criticité (C)
	Faible	$C < 4$
	Moyenne	$6 \leq C \leq 9$
	Forte	$9 < C < 12$
	Très forte	$C \geq 12$

L'analyse de risques a pour objectif d'identifier les non-qualités et désordres afin de faciliter la réduction des niveaux de criticité à travers des pratiques adéquates et solutions préventives.

3.8 Conclusion

Ce troisième chapitre concerne la description de la méthodologie adoptée. Dans ce contexte, nous avons développé les approches destinées aux notions de risques, de retour d'expérience (REX), la hiérarchisation et la capitalisation des informations. Aussi quelques aperçus des éléments conceptuels relatifs aux risques (événement, état, mesure, et incertitude) et la classification de REX ont été détaillés. Dans cette logique, nous avons défini les concepts de REX (correctif, préventif et positif). L'accent est aussi mis sur l'absence de descriptions et de caractérisations des connaissances pratiques (maîtrise du domaine) dans les évaluations des risques. La méthodologie adoptée a été développée tout en montrant la nécessité de l'application ou la prise en compte des idées et réflexions sur la force caractérisant la solidité des connaissances pratiques (maîtrise du domaine) des acteurs et experts de la construction dans le processus d'évaluation des facteurs de risque susceptibles d'influencer les niveaux de performance, et de prise de décision dans la construction des bâtiments ainsi que l'organisation des connaissances.

Chapitre 4 : Évaluation des risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports

4. Évaluation des risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports

4.1 Introduction

Dans le vécu quotidien au sein des villes ainsi que dans les zones rurales, le bruit généré par l'usage des infrastructures de transports (routières, ferroviaires, aéroportuaires et industrielles) peut quotidiennement atteindre la qualité de vie et de l'environnement des populations des zones voisines. Le développement économique de ce XXI^e siècle est marqué par la demande spectaculaire du transport aérien, notamment le transport des personnes et des biens. Aujourd'hui, cette demande croissante du trafic aérien est l'un des principaux défis auxquels l'industrie aéronautique se trouve confrontée dû à une congestion dans de nombreux aéroports, principalement des hubs [Flores-Fillo, 2010]. La réduction de l'impact environnemental due à la demande importante de trafic entraîne de sérieux problèmes pour équilibrer les exigences d'expansion des aéroports [Arntzen, et Simons, 2014]. L'impact des nuisances sonores dues à l'usage de ces plateformes aéroportuaires peut-être très néfaste sur la santé et la qualité de vie des habitants des zones aéroportuaires. Actuellement, le bruit des avions est un problème particulier lors de l'atterrissage et du décollage [Ignaccolo, 2000]. Un bruit décrit comme indésirable est connu pour avoir plusieurs effets indésirables sur les humains tels que la perte d'audition, et l'interférence dans la communication. Les résultats d'une étude menée en France révèlent que le bruit des avions est l'une des toutes premières causes de la dégradation de la qualité de vie et source d'insatisfaction environnementale [Faburel et al., 2006]. L'influence du bruit des avions sur le sommeil, la dépression, la morbidité psychologique, l'hypertension et les maladies coronariennes a été démontrée [Janssen et al. 2014]. Les études sur l'estimation des perturbations du sommeil relèvent une relation entre le pourcentage de personnes éveillées et les niveaux de bruit [Wijnen et Visser, 2003]. L'OMS indique qu'environ 120 millions de personnes souffrent de problèmes auditifs dans le monde. Parmi les effets sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental étudiés, quatre ont été pris en compte par le groupe de travail pour la construction de la méthode d'évaluation des risques. Ce sont ceux pour lesquels des courbes dose-réponse sont disponibles dans certaines situations d'exposition et qui ont été rapportés dans le document de l'OMS Burden of diseases [OMS, 2011]. Il s'agit des effets immédiats (perturbation du sommeil et inconfort), effets à moyen et à long terme (troubles de l'apprentissage scolaire et infarctus du myocarde). La gestion de l'environnement sonore urbain a fait l'objet de nombreux travaux de recherche malgré la complexité du sujet, liée au caractère subjectif et contextuel du ressenti de la nuisance sonore. La plupart des études tablent sur une poursuite de tendance de la croissance économique des pays émergents, avec la multiplication du trafic aérien mondial. Les prévisions du marché mondial d'Airbus pour la période 2015-2034 relèvent qu'actuellement, 47 mégapoles d'aviation sont concentrées sur plus de 90% des vols long-courriers et près d'un million de passagers par jour, et que 39 des 47 mégapoles connaissent

des niveaux divers de congestion [Airbus, 2014 ; Rodríguez-Díaz et al., 2017]. En plus de l'expansion des aéroports et des plateformes aéroportuaires, on constate une forte demande de logements due à l'accroissement de la démographie dans les pays en voie de développement. Cette forte demande d'urbanisation dans beaucoup de grandes villes se manifeste par le rapprochement rapide des habitations et des aéroports [Ganic et al., 2015]. Ce qui entraîne une augmentation du nombre de personnes affectées par les nuisances sonores des trafics aériens. Depuis quelques années de nombreuses études sur les effets, des opérations aériennes au niveau des habitants vivant à proximité des aéroports ont été menées. Parmi ces effets, on peut parler de la dévalorisation des propriétés, des problèmes de l'aménagement du territoire autour de l'aéroport [McMillen, 2004 ; Morrell et Lu, 2000]. La réduction et le contrôle du bruit deviennent des enjeux primordiaux tant sur le plan quantitatif que qualitatif dans les bâtiments aéroportuaires. De ce fait, il est aujourd'hui nécessaire de garantir la qualité de vie, la quiétude et la sécurité des habitants des zones voisines des aéroports. La qualité de vie des usagers des bâtiments à proximité des aéroports et la protection de l'environnement vis-à-vis des nuisances sonores peuvent se faire à travers des mesures appropriées telles que le respect des zones de protection contre le bruit (comme dans certains pays développés), l'utilisation des techniques de construction appropriée pour les bâtiments des zones aéroportuaires telles que l'isolation acoustique des bâtiments ou les procédures d'utilisation des terres [Ganic et al., 2015]. Il est donc nécessaire de procéder à des évaluations de :

- l'impact des nuisances sonores sur les habitants des zones environnantes des aéroports ;
- l'existence de risques et facteurs de risques affectant la performance acoustique des bâtiments aéroportuaires.

Dans ce chapitre, nous procédons à l'évaluation de risques et facteurs de risques qui affectent la performance acoustique des bâtiments à proximité de l'aéroport. L'état de l'art porte sur l'évaluation des facteurs de risques qui affectent la performance acoustique d'un bâtiment à proximité de l'aéroport de Bamako. Pour ce faire, une campagne de mesures acoustiques (intensité des bruits perçus) dans le bâtiment test, des enquêtes de terrain auprès des habitants de la zone d'étude et des entretiens avec les acteurs et professionnels du secteur du Bâtiment et Travaux Publics (BTP) sont réalisés. Les données recueillies au cours de ces différentes étapes nous permettent :

- d'une part, d'estimer le niveau de confort au sein du bâtiment expérimental par comparaison avec les normes recommandées, d'identifier le besoin (des usagers et maîtres d'œuvre), d'identifier les difficultés et les maîtrises du domaine des maîtres d'œuvre ;
- d'autre part, de proposer des bonnes pratiques pour des travaux de rénovations des bâtiments existants, d'intégrer les expériences utiles des uns et des autres pour une meilleure prise de décision pour les futurs projets de construction.

4.2 Description de l'aéroport et zone aéroportuaire de Bamako

Appelé Aéroport International de Bamako-Sénou jusqu'en décembre 2015, puis renommé en hommage à l'ancien président Modibo Keita (*Aéroport International Président Modibo Keita*) est le principal aéroport du Mali. Il est situé à environ 15 km au sud du centre-ville de Bamako, à

l'intérieur des limites du District de Bamako. Il a été ouvert au trafic en 1974. Il est géré par Aéroports du Mali (ADM). Son code AITA est *BKO* et celui de l'OACI est *GABS*.

Cependant plusieurs investisseurs étrangers bénéficient des profits de l'Aéroport international Président Modibo Keita. En 2005, le projet de réhabilitation, d'aménagement et d'agrandissement a reçu des financements du Millennium Challenge Corporation. L'aéroport possédait une unique piste de 2700 mètres qui permet son utilisation aux gros porteurs du type Boeing 747, mais les oblige à des contraintes de charges maximales pour la sécurité au décollage. Une augmentation de la piste de 500 mètres supplémentaires a été réalisée pour une meilleure exploitation des aéronefs au décollage. Il s'agit aussi de rendre l'Aéroport International Président Modibo Keita de Bamako Sénou plus attractif pour les gros porteurs afin de mieux faire face à l'accroissement de la demande en termes de transport de fret et passagers. La piste mesure 3200 m de long sur 45 m de large [Bamako/Sénou (GABS), 2017].

Tout récemment en 2015, l'Aéroport International Président Modibo Keita de Bamako Sénou a subi des travaux d'extension de sa capacité. Ces interventions ont concerné :

- la réhabilitation des aires de mouvements, pour être au niveau des standards internationaux d'exploitations (économiques, sûreté, sécurité) ;
- la construction d'un nouveau taxiway, d'une boucle de retournement et de nouvelles places de parking afin d'améliorer les opérations d'assistance aux avions ;
- le réaménagement des terminaux existants et la construction d'un nouveau terminal fret pour assurer le développement des services commerciaux liés à l'activité aéroportuaire, l'appui, la logistique aux flux d'échanges de marchandises du Mali avec l'extérieur.

Ces investissements ont renforcé la contribution de l'Aéroport International Président Modibo Keita de Bamako Sénou pour le désenclavement aussi bien interne qu'externe du pays. Ces travaux sont complétés par l'aménagement d'une zone industrielle de 200 hectares avec toutes les commodités et les avantages pour constituer un pôle de développement des affaires. Le trafic passager annuel a fortement augmenté ces dernières années avec une prévision de 4% par an [MCA-Mali, 2005].

Tableau 4-1 : Trafic passager annuel de 1999 à 2015 de l'Aéroport International Président Modibo KEÏTA de Bamako

Année	1999	2003	2004	2005	2006	2007	2011	2012	2015
Nombre de passagers	403 380	423 506	486 526	516 000	533 437	598 713	582 143	533 054	900 000

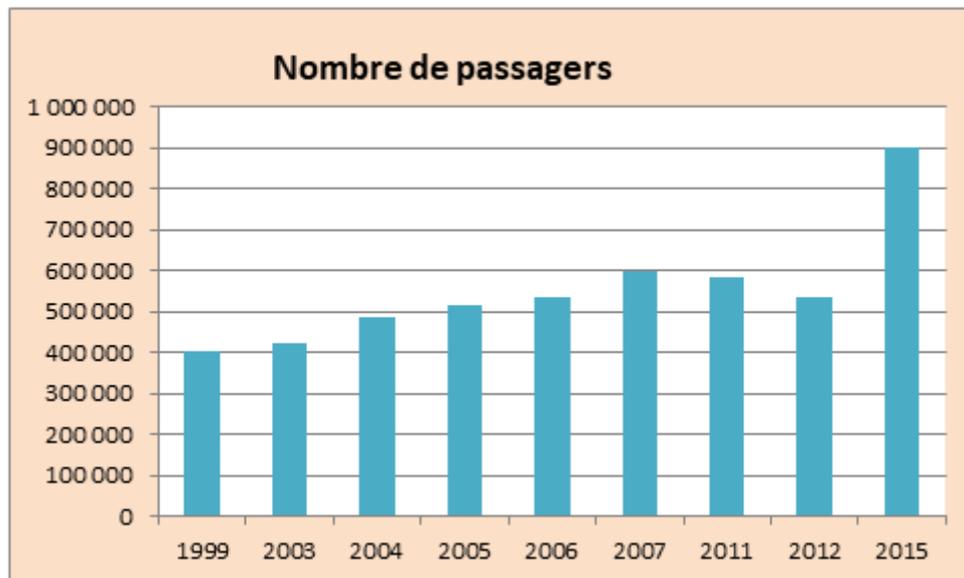


Figure 4.1 : Histogramme du trafic passager annuel de 1999 à 2015 de l'Aéroport International Président Modibo KEÏTA de Bamako



Figure 4.2: Vue de loin de l'Aéroport International Président Modibo Keïta de Bamako Sénou

L'Aéroport International Président Modibo Keïta de Bamako est situé en commune VI du district de Bamako. La commune VI est l'une des six communes urbaines de Bamako, la plus grande en termes de superficie (70 Km²) et de population estimée à 545 000 personnes (recensement de 2011). L'aéroport international Président Modibo Keïta de Bamako offre un accès direct aux destinations de voyages sur l'Afrique de l'Ouest et l'international. Il joue un rôle clé dans le développement de secteur du tourisme et du commerce du pays. Le bâtiment expérimental est situé au quartier Sirakoro-Senou. Dans cette dernière décennie, nous constatons la multiplication des habitations et des chantiers de construction dans un rayon de moins 10 km autour de l'aéroport. La zone qui l'entoure immédiatement est appelée zone ASECNA. Elle est très vaste et principalement sous-développée. Durant ces dernières années, cette zone est très convoitée par les agences immobilières et une partie de la population. La partie au sud de l'aéroport est la plus

touchée par l'extension avec des cités habitées, des chantiers en construction (les quartiers Sénou, Faladié et Sirakoro-Senou) et la zone industrielle (voir figure 4.3).



Figure 4.3: Vues des habitations de la zone aéroportuaire de Bamako

4.3 Étude de cas : Évaluation de risques acoustiques pour les bâtiments à proximité des aéroports de Bamako

4.3.1 Présentation de l'étude de cas

Les mesures ont été menées sur un bâtiment résidentiel situé environ à 4 km de l'aéroport de Bamako et à 700m de la RN7 dans le quartier de Sirakoro-Senou en commune VI de Bamako. Il s'agit d'un logement de la classe moyenne au Mali comportant deux blocs. Chacun d'eux contient une chambre, un salon, une terrasse et une toilette interne (figure 4.4). Le bâtiment test d'une superficie bâtie de 139,30 m² a une forme compacte. Comme la plupart des bâtiments dans la zone, le bâtiment test est construit avec des briques de ciment (parpaing) de 15 cm et les façades sont recouvertes à l'extérieur ainsi qu'à l'intérieur d'un enduit de ciment d'une épaisseur de 0,5 cm. La face interne des parois est recouverte d'une couche de peinture blanche à base de chaux tandis que la face externe est recouverte d'une couche minérale de couleur rose. Les cloisons ont la même composition que les murs extérieurs. Le plancher est composé d'une couche de latérite surmontée d'une couche d'enduit de ciment et le toit est en dalle de béton en ciment. Le bâtiment expérimental se trouve sur une parcelle d'une surface 300 m² soit (15m × 20m). La cour est clôturée avec un mur de 1,50m de hauteur et est située au sud-ouest par rapport à la direction de la piste d'atterrissage et de décollage. Le choix du bâtiment est motivé par les résultats des enquêtes effectuées dans le quartier environnant dans le but d'estimer la performance acoustique du bâtiment et d'identifier les facteurs de risques affectant la performance. Le toit est constitué d'une dalle de béton sans comble. Les fenêtres des chambres sont de dimensions (1,20m x 1,20m) sans vitrage pour les zones de vie (0,60m x 0,60m) pour la salle de bain et de (1,50m x 1,20m) pour le salon. Les portes extérieures sur la terrasse en persienne métallique et celles à l'intérieur sont des contreplaqués en bois (portes-isoplanes).

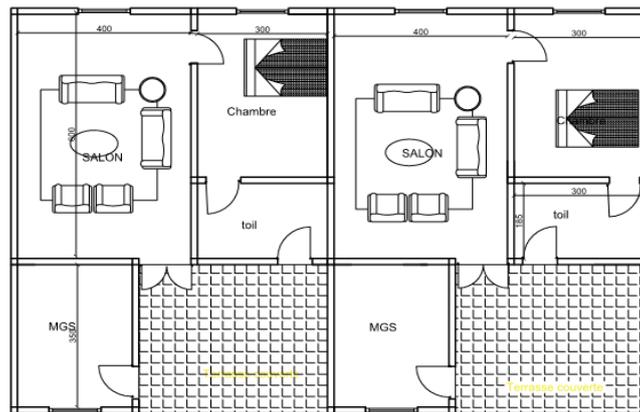


Figure 4.4: Le plan du bâtiment expérimental

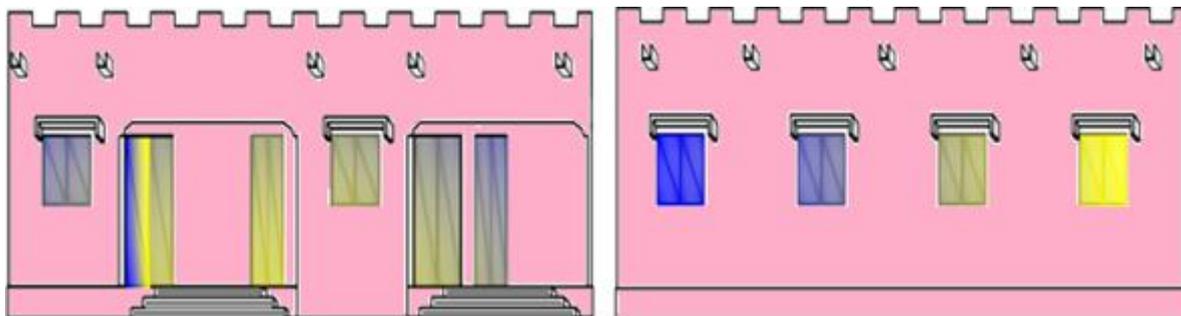


Figure 4.5: Vues des façades du bâtiment expérimental

4.3.2 Cadre des enquêtes in situ

Pour mener cette étude, nous avons élaboré des fiches du questionnaire comme instruments d'investigation auprès des usagers et acteurs de la construction. L'accent est mis sur des visites de terrain afin de procéder aux enquêtes auprès des usagers des bâtiments et réaliser des interviews auprès des acteurs de la construction. Ces investigations permettent d'identifier d'une part les besoins et les comportements des habitants et d'autre part les techniques et pratiques des acteurs de la construction.

4.3.2.1 Enquêtes auprès des habitants

4.3.2.1.1 Déroulement de l'enquête

Dans le but d'estimer la performance acoustique des bâtiments de la zone aéroportuaire de Bamako et le niveau de confort acoustique des occupants, nous avons effectué du 25 janvier au 02 février 2017, une enquête (évaluation perspective sous forme de questionnaire) auprès de la population de la zone. Le questionnaire a été élaboré et distribué auprès de 60 logements de différents types (logement collectif, individuel...).

Les questions ont porté sur :

- les types de logements ;
- la date de construction du logement par rapport à celle de l'aéroport de Bamako ;
- le jugement de l'utilisateur par rapport au confort de son logement ;
- les types de travaux de rénovation effectués pour la performance acoustique du bâtiment ;
- la qualification de l'environnement sonore vis-à-vis du trafic aérien de la zone en fonction des moments (matin, après-midi, soir) et à l'endroit dans la maison (intérieur et l'extérieur) ;
- les méfaits du bruit sur la qualité du cadre de vie des usagers.

Par rapport à la technique de l'enquête, nous avons fait du porte-à-porte pour distribuer les fiches du questionnaire aux propriétaires des logements qui ont répondu positivement à l'enquête. Le questionnaire est rempli sur place par certains usagers et d'autres nous ont demandé de passer plus tard, car ils ont voulu répondre aux questions ultérieurement. Au terme de l'enquête, nous avons pu récupérer 54 fiches sur 60 soit 90% des fiches du questionnaire.

4.3.2.1.2 Résultats et discussions

Les résultats issus de l'enquête sont consignés ci-dessous (confère l'Annexe 1)

À la question « *Quel est le type de votre logement ?* » :

- trois (3) des habitants soumis à l'enquête sont dans des logements individuels (colocation) ;
- quarante-sept (47) des habitants soumis à l'enquête ont des logements collectifs (vie en famille) ;
- quatre (4) des habitants soumis à l'enquête ont indiqué autres types logements (2 restaurants, 1 jardin d'enfants, 1 clinique).

À la question « *La construction de votre logement a-t-elle précédé celle de l'aéroport ?* » :

- Huit sur cinquante-quatre (8/54) soit 15% des habitants soumis à l'enquête ont répondu **oui** à la question ;
- Quarante-six sur cinquante-quatre (46/54) soit 85% des habitants soumis à l'enquête à disent **non** (c'est-à-dire ils sont venus après la construction de l'aéroport) ;
- 100% des usagers des logements qui ont précédé l'aéroport qualifient la performance acoustique de leur logement faible (15% de ces usagers ont tenté des travaux de rénovation, 65% d'entre eux ne savaient pas qu'il est possible d'améliorer la performance acoustique du bâtiment et tandis que 20% des usagers savent, mais disent qu'ils n'ont pas les moyens de réaliser ces travaux) ;
- 100% des usagers qui sont venus après la construction de l'aéroport affirment n'avoir pas pris en compte la performance acoustique dans la construction (86% d'entre eux ignoraient les gênes des avions, 14% n'ont pas répondu à cette question).

À la question « *Selon vous, quel est le niveau de la fréquence du trafic des avions autour de votre maison ?* » :

- Treize habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (13/54) soit 24,07% affirment que le niveau de la fréquence est élevé ;

- Vingt-cinq habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (25/54) soit 46,30% disent que le niveau de la fréquence est moyen ;
- Seize habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (16/54) soit 29,63% indiquent que le niveau de la fréquence est faible.

À la question « *Que diriez-vous de votre environnement sonore dû à la présence des avions ?* » :

- ❖ À l'intérieur du bâtiment :
 - Matin : calme (pour 25/54 des habitants soumis à l'enquête soit 46,30%), bruyant (pour 24/54 des habitants soumis à l'enquête soit 44,44%), très bruyant (pour 05/54 des habitants soumis à l'enquête soit 9,25%) ;
 - Après-midi : calme (pour 23/54 des habitants soumis à l'enquête soit 42,60%), bruyant (pour 26/54 des habitants soumis à l'enquête soit 48,14%), très bruyant (pour 05/54 des habitants soumis à l'enquête soit 09,26%) ;
 - Nuit : calme (pour 12/54 des habitants soumis à l'enquête soit 22,22%), bruyant (pour 31/54 des habitants soumis à l'enquête soit 57,41%), très bruyant (pour 11/54 des habitants soumis à l'enquête soit 20,37%).
- ❖ À l'extérieur du bâtiment :
 - Matin : calme (pour 47/54 des habitants soumis à l'enquête soit 87,03%), bruyant (pour 06/54 des habitants soumis à l'enquête soit 11,11% et très bruyant (pour 01/54 des habitants soumis à l'enquête soit 01,85%) ;
 - Après-midi : calme (pour 34/54 des habitants soumis à l'enquête soit 62,96%), bruyant (pour 12/54 des habitants soumis à l'enquête soit 22,22%), très bruyant (pour 08/54 des habitants soumis à l'enquête soit 14,81%) ;
 - Nuit : calme (pour 31/54 des habitants soumis à l'enquête soit 57,40%), bruyant (pour 17/54 des habitants soumis à l'enquête soit 31,48%), très bruyant (pour 06/54 des habitants soumis à l'enquête soit 11,11%).

À la question « *Que diriez-vous de votre sensibilité au bruit des avions ?* » :

- Neuf habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (09/54) attestent qu'ils sont très sensibles au bruit des avions ;
- Quarante-deux habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (42/54) disent être sensibles au bruit des avions ;
- Trois habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (03/54) affirment être moins sensibles au bruit des avions.

À la question « *Selon vous vivre à proximité de l'aéroport est-il synonyme de danger ?* » :

- Sept habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (07/54) pensent qu'habiter à proximité de l'aéroport est extrêmement dangereux ;
- Trente-quatre habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (34/54) jugent qu'habiter à proximité de l'aéroport est dangereux ;
- Onze habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (11/54) déclarent qu'habiter à proximité de l'aéroport est moins dangereux ;
- Deux habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (02/54) disent qu'habiter à proximité de l'aéroport n'est pas du tout dangereux.

À la question « *Les ouvertures (portes et fenêtres) de votre logement sont-elles équipées en vitrage ?* » :

- Huit habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (8/54) soit 14,81% ont un logement avec des ouvertures équipées en vitrage (six habitants sur huit (6/8) soit 75% ont de vitrage simple sur les ouvertures de leur logement tandis que deux habitants sur huit (2/8) soit 25% ont de doubles vitrages sur les ouvertures de leur logement) ;
- Quarante-six habitants soumis à l'enquête sur cinquante-quatre (46/54) soit 85,19% affirment le contraire.

À la question « *Quels sont les méfaits des bruits sur la qualité de cadre de vie ?* » :

- Vingt sur cinquante-quatre (20/54) soit 37,03% habitants soumis à l'enquête disent que la perturbation de sommeil stresse ;
- Onze sur cinquante-quatre (11/54) soit 20,37% habitants soumis à l'enquête pensent que c'est le stress ;
- Treize sur cinquante-quatre (13/54) soit 24,07% habitants soumis à l'enquête déclarent avoir des problèmes d'audition ;
- Six sur cinquante-quatre (6/54) soit 11,11% habitants soumis à l'enquête affirment avoir des maux de tête ;
- Sept sur cinquante-quatre (7/54) soit 12,96% habitants soumis à l'enquête parlent des problèmes d'audition.

À la question « *En dehors des confort acoustiques, plaignez-vous d'autres impacts des bruits des avions ?* » :

- Dix-neuf sur cinquante-quatre (19/54) soit 35,18% habitants soumis à l'enquête disent que des avions provoquent la vibration des maisons ;
- Vingt-quatre sur cinquante-quatre (24/54) soit 44,44% habitants soumis à l'enquête pensent que certains avions descendent à basse altitude lors des survols de la zone d'habitation ;
- Sept sur cinquante-quatre (07/54) soit 12,96% habitants soumis à l'enquête affirment le trafic aérien engendre des fissures sur les façades.

L'analyse des résultats montre que :

- la majeure partie des logements de la zone aéroportuaire de Bamako (87% de logements concernés par l'enquête) sont des logements collectifs où les personnes habitent en famille ;
- La zone aéroportuaire de Bamako est une zone urbaine exposée au bruit des avions avec de fortes nuisances sonores observées pendant la nuit ;

Le bruit des avions participe activement à la dégradation de la santé des habitants causant le stress, la perturbation du sommeil, la perturbation de la concentration des enfants pendant les heures de cours, les maux de tête, problèmes d'audition et la dépression.

4.3.2.2 Enquêtes auprès des acteurs de la construction

4.3.2.2.1 Déroulement de l'enquête

L'enquête auprès des acteurs et professionnels du bâtiment a été effectuée en deux phases. La première phase s'est déroulée du 07 mars au 17 mars 2017, cette phase consiste à visiter les

chantiers afin d'identifier les non-qualités et les pathologies. La deuxième phase effectuée du 04 avril au 29 avril 2017 consiste à interviewer les acteurs du chantier sur les constats ou remarques faites lors de la première phase. L'outil d'interview est un questionnaire élaboré pour la circonstance. L'enquête a pour but d'identifier les techniques, les matériaux, les besoins et les difficultés des acteurs de la construction pour l'atteinte de performance acoustique des bâtiments de la zone aéroportuaire de Bamako. Les questions ont porté sur l'identification :

- des responsables du projet de construction ;
- des réglementations sur les constructions à proximité de l'aéroport de Bamako ;
- de la nature des exigences de ces réglementations ;
- des matériaux et les techniques de construction ;
- des spécialistes constituant les équipes de construction (confère l'Annexe 2).

Pour la méthode d'enquête, nous avons choisi les chantiers en construction dans la zone aéroportuaire de Bamako. Ces chantiers ont été visités pour des observations de non-qualités acoustiques et des pathologies qui peuvent affecter la performance des bâtiments. Parmi les chantiers visités, seize (16) chefs de chantiers ont répondu à nos questions, à condition de garder leur anonymat. Les bâtiments retenus appartiennent aux particuliers (des citoyens qui ont acheté des parcelles pour construire des habitations). Les équipes de réalisation sont composées d'ingénieurs de formation et de techniciens (maçons, électriciens, plombiers...). Avant de commencer l'enquête, nous nous sommes entretenus avec les acteurs pour expliquer le principe de l'enquête ; ensuite les fiches du questionnaire ont été distribuées pour être remplies sous forme d'interviews. Au terme de l'enquête, nous avons eu les renseignements des 16 fiches du questionnaire (confère l'Annexe 2).

4.3.2.2.2 Résultats et discussions

Les résultats issus de l'enquête sont consignés ci-dessous (confère l'Annexe 2)

À la question « Avez-vous réalisé des constructions à proximité de l'aéroport de Bamako ? » :

- onze (11) des acteurs soumis à l'enquête ont déjà dirigé des chantiers dans la zone aéroportuaire ;
- cinq (5) des acteurs soumis l'enquête dirigent pour la première fois un chantier dans la zone aéroportuaire.

À la question « Existe-t-il des réglementations acoustiques pour construire à proximité de l'aéroport de Bamako ? »

Tous les seize (16) acteurs soumis à l'enquête affirment qu'il n'existe pas de réglementations acoustiques pour construire à proximité de l'aéroport de Bamako.

À la question « Sinon, quelles autres réglementations existent-ils ? » :

- douze (12) acteurs soumis à l'enquête affirment qu'il existe d'autres règlements exigés, à savoir les permis de construction, les prospectus (fonctionnalité du plan, sondage sur le sol), le cahier de charges ;
- quatre (4) acteurs soumis à l'enquête disent qu'ils existaient jadis des limites d'interdiction pour les constructions appelées « zone ASECNA ».

À la question « Sinon, quelles dispositions prenez-vous pour assurer la performance acoustique des bâtiments de la zone ? » :

- dix (10) acteurs soumis à l'enquête disent se limiter aux objectifs du client (exigences du projet de construction) ;
- quatre (4) acteurs soumis à l'enquête affirment qu'ils n'ont jamais pensé aux problèmes de confort acoustique ;
- deux (2) acteurs soumis à l'enquête sollicitent l'utilisation des matériaux isolants pour construire. Mais ils pensent que le prix de ces matériaux et le déficit d'informations n'encouragent pas les clients ;

À la question « les matériaux de construction pour performance acoustique existent-ils sur le marché local ? »

- huit (8) acteurs soumis à l'enquête disent que certains de ces matériaux se trouvent sur le marché local, à savoir les plaques phoniques, les portes et fenêtres « aluminium » avec vitrage, le plâtre, etc. ;
- cinq (5) acteurs soumis à l'enquête n'ont pas répondu à la question ;
- trois (3) acteurs soumis à l'enquête affirment que les matériaux ne sont pas sur le marché local.

À la question « avez-vous des acousticiens dans votre équipe de construction ? »

Tous les seize (16) acteurs soumis à l'enquête disent qu'il n'y a pas de spécialistes en acoustique dans leur équipe.

L'analyse des résultats montre que :

- les bâtiments construits dans la zone aéroportuaire de Bamako ne sont pas isolés ;
- les équipes de constructions ne travaillent pas avec les acousticiens du bâtiment ;
- la plupart des bâtiments de la zone sont faits avec des briques en ciment et non isolés ;
- il y a un manque de réglementation acoustique sur les constructions de la zone.

4.3.3 Mesures acoustiques in situ

Les mesures in situ du bruit de fond à l'intérieur du bâtiment ont pour but de faire une évaluation objective de la performance acoustique du bâtiment et de l'impact du bruit extérieur sur le confort sonore au sein des pièces du bâtiment. La phase de mesures consiste à placer des capteurs (sonomètres) à des différents endroits du bâtiment afin de mesurer le niveau de pression acoustique. Les mesures ont été effectuées à l'aide de deux sonomètres de marque "Voltcraft" répondant à la norme européenne **EN 61 672-1** relative aux sonomètres. Son calibreur sonore de classe 2 est conforme à la norme **IEC 60942**. Les mesures ont été réalisées sur une période de trois mois et sept jours (du 07 février 2017 au 14 mai 2017).



Figure 4.6 : Image du sonomètre Voltcraft et ses accessoires

Dans le but d'enregistrer le niveau de pression acoustique des avions afin de garder une trace et de rendre compte du niveau sonore au sein du bâtiment, les capteurs ont été étalonnés sur la plage automatique comprise entre 30 et 130 dB(A). Les sonomètres sont installés à l'intérieur et à l'extérieur (figure 4.7 et figure 4.8) du bâtiment afin de mesurer les niveaux de pression acoustique. Les résultats issus de ces mesures permettent d'estimer des niveaux sonores équivalents, d'exposition au bruit des avions et d'avoir une idée sur la performance acoustique des parois du bâtiment. Pour éviter les perturbations des ondes sonores, les sonomètres sont placés à une position distante de 1,50 m de la surface interne et externe du bâtiment et une hauteur de 1,20 m au-dessus de plancher. La pondération A est employée pour les mesures. Ce filtre est activé sur l'afficheur en dB(A). Pour éviter d'enregistrer les bruits domestiques et autres bruits aériens, les mesures sont effectuées dans le bâtiment inoccupé en situation portes et fenêtres extérieures fermées pendant un (01) mois et 21 jours (du 07 février 2017 au 28 mars 2017) puis en situation portes et fenêtres extérieures ouvertes pendant un (01) mois et 16 jours (du 28 mars 2017 au 14 mai 2017).



Figure 4.7: Capteur de mesure acoustique installé à l'intérieur du bâtiment



Figure 4.8: Capteur de mesure acoustique installé à l'extérieur du bâtiment

4.3.3.1 Résultats et interprétations

4.3.3.1.1 Les niveaux de pression acoustique de trafics aériens perçus à l'extérieur et l'intérieur du bâtiment

Les données mesurées sont traitées à l'aide du logiciel de traitement des signaux acoustiques du sonomètre. Ces données traitées sont exportées sur de fichiers Excel ; et celles issues de ces traitements sont représentées graphiquement (figure 4.9 pour le jeudi 23 février 2017, figure 4.10

pour le samedi 04 mars 2017). Ces jours correspondent à des périodes de fort trafic aérien autour de la zone aéroportuaire de Bamako lors de nos séances de mesures.

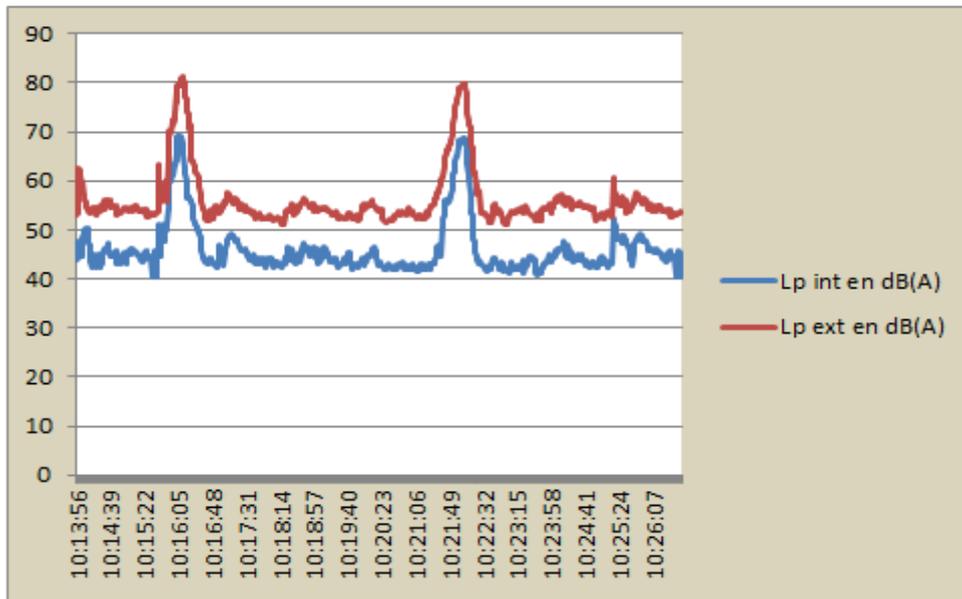


Figure 4.9: Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 23/02/2017

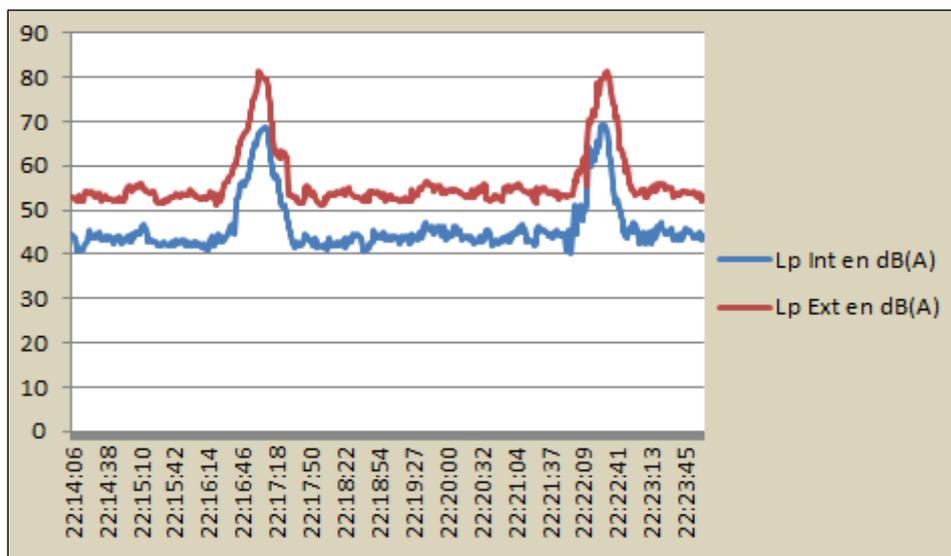


Figure 4.10 : Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 04/03/2017

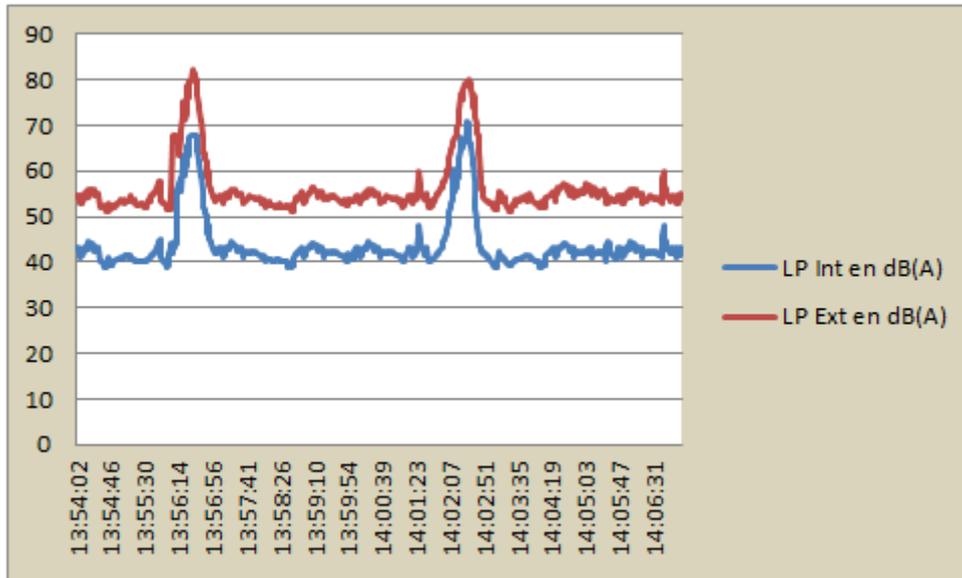


Figure 4.11 : Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 05/04/2017

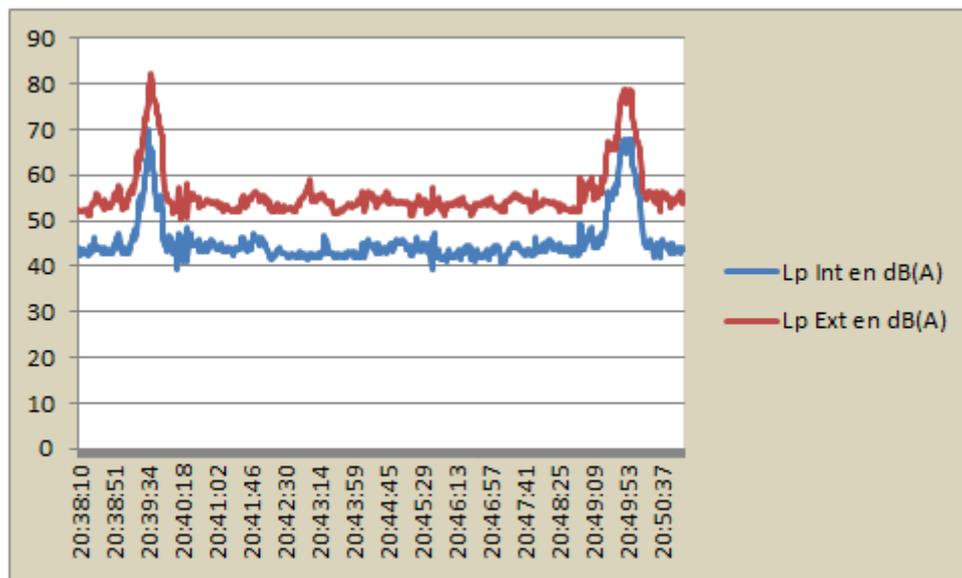


Figure 4.12: Illustrations graphiques des niveaux de pression acoustique mesurés à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment le 07/05/2017

Les graphiques nous renseignent sur les intensités du niveau sonore maximal et minimal, mesurées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Les données relatives à la figure 4.9 ont été recueillies le jeudi 23/02/2017 (avec fenêtres extérieures ouvertes). Le graphique révèle que :

- Le plus grand indice de dose (intensité de niveau de pression acoustique) mesurée varie de 81,2dB(A) à 79,9dB(A) à l'extérieur et de 70,2dB(A) à 68,8dB(A) à l'intérieur du bâtiment ;
- Le plus petit indice de dose est de 51,2dB(A) à l'extérieur et de 40,5dB(A) à l'intérieur du bâtiment.

Les données relatives à la figure 4.10 sont mesurées le samedi 04/03/2017 (avec fenêtres extérieures fermées). Le graphique montre que :

- Le plus grand indice de dose mesuré varie de 82,2dB(A) à 81,4dB(A) à l'extérieur et de 68,7dB(A) à 68,3dB(A) à l'intérieur du bâtiment ;
- Le plus petit indice de dose est de 50,3dB(A) à l'extérieur et de 40,1dB(A) à l'intérieur du bâtiment.

Les données relatives à la figure 4.11 sont enregistrées le mercredi 05/04/2017 (avec fenêtres extérieures ouvertes). Le graphique illustre que :

- Le plus grand indice de dose mesuré varie de 81,9dB(A) à 79,8dB(A) à l'extérieur et de 71,1dB(A) à 69,1dB(A) à l'intérieur du bâtiment ;
- Le plus petit indice de dose est de 50,2dB(A) à l'extérieur et de 38,9dB(A) à l'intérieur du bâtiment ;

Les données relatives à la figure 4.12 sont mesurées le dimanche 07/05/2017 (avec portes et fenêtres fermées). Le graphique démontre que :

- Le plus grand indice de dose mesuré varie de 83,4dB(A) à 80,1dB(A) à l'extérieur et de 70,0dB(A) à 69,1dB(A) à l'intérieur du bâtiment ;
- Le plus petit indice de dose est de 52,3dB(A) à l'extérieur et de 39,2dB(A) à l'intérieur du bâtiment.

Lors du passage des avions, la durée du bruit varie de 20 secondes à 1mn10s (cela est dû aux types d'aéronefs). Certains aéronefs sont silencieux tandis que d'autres ne le sont pas. Par exemple les hélicoptères de l'armée et de la mission de l'ONU au Mali (MINUSMA) sont très bruyants, car ils volent à basse altitude. La fréquence du trafic aérien de l'aéroport international de Bamako est plus importante pendant les week-ends que les jours ordinaires. Les fréquences des événements enregistrés sont intenses entre 06H et 10H du matin et entre 19H et 23H du soir.

L'analyse de ces résultats montre que :

- les écarts entre les données externes et internes enregistrées en situation portes et fenêtres (ouvertes et fermées) sont faibles (varie de 10,7dB(A) à 13,9dB(A)) ;
- les éléments de façades atténuent très peu les niveaux de pression acoustiques ;
- le trafic de l'aéroport de Bamako s'intensifie généralement les périodes matinales (03 heures et 07 heures) et les soirées (19 heures et 23 heures).

Ces analyses permettent donc de tirer les conclusions suivantes :

- les façades du bâtiment ont une performance acoustique faible ;
- le confort acoustique est fortement affaibli au sein du pendant les périodes de survol des avions ;
- l'inconfort acoustique est ressenti la nuit (19H et 22H) entre et les périodes matinales (03H et 07H) ;

- le bâtiment a besoin de travaux de rénovation pour un confort acoustique adéquat au sein du bâtiment (isolation des façades intérieures).

4.3.3.1.2 Les niveaux sonores équivalents

Les résultats des mesures nous permettent d'estimer le niveau sonore équivalent et le niveau d'exposition aux bruits des avions.

L'exposition aux bruits provoque des nuisances ou inconforts sonores qui affectent la qualité de vie des populations vivantes à proximité de l'aéroport. Dans cette partie, l'objectif est de contribuer à l'évaluation de la pollution sonore afin de faciliter la prise de décisions concernant le contrôle de pollution et la gestion efficace des terres et des constructions autour de l'aéroport de Bamako. Pour ce faire, nous avons calculé les niveaux de bruit équivalents jour (L_{AeqD}) et nuit (L_{AeqN}), le niveau de bruit équivalent jour-nuit L_{DN} et le niveau d'exposition au bruit SEL lors des passages des avions au-dessus de la zone d'habitation du bâtiment test. Ces calculs sont réalisés à l'aide des données acoustiques enregistrées le 23 février 2017 et le 04 mars 2017 (portes et fenêtres extérieures ouvertes) et celles enregistrées le 05 avril 2017 et le 12 mai 2017 (portes et fenêtres extérieures fermées). Les périodes de temps nécessaire aux calculs des niveaux L_{AeqD} et de L_{AeqN} sont respectivement de (07H à 22H) et de (22H à 07H).

À partir des équations 5a, 5b et 7 (confère chapitre 1), nous aboutissons aux résultats du tableau 4.2.

Tableau 4-2: Les résultats de calculs des niveaux L_{AeqD} , L_{AeqN} et LDN en dB (A)

Les évènements	L_{AeqD} dB(A)	L_{AeqN} dB(A)	LDN dB(A)
Évènement 1	67,5	62,4	70,01
Évènement 2	65,6	60,5	68,10
Évènement 3	66,9	61,1	68,97
Évènement 4	64,0	60,0	67,25

Évènement1 : 23/02/2017 avec les portes et fenêtres ouvertes

Évènement2 : 04/03/2017 avec les portes et fenêtres ouvertes

Évènement3 : 05/04/2017 avec les portes et fenêtres fermées

Évènement4 : 12/05/2017 avec les portes et fenêtres fermées

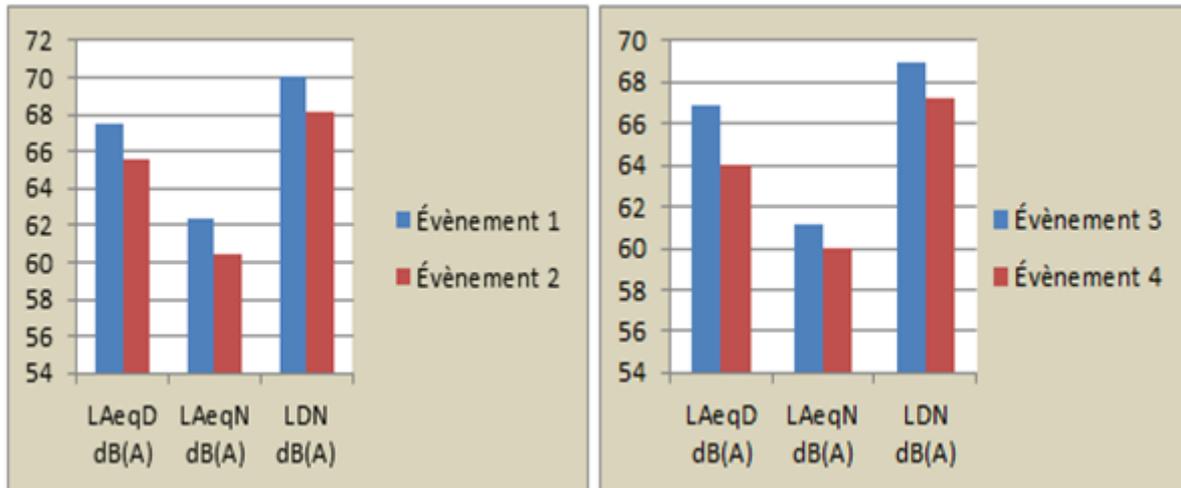


Figure 4.13: Histogrammes des niveaux équivalents (portes et fenêtres ouvertes)

Figure 4.14: Histogrammes des niveaux équivalents (portes et fenêtres fermées)

Les résultats du tableau 4.2 montrent que :

- à l'intérieur des habitations pendant la journée, l'indicateur L_{AeqD} oscille entre 67,5 et 65,6 dB(A) les portes et fenêtres ouvertes et entre 66,9 et 64,0 dB(A) les portes et fenêtres fermées. Ces valeurs dépassent très largement 55 dB(A) le seuil de sensation d'une forte gêne à l'intérieur des habitations ;
- À l'intérieur des habitations pendant la nuit, l'indicateur L_{AeqN} varie entre 62,4 et 60,5 dB(A) les portes et fenêtres ouvertes et entre 61,1 et 60,0 dB(A) les portes et fenêtres fermées. Ces valeurs sont supérieures à 40 dB(A) le seuil de forte perturbation du sommeil [Slama et al., 2008] ;
- Le niveau L_{DN} estimé est compris entre 70,01 et 68,1 dB(A) les portes et fenêtres ouvertes et entre 68,97 et 67,25 dB(A) les portes et fenêtres fermées, dépassant aussi très nettement le niveau de 52,6 dB(A) qui correspond à la limite supérieure pour les zones résidentielles strictement urbaines dans la NBR 10151 ;
- les niveaux L_{DN} sont tous supérieurs à 65 dB(A), ce qui nous renseigne que le site du bâtiment test est une zone sensible au bruit engendré par les trafics aériens de l'aéroport de Bamako.

4.3.3.1.3 Les niveaux d'exposition aux bruits des avions

Pour avoir une idée sur les niveaux d'exposition aux bruits des avions, nous avons représenté l'évolution des niveaux de pression sonores enregistrés lors des passages de deux avions au-dessus du bâtiment test (figures 4.15 et 4.16). Les figures sont relatives aux données mesurées le 23 février 2017 respectivement entre (10H21min10s et 10H22min41s) et (20H39min30s et 20H40min54s). Les données utilisées correspondent aux niveaux de pression acoustiques mesurés à l'extérieur du bâtiment.

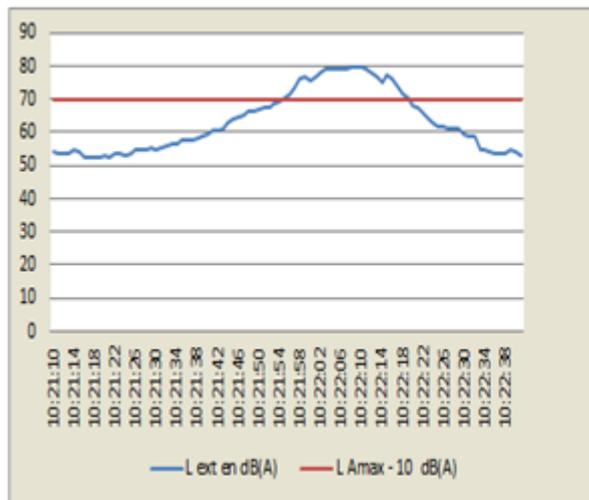


Figure 4.15: Évolution des niveaux de pression sonores relatifs au passage d'un avion entre 10H21mn10s et 10H22mn41s

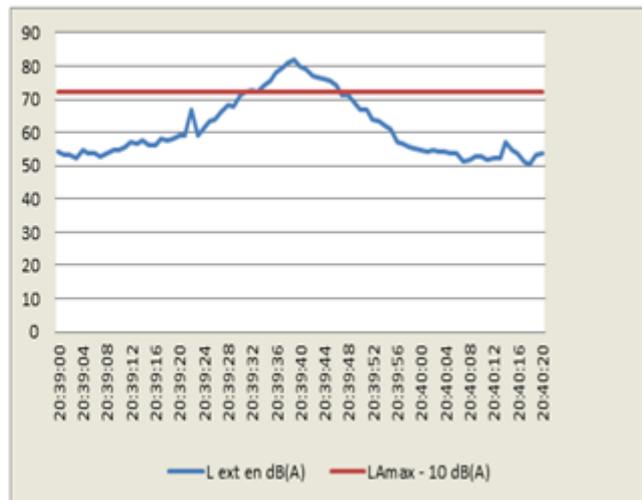


Figure 4.16: Évolution des niveaux de pression sonores relatifs au passage d'un avion entre 20H39mn30s et 20H40 mn54s.

Rappelons que le niveau sonore équivalent $L_{Aeq,T}$ et le niveau d'exposition aux bruits SEL des avions pendant leurs survols de la zone d'habitation du bâtiment test sont déterminés à partir des formules suivantes :

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{t=t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} \right)$$

$$SEL = L_{Aeq,t} + 10 \log(t)$$

Où $T = t_2 - t_1$ est la période de mesure en secondes, t_1 et t_2 sont les temps correspondant à l'intersection entre la courbe du niveau de pression acoustique mesuré (courbe bleue) et le niveau de pression acoustique continu équivalent (la droite rouge) sur la figure 4.15 et la figure 4.16, la durée d'échantillonnage 1seconde ($dt = 1s$), $L_A(t)$ est le niveau de pression acoustique mesuré pour chaque échantillon temporel entre t_1 et t_2 .

Pour la figure 4.15, le niveau maximum L_{Amax} observé est 79,9dB(A) à 10H22mn06s. Le niveau de pression acoustique continu équivalent ($L_{Amax} - 10dB(A)$) est 69,9dB(A).

Les points d'intersection correspondent aux temps $t_1 = 10H21mn54s$ et $t_2 = 10H22mn14s$, et la période $T = 20$ secondes.

Pour la figure 4.16, le niveau maximum L_{Amax} observé est 82,1dB(A) à 20H40mn21s.

Le niveau de pression acoustique continu équivalent ($L_{Amax} - 10dB(A)$) est 72,1 dB(A), ce qui conduit aux points d'intersection de temps $t_1 = 20H40mn09s$ et $t_2 = 20H40mn30s$, donc la période $T = 21$ secondes.

Les valeurs du niveau sonore équivalent L_{AeqT} et du niveau d'exposition au bruit de l'avion (SEL) correspondantes sont consignées dans le tableau 4.3 :

Tableau 4-3: Résultats des calculs des niveaux L_{AeqT} et SEL en dB (A)

	$L_{Aeq,T}$ en dB(A)	SEL en dB(A)
Fig IV.16 ($L_{Amax} = 79,9\text{dB(A)}$; T = 20secondes)	77,35	90,36
Fig IV.16 ($L_{Amax} = 82,1\text{dB(A)}$; T = 21secondes)	78,49	91,17

La zone d'étude se trouve à une distance de 7 à 10 km de l'aéroport (confère la section 4).

Le survol de la zone d'habitation du bâtiment est considéré comme un phénomène transitoire unique, nous tenons donc compte du niveau d'exposition au bruit (SEL) et du niveau sonore équivalent $L_{Aeq,T}$ correspondants à la période T de survol.

Conformément à la réglementation européenne, les zones aéroportuaires concentriques sur 10 à 12 km, ne doivent pas respectivement être soumis à un niveau de bruit représentatif au passage des avions (le niveau d'exposition au bruit SEL) dépassant 100 à 90 dB(A) pendant le jour et 80 à 90 dB(A) pendant la nuit à l'extérieur des habitations. Le niveau sonore équivalent $L_{Aeq,T}$ correspondant à la moyenne énergétique globale spécifique au bruit perçu durant la période T des passages des avions ne doit pas excéder les valeurs seuils de 60 à 64 dB(A) pendant le jour et 50 à 55 dB(A) pendant la nuit [Leef milieu Brussels, 2017].

À partir des résultats obtenus dans le tableau 4.3, nous constatons que :

- la valeur **90,36 dB(A)** pour SEL est dans le domaine des valeurs seuils du jour ;
- la valeur **91,17 dB(A)** pour SEL excède un peu la valeur limite seuil de la nuit ;
- les valeurs **77,35 dB(A) et 78,49 dB(A)** indiquant respectivement le niveau $L_{Aeq,T}$ jour et nuit relatifs au passage des avions dépassent très nettement les seuils.

Ces résultats montrent que les nuisances sonores liées aux survols des avions sont susceptibles d'altérer l'habitabilité et la qualité de vie de la zone sur un rayon de 10 km autour de l'aéroport international de Bamako.

Les résultats de ces évaluations peuvent servir d'indicateurs aux décideurs et autorités locales pour la prise de mesures de gestion efficace de la limitation des espaces de construction autour de la zone aéroportuaire de Bamako. Cela va permettre d'assurer le confort acoustique des habitants et de prévenir les problèmes liés aux bruits des aéronefs.

4.3.3.1.4 La performance acoustique du bâtiment test

Le bâtiment test est situé dans la zone aéroportuaire de Bamako. Les bâtiments de cette zone sont soumis à des nuisances sonores à cause du trafic aérien. Pour un meilleur confort acoustique, les bâtiments de la zone doivent avoir un niveau de performance acoustique élevé. La performance acoustique de l'enveloppe du bâtiment (les éléments de façades) est déterminée par leur atténuation acoustique. Pour estimer cette atténuation, nous avons effectué des mesures acoustiques "in situ" sur le bâtiment test. Ces mesures consistent à enregistrer les niveaux de bruit du trafic aérien à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment. Les mesures utilisées sont celles réalisées à l'intérieur et à l'extérieur des pièces du bâtiment avec portes et fenêtres fermées. Les extraits de données mesurées aux dates 23/02/2017 et 04/03/2017 durant les survols du bâtiment par l'avion (les moments bruyants) sont représentés aux figures 4.17 et 4.18. Ces représentations

mettent en évidence la perte d'intensité du niveau sonore observée à travers l'enveloppe du bâtiment test.

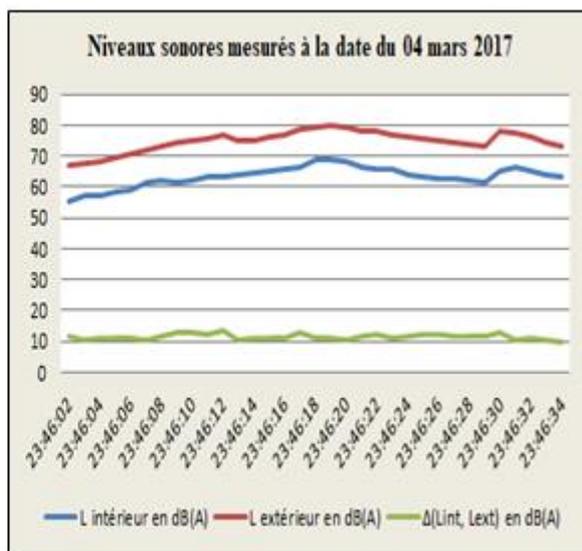
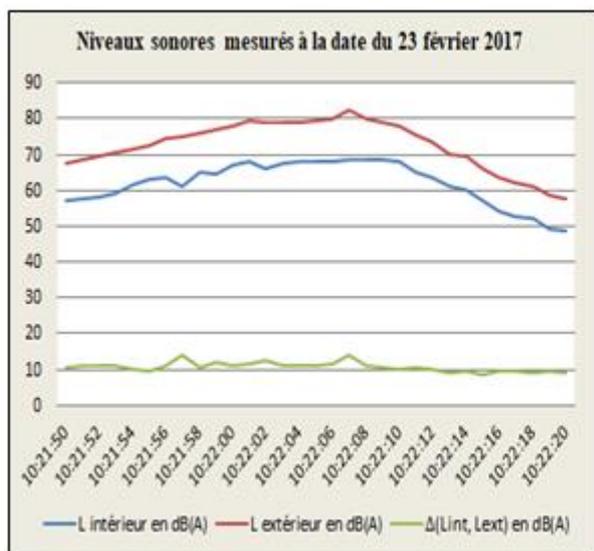


Figure 4.17: Illustration graphique de l'écart entre le niveau de pression acoustique extérieur et le niveau de pression acoustique intérieur du bâtiment le 23/02/2017

Figure 4.18: Illustration graphique de l'écart entre le niveau de pression acoustique extérieur et le niveau de pression acoustique intérieur du bâtiment le 04/03/2017

Les représentations graphiques mettent en évidence l'écart ΔL en dB(A) entre le niveau de pression acoustique mesuré à l'extérieur du bâtiment et celui mesuré à l'intérieur.

$$\Delta L = L_{\text{ext}} - L_{\text{int}}$$

L'atténuation de l'intensité du niveau sonore dans les parois du bâtiment est proportionnelle à l'écart ΔL . Au laboratoire, cet écart de niveau de pression acoustique correspond à l'indice d'affaiblissement R des parois extérieures du bâtiment. Il représente la capacité d'un matériau à empêcher la transmission des sons aériens. La valeur de ΔL nous permet donc de savoir si la paroi du bâtiment est performante (plus ΔL a une valeur qui est élevée, plus les parois sont performantes). Les valeurs des mesures sur les graphiques ci-dessus montrent que l'atténuation de l'intensité du niveau sonore des parois (l'indice d'affaiblissement) est de l'ordre de (10,7 et 13,9 dBA) et (9,6 et 13,7 dBA) respectivement le 23/02/2017 et le 04/03/2017. Des valeurs très faibles attestent que les parois du bâtiment test n'ont pas de performance acoustique adéquate pour un bâtiment aéroportuaire. Par exemple, lors du passage des aéronefs, on constate de façon générale que les valeurs du niveau de pression acoustique mesurées à l'intérieur du bâtiment dépassent les 50dBA (valeur seuil du niveau de confort acoustique relatif au sommeil dans une chambre). Étant donné que la plupart des bâtiments de la zone aéroportuaire de Bamako sont construits dans les mêmes conditions (absence de normes ou réglementations de construction), il convient de considérer que le niveau de confort acoustique est faible. Vu l'importance du trafic

aérien, nous estimons que les habitants de la zone aéroportuaire de Bamako sont exposés à des niveaux élevés de nuisances sonores. Ces résultats sont dus entre autres :

- aux types d'ouvertures utilisés dans les bâtiments (portes et fenêtres en persiennes métalliques sans vitrage simple) ;
- au manque d'isolation des parois du bâtiment (murs, plafond, plancher, etc.);
- aux ponts phoniques (fissures sur les parois, des trous des prises électriques encastrées) ;
- aux modes d'usages du bâtiment liés aux conditions climatiques (fenêtres et portes ouvertes pour la ventilation pendant les périodes chaudes).

4.3.3.2 Recommandations de solutions

4.3.3.2.1 Gestion du bruit à proximité des aéroports

Pour une meilleure gestion du bruit à proximité de l'aéroport, différentes actions s'appuyant sur un plan d'urbanisme réfléchi et les lois législatives réglementaires doivent être appliquées. Ces recommandations adressent aux administrateurs des aéroports et aux acteurs de la construction des infrastructures, il s'agit :

- d'appliquer avec rigueur les plans d'exposition au bruit (PEB) relatifs à la détermination des bruits autour de l'aéroport dans le but d'alerter les propriétaires existants et futurs des impacts sonores possibles d'un aéroport voisin. Ces mesures empêchent ou découragent également le développement incompatible de la propriété dans les zones aéroportuaires sans les autorisations administratives appropriées, par exemple, la construction de maisons individuelles dans la zone à nuisance sonore élevée devra être interdite [Ganic et al., 2015] ;
- d'exiger que les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les cartes communales ne soient établis, dans les secteurs soumis aux nuisances sonores, qu'après élaboration d'un schéma de cohérence territoriale (SCOT) qui doit préciser de façon rigoureuse les secteurs réservés ;
- d'informer de façon obligatoire les constructeurs de logements, les candidats à l'acquisition (ou à la location) du niveau de bruit susceptible d'être perçu dans la zone concernée ;
- de fixer des normes d'isolation phonique renforcées dans les zones qui, bien que non interdites à la construction, sont soumises à des nuisances en raison de survols réguliers [DGAC, 2006] ;
- d'encourager l'isolation acoustique (Résidences et bâtiments publics) à travers des techniques d'isolation adéquate des portes, des fenêtres et probablement des unités de climatisation incompatibles pour des constructions (bâtiments) situées au voisinage des aéroports ;
- d'acquérir des terres ou zones compatibles aux bruits ou de relocaliser tous les occupants qui résident dans les limites de niveau de bruits sensibles [Netjasov F, 2012 et Boeing, 2014] ;
- de respecter les lois relatives aux Servitudes d'Aviation accordant le droit de survoler les propriétés, même si la pratique cause des dommages, des inconvénients, ou de la perte de

la valeur de la propriété. Un tel accord empêche généralement les occupants de construire ou de cultiver quoi que ce soit sur une zone spécifiée ;

- de construire des murs anti-bruit pour faire rempart aux bruits sol lors des phases d'atterrissages et décollages des avions ;
- d'orienter les zones de construction des bâtiments et en particulier les habitations en fonction des pistes de façon à diminuer leurs survols par les avions ;
- d'éviter que l'urbanisation ultérieure ne vienne annihiler les choix précédents.

4.3.3.2 Actions d'amélioration de la performance acoustique du bâtiment

Pour améliorer la performance acoustique du bâtiment afin de garantir un confort acoustique des usagers, nous suggérons des travaux de réhabilitation ou de rénovation ci-après comme solutions correctives :

- le renforcement de l'isolation des parois par exemple l'isolation des toitures à l'intérieur par un isolant souple et épais, plaqué avec un matériau dense (plâtre phonique) ;
- l'habillage intérieur des pièces en plaque de plâtre montée sur ossature métallique indépendante [DGAC, 2006] ;
- l'habillage extérieur des éléments de façades par bardage bois, panneaux peints ou enduits ;
- l'obstruction des transmissions directes à travers la peinture antibruit posée sur sa sous-couche insonorisante (pour une réduction de 3 à 15 dB(A) selon les fréquences) [DGAC, 2006] ;
- l'utilisation des menuiseries étanches aux bruits (portes et fenêtres avec joints) ;
- le changement de vitrage des fenêtres avec le double vitrage acoustique dissymétrique de type 10-10-4 (vitre 10 mm, lame d'air 10 mm, vitre 4 mm) et de calfeutrer le dormant ;
- l'utilisation des vitrages de type « feuilletés acoustiques » renforçant la performance (une atténuation acoustique de 30 à 40 dB(A)) ;
- le calfeutrage au mieux des orifices issus des travaux d'installations électriques et plomberie du bâtiment.

4.3.3.3 Discussions

La croissance des trafics aériens dans les grandes villes engendre des problèmes de santé, des gênes, des atteintes à la qualité de vie des habitants des bâtiments aéroportuaires. Pour une amélioration du confort et de la qualité de vie des usagers, il est important de mettre l'accent sur l'efficacité acoustique des bâtiments et infrastructures aéroportuaires. Pour ce faire, différentes études sont envisagées (l'évaluation et l'analyse des risques affectant la performance acoustique et des mesures acoustiques in situ). Les mesures acoustiques au sein du bâtiment nécessitent des appareils (sonomètres) de qualité et répondant aussi aux exigences et normes de mesures. Dans le domaine acoustique du bâtiment, il existe plusieurs normes, chacune de ces normes nécessite un type spécifique d'appareil de mesure. Parfois un appareil répond aux exigences d'une norme, mais ces principes et conditions de fonctionnement peuvent être un handicap pour diverses raisons. Citons par exemple les réalités du terrain de mesure (conditions climatiques, distance et sécurité), le faible niveau de l'autonomie de l'appareil (besoin de remplacement périodique de batteries, la faible capacité d'enregistrement, etc.), les risques de vol de l'appareil (zone de mesure en plein chantier de construction). Dans le contexte des zones isolées, il faut des

équipements mobiles et de grandes autonomies contrairement à ceux qui nécessitent une connexion permanente avec l'ordinateur pour l'enregistrement des données. Par rapport au choix, des recherches en ligne (internet) doivent être faites pour comparer les caractéristiques des appareils (fiabilité des mesures, accessibilité des données, etc.) et obtenir les avis des experts, des fabricants, etc.

Vu les réalités de notre terrain de mesure où le débit de la connexion internet et la couverture d'électricité sont très faibles, nous avons mis l'accent sur l'autonomie de l'appareil de mesure (autonomie d'alimentation des piles et la capacité d'enregistrement). Deux sonomètres digitaux **SL-451** conformes à la norme **EN 61672-1** classe 2 ont été choisis pour la réalisation des mesures de niveaux de pression à l'extérieur et au sein du bâtiment.

Les points forts de ces appareils sont leur plage de mesure de 30 à 130 dB (évaluation pondérations A/C), leur précision ($\pm 1,4$ dB, 1 kHz), leur temps réglable (rapide et long) et leur fonctionnement avec des piles ou avec un bloc d'alimentation. Les sonomètres SL-451 sont équipés d'un enregistreur de données et d'une interface USB. Grâce à son boîtier solide doté d'une protection de caoutchouc injecté, ils sont également adaptés pour une utilisation dans des conditions difficiles. L'appareil dispose d'un logiciel et d'une rallonge pour micro avec une fonction de sélection automatique de la plage de mesure. Un enregistreur de données intégré permet d'enregistrer jusqu'à 32 000 mesures qui peuvent être lues ultérieurement et exploitées sur le PC avec le logiciel fourni. Grâce au microphone amovible et au câble de rallonge de 3 mètres, il est possible d'effectuer des mesures même dans les endroits les plus difficiles d'accès. Les données issues de cette phase de mesure sont traitées à l'aide du logiciel. Les résultats issus de ces mesures et ceux obtenus lors de l'évaluation et l'analyse de risques affectant la performance acoustique permettent de préconiser des solutions correctives, des bonnes pratiques dans le cadre de la nouvelle construction et des projets de rénovation des bâtiments dans les zones aéroportuaires.

4.3.4 Application de la méthode d'analyse et l'évaluation de risque

La méthode consiste à évaluer et analyser des facteurs de risques qui affectent la performance acoustique des bâtiments de la zone aéroportuaire de Bamako. Lors de nos visites de terrain, nous avons constaté que le bâtiment expérimental possède des ouvertures non étanches à l'air donc au bruit. Il s'agit de portes et de fenêtres en persiennes métalliques sans grille et ni vitrage. Ces types ouvertures possèdent une forte perméabilité au bruit, car les minces filets d'air passent à travers le pourtour des ouvrants (figure 4.19).



Figure 4.19: Illustration de la fenêtre en persienne métallique du bâtiment test

Ces observations ont aussi permis de constater que les façades ne sont pas isolées contre les bruits du trafic aérien. Les murs des parois externes et internes du bâtiment sont construits avec des briques en parpaing de 15cm d'épaisseur. Une couche fine d'enduit appliquée aux différentes faces a une épaisseur de 0,5 cm environ. Les sollicitations thermiques des rayonnements solaires et acoustiques des trafics aériens engendrent des pathologies (fissures) sur les façades. Certaines pratiques ou techniques de construction telles des trous mal rebouchés, des jonctions non étanches sont remarquées sur les parois du bâtiment et ces pathologies constituent des ponts phoniques engendrant des transmissions parasites des bruits aériens. Les descriptions de la méthodologie d'analyse et de l'évaluation de risque (confère la section évaluation) recommandent deux groupes d'analystes des risques (groupe 1 et groupe 2). Les deux groupes furent constitués, le premier groupe d'analyste est l'équipe dont les membres ont réalisé le bâtiment test. Il s'agit du maître d'ouvrage et de trois techniciens (un électricien, un plombier et un maçon). Le second groupe constitue un ingénieur en BTP et un acousticien de bâtiment. Après la constitution des groupes d'analystes, le principe de l'évaluation leur a été expliqué.

4.3.4.1 Cas des risques liés à l'usage des portes et fenêtres

Première phase : Dans cette étude de cas, l'accent est mis sur les risques associés aux infiltrations des bruits des avions dans le bâtiment dû aux types ouvertures utilisés. L'usage des portes et fenêtres en persiennes métalliques dans les bâtiments aéroportuaires n'est pas fortuit vu les risques d'inconfort acoustique dû aux infiltrations des bruits aériens. Selon le maître d'œuvre du groupe 1, l'usage de ces types ouvertures s'explique par :

- ✚ l'objectif du projet de construction dans lequel l'accent est mis sur la ventilation naturelle ;
- ✚ le fait que le site est loin (4 à 6 km) de l'aéroport ;
- ✚ la plupart des bâtiments de la zone sont construits avec les mêmes matériaux ;
- ✚ le fait que le système de vitrage peut être adapté ultérieurement sur les portes et fenêtres ;
- ✚ les systèmes de vitrages sur les portes et fenêtres nécessitent obligatoirement la climatisation du bâtiment.

Le risque d'inconfort sonore au sein du bâtiment lié aux infiltrations des bruits des avions à travers les types d'ouvertures (portes et fenêtres) n'a pas été considéré trop important lors du choix des matériaux.

La description de ce scénario du risque d'infiltration des bruits des avions dans le bâtiment est décrite par le groupe 1 comme suit :

- P_0 : la probabilité d'occurrence d'infiltrations des bruits des avions dans le bâtiment est jugée faible avec un niveau de pondération $P_0 = 2$ dans la matrice (tableau 2.1) ;
- G_0 : la gravité des conséquences des infiltrations est jugée tolérable (le niveau de pondération égal à 2, $G_0 = 2$) ;
- M_0 : le niveau de connaissance du domaine est jugé fort (le niveau de pondération égal à $M_0 = 0,6$ dans la matrice).

Ces connaissances de base sur le scénario d'infiltration de bruits des avions nous permettent d'interpréter la mise à jour de l'analyse de l'évaluation de risques avec la formule du niveau de criticité suivante :

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 2, \quad G_0 = 2, \quad M_0 = 0,6$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 2 * 2 * 0,6 \quad C_0 = 2,4$$

Le niveau de criticité C_0 est inférieur à 4 ($C < 4$). Dans la matrice de risque ci-dessous, on lui attribue le code vert. Le risque est donc qualifié faible.

Tableau 4-4: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe 1

Risque	Nature	Criticité	Code
	Faible	2,4	

Deuxième phase : À ce niveau, le groupe 2 réalise l'évaluation de la description des risques effectuée par le groupe 1. La pertinence de la description des risques détermine la force de la connaissance ou de la maîtrise du domaine des concepteurs. La non-prise en compte de l'aspect d'infiltration du bruit dans le bâtiment test lors de la planification de l'opération par les analystes doit être due au manque de considération de la particularité du site de construction du bâtiment (zone aéroportuaire) ou tout simplement à appréciation légère du risque. Le groupe 2 considère que l'hypothèse des concepteurs est moins pertinente, et donc la force de la connaissance M_0 est jugée faible. Ces considérations sont basées sur les constats ci-dessous :

- les hypothèses retenues représentent de fortes simplifications ;
- les informations et les données ne sont pas pertinentes ;
- le réel désaccord entre les avis des experts ;
- les phénomènes impliqués sont mal compris [Flage et Aven, 2009].

Le groupe 2 évalue la force des connaissances des concepteurs faible (le niveau de pondération $M_1 = 1$ dans la matrice), l'incertitude de la gravité des conséquences catastrophique (le niveau de

pondération $G_1 = 4$ dans la matrice) et la probabilité d'occurrence moyenne (le niveau de pondération égal à $P_1 = 3$ dans la matrice).

Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 3 * 4 * 1 \text{ soit } C = 12$$

Le niveau de criticité est égal à 12, cela conduit à un risque très fort et donc on lui attribue le code noir.

Tableau 4-5: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	Très fort	12	

Troisième phase : les deux groupes d'analystes élaborent une description conjointe des risques. Dans ce cas présent, il y a désaccord entre les avis des experts (question 3 ci-dessus) concernant l'infiltration de bruits des avions dans le bâtiment à cause des types de portes et fenêtres. Par conséquent, la force des connaissances soutenant l'évaluation des risques est réduite. Cela conduit au niveau de criticité très fort (couleur noire dans la matrice de risque) et les conséquences de la gravité catastrophiques (comme montre la matrice de risque ci-dessus). Les deux groupes préconisent des solutions correctives dans le cadre des travaux de rénovation pour une amélioration des confort acoustique et thermique des usagers à savoir :

- l'utilisation des fenêtres et portes en aluminium ou en bois avec un vitrage thermoacoustique et un indice d'isolement acoustique $R_w (C ; C_{tr})$ élevé qui est conçue avec des joints souples entre ouvrants et dormant afin d'assurer une bonne étanchéité à l'air ;
- L'utilisation d'un système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) pour renforcer le confort thermique.

Les portes et fenêtres sont étanches à l'air et aux bruits aériens, elles peuvent assurer la ventilation naturelle et le renouvellement de l'air intérieur (évacuation du CO_2 , des polluants, des odeurs...) à travers une grille d'entrée d'air munie :

- d'un déflecteur permettant à l'air froid entrant d'être dirigé d'abord vers le plafond afin qu'il se mélange à l'air ambiant pour minimiser la gêne qu'il pourrait produire au niveau des occupants ;
- d'un absorbeur de sons selon le degré d'isolation acoustique requis par rapport aux nuisances sonores extérieures ;
- d'un dispositif anti-insectes (mouches, moustiques...).

4.3.4.2 Cas des risques liés au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique sur le bâtiment

Première phase : L'existence de ponts phoniques et le manque de l'isolation acoustique sur les façades s'expliquent selon le groupe 1 pour les raisons suivantes :

- ✚ le projet de construction n'a pas prévu des travaux d'isolations des façades ;
- ✚ les murs de ciment se fissurent sous la forte chaleur et les vibrations ;
- ✚ le manque de réglementations exigées pour les constructions (notamment l'isolation des bâtiments) à proximité de l'aéroport de Bamako.

La description de ce scénario du risque de perturbation du confort sonore dans le bâtiment est décrite par le groupe 1 comme suit :

- P_0 : probabilité d'occurrence de ce scénario est forte (un niveau de pondération $P_0 = 4$ dans la matrice (tableau 2.1) ;
- G_0 : la gravité des conséquences (la perturbation du confort sonore dans le bâtiment) est jugée tolérable (un niveau de pondération G_0 est égal à 2) ;
- M_0 : le niveau de connaissance du domaine est moyen (le niveau de pondération égal à $M_0 = 0,8$).

Les connaissances sur le scénario de perturbation du confort sonore au sein du bâtiment permettent d'interpréter l'analyse de l'évaluation de risque. Le niveau de criticité se calcule donc comme suit:

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 4, \quad G_0 = 2, \quad M_0 = 0,8$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 4 * 2 * 0,8 \quad C_0 = 6,4$$

Le niveau de criticité C_0 est supérieur à 6 ($C > 6$). Le code de couleur est jaune dans la matrice de risque ci-dessous. Le risque est donc jugé moyen.

Tableau 4-6: Niveau de criticité du risque lié au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique jugé par le groupe 1

Risque	Nature	Criticité	Code
	Moyen	6,4	

Deuxième phase : L'évaluation de la description des risques faite par le groupe 1 est réalisée par le groupe 2. La pertinence de la description des risques détermine la force de la connaissance ou de la maîtrise du domaine des concepteurs. Le risque de perturbation de confort sonore dans le bâtiment dû au manque d'isolation et aux transmissions parasites à travers le pont phonique a été minimisé lors de la réalisation du bâtiment (le manque de considération de l'isolation des façades par le projet et le mauvais choix du matériau de construction. Cela explique le faible jugement sur le risque de perturbation du confort acoustique au sein du bâtiment. Le groupe 2 approuve les raisons précédemment évoquées par le groupe 1 (l'hypothèse des concepteurs est moins pertinente). Le groupe 2 évalue la force de connaissances de concepteurs moyenne (niveau pondéré est $M_1 = 0,8$ dans la matrice) et la gravité de conséquences importante (niveau

pondéré est $G_1 = 3$ dans la matrice) et la probabilité d'occurrence est forte (niveau pondéré est $P_1 = 4$ dans la matrice). Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 4 * 3 * 0,8 \text{ soit } C = 9,6$$

Le niveau de criticité est compris entre 9 et 12, ($9 < C < 12$). Cela conduit à un risque fort et donc on lui attribue le code rouge.

Tableau 4-7: Niveau de criticité du risque lié au manque de l'isolation acoustique et l'existence de pont phonique jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	<i>Fort</i>	9,6	

Troisième phase : Durant cette phase, les deux groupes d'analystes ont fait des suggestions pour remédier à ces facteurs de risques. Dans les descriptions de ce scénario par les groupes analystes, il y a un désaccord entre les avis des experts concernant l'aspect d'isolation des façades et les ponts thermiques. Par conséquent, le niveau de criticité est jugé fort (couleur noire dans la matrice de risque) et les conséquences de la gravité importantes (comme montre la matrice de risque ci-dessus). Les solutions correctives préconisées dans le cadre des travaux de rénovation pour minimiser l'impact des scénarios sur le confort acoustique des usagers sont :

- calfeutrer au mieux les orifices créant les ponts phoniques (les fissures, les orifices des boîtiers d'installations électriques) ;
- renforcer l'isolation des parois notamment le toit à l'intérieur à l'aide de plaques de plâtre phonique ;
- Augmenter la hauteur des murs de la clôture du bâtiment test pour créer un effet-écran aux bruits incidents.

4.4 Conclusion

L'étude de ce chapitre porte sur l'évaluation de risques qui affectent la performance acoustique dans les bâtiments de la zone aéroportuaire de Bamako. L'approche méthodologique repose sur des visites de terrain sous forme d'investigations sur sites et des séances de mesures acoustiques au sein du bâtiment. Ces investigations sont menées sous forme de questionnaires adressés aux habitants et d'entretiens auprès des différents experts (les maîtres d'œuvre et les techniciens) impliqués dans les projets de construction. Ces différentes étapes ont permis de collecter les informations sur les aspects suivants :

- la qualité de vie des habitants de ces bâtiments ;
- les données de mesures de l'intensité sonore perçue au sein des bâtiments ;
- les insuffisances des pratiques et techniques au niveau des acteurs de la construction ;
- les difficultés et les besoins des usagers et des acteurs de la construction.

L'étude de cas a concerné un bâtiment à proximité de l'aéroport international de Bamako. L'analyse de ces informations a permis d'identifier les risques qui affectent la performance acoustique du bâtiment à savoir les types d'ouvertures (portes et fenêtres), les défauts

d'étanchéité (des fissures et trous sur les parois internes dues aux installations électriques et plomberies) et les défauts d'isolation des parois internes.

Pour des futurs projets de constructions et des travaux de rénovation, des solutions correctives et préventives aux désordres et non-qualités sont préconisées.

Ces bonnes pratiques proposées permettent d'assurer l'harmonie entre le bâtiment et son environnement (protection contre les nuisances sonores, les émissions atmosphériques des avions, et l'utilisation des matériaux adéquats) et par suite améliorer le confort acoustique et la qualité de vie des habitants.

.

Chapitre 5 : Gestion et évaluation des risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques

5. Gestion et évaluation des risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques

5.1 Introduction

Dans les pays émergents, le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus dynamiques, résultat d'une croissance rapide de la population. Cette croissance entraîne une forte urbanisation des villes où habitent aujourd'hui plus de 50 % de la population mondiale, consommant les deux tiers de l'énergie produite au plan mondial [Guid, 2015]. Selon l'ONU Habitat, le parc de bâtiments pourrait être multiplié par 4 d'ici 2050 dans certaines parties d'Afrique subsaharienne. Ces parties constituant la région la moins électrifiée au monde qui fait déjà face à de sérieux problèmes d'approvisionnement en services d'électricité [ONU Habitat, 2015]. Dans ces pays africains, le secteur du bâtiment est responsable jusqu'aux 4/5 de la consommation énergétique dont plus des 2/3 de l'électricité [François S et al., 2012] entraînant d'énormes émissions des gaz à effet de serre (impacts environnementaux) sans compter les émissions indirectes liées aux différents processus d'obtention des matériaux de construction. Ces tendances devraient se maintenir, voire se renforcer. En effet, en 2050, 75 % de la population mondiale vivra dans les villes [Guid, 2015]. Les impacts environnementaux sont dus aux méthodes de construction inadaptée au climat local engendrant l'utilisation des équipements très énergivores pour le confort thermique. Actuellement, le rôle que joue l'efficacité énergétique des bâtiments dans la réduction de la consommation d'électricité et le réchauffement fait l'unanimité dans tous les pays. Il s'agit donc d'adopter des techniques de construction qui assurent un équilibre entre le bâtiment et son environnement (concept bioclimatique). Le concept de bâtiment bioclimatique est l'une des meilleures alternatives pour tisser cette harmonie entre le bâtiment et son environnement. Ce concept n'est pas récent en Afrique, car depuis longtemps nos ancêtres construisaient des maisons en paille, en bois, en banco, en pierres (les bâtiments bioclimatiques du pays Dogons, ou les maisons traditionnelles construites en banco dans les régions de Mopti et Ségou au Mali). Dans les pays à climat tropical, des techniques de construction utilisant des matériaux locaux de construction au détriment des matériaux importés ou industriels doivent être valorisés. Les zones tropicales se situent entre les tropiques jusqu'à 15 à 25 degrés de latitude nord et sud. Les écarts diurnes et annuels de température sont toutefois plus importants que sous le climat équatorial [vikidia, 2015]. On distingue deux types de climats tropicaux :

- zone chaude et humide avec un ensoleillement important, une durée du jour constante, des températures élevées avec une faible différence entre le jour et la nuit, une variation saisonnière faible et une hygrométrie toujours très élevée ;

- zone chaude et sèche avec un ensoleillement important, des températures élevées, une hygrométrie faible et une différence de température entre le jour et la nuit relativement importante [François S et al., 2012].

La très forte température provoque un énorme besoin de refroidissement des bâtiments (climatisation, ventilation), ce qui explique les dépenses énergétiques et les énormes impacts sur l'environnement. Face à ces constats et phénomènes naturels, le besoin énergétique des bâtiments dans les pays tropicaux se joue dans la gestion efficace des besoins de refroidissement pendant les longues périodes chaudes (7 à 10 mois) dans l'année et aussi dans la prévention des besoins récents de chauffage pendant les périodes froides dues au changement climatique. Une alternative raisonnable à ces défis majeurs consiste à exploiter la nature à travers une harmonie entre le bâtiment et son environnement d'une part et d'autre part, une évaluation efficace des performances énergétiques. L'étude de ce chapitre est réalisée dans le contexte d'une architecture bioclimatique. L'étude de cas porte sur un bâtiment des logements sociaux réalisés à Bamako. La méthodologie est basée sur l'évaluation des risques qui affectent la performance énergétique des bâtiments. Elle s'inspire de l'approche de retour d'expérience (REX-Bâtiments-Performances-Risques), une méthode dont la pertinence d'analyse et d'évaluation est reconnue par des travaux effectués dans le cadre du programme « Règles de l'Art Grenelle environnement 2012 » en France [Rapport octobre, 2014. Grenelle de l'Environnement]. L'accent est mis sur l'identification des non-qualités et les facteurs d'inconfort dont la résolution contribue à améliorer la performance énergétique et environnementale des bâtiments. Cette démarche soutenue par des enquêtes de terrains auprès des usagers et des interviews auprès des acteurs et professionnels du secteur des bâtiments. Les données issues de ces processus sont traitées à l'aide de la méthode d'évaluation élaborée spécifiquement pour intégrer les connaissances et stratégies du concept bioclimatique. Le retour d'expérience de l'évaluation et l'analyse des risques affectant la performance énergétique du bâtiment test produit des connaissances dont la capitalisation permet de proposer de solutions correctives et des bonnes pratiques pour résoudre des problèmes de performance constatés.

5.2 Étude de cas : Gestion et évaluation des risques de performance pour les bâtiments bioclimatiques

5.2.1 Présentation de l'étude de cas

Le projet de construction des logements sociaux est un programme immobilier lancé depuis 2002 par le gouvernement malien sur toute l'étendue du territoire. Différentes catégories de logements (**F3A, F3B, F4, et F5**) sont construites. Des entreprises maliennes et étrangères sont financées par le gouvernement malien pour la réalisation de ces logements. Selon le revenu, différents types de logements sont attribués à des Maliens de l'intérieur ainsi que ceux de l'extérieur sous de contrat d'une durée de remboursement de 25 ans. L'utilisation des premiers bâtiments a commencé dans les années 2006. Un logement du type F3 a été choisi pour l'étude de cas des bâtiments bioclimatiques. Les logements F3 ont les dimensions (12,5m x 20m) soit 250m² et possèdent deux chambres, une salle de séjour, une terrasse et une toilette. Il existe deux catégories de logements du type F3 à savoir F3A et F3B. Les différences entre les deux types se trouvent au niveau des toilettes. Pour le logement de type F3A, la toilette est interne tandis

qu'elle est externe en F3B. Le logement F3B possède un magasin. Ci-dessous les vues des différentes façades du bâtiment test sont illustrées sur la figure 5.1.

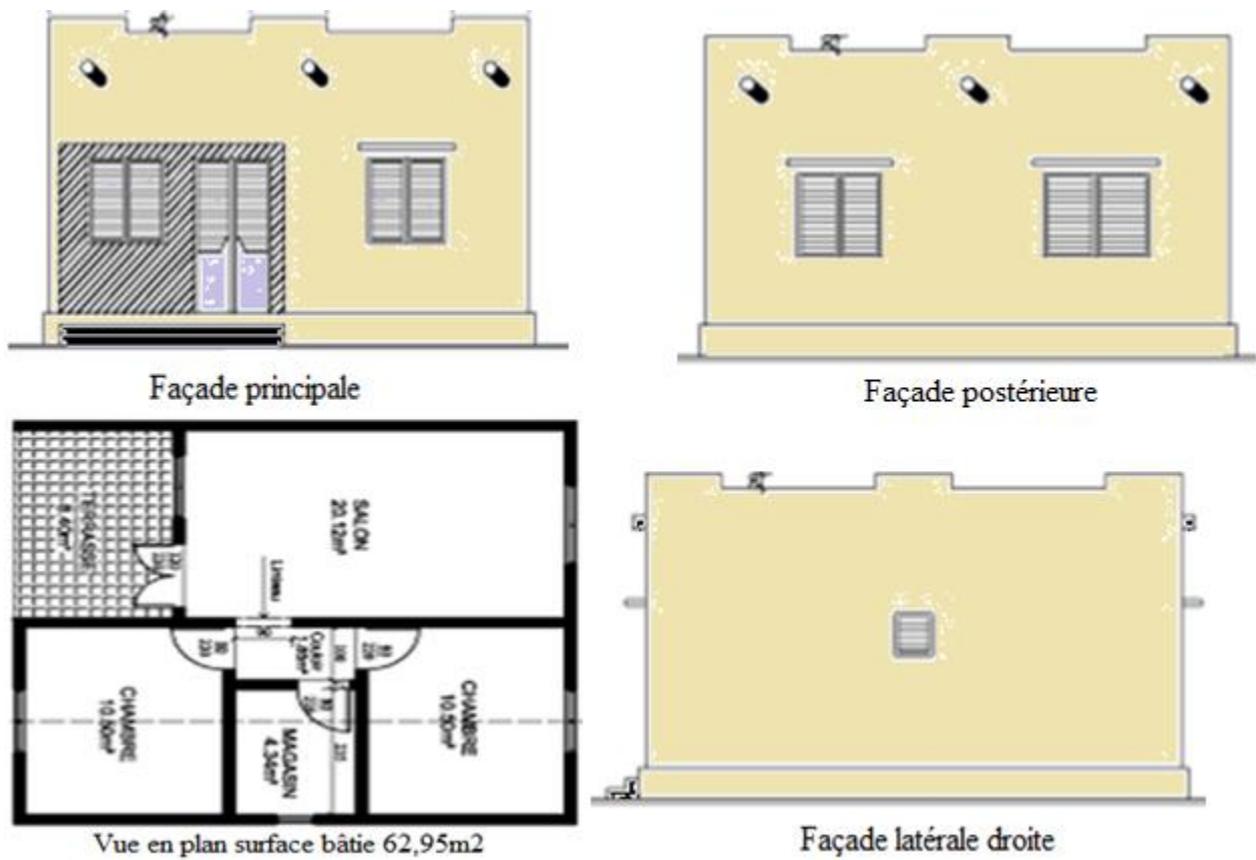


Figure 5.1: Illustration du bâtiment expérimental



Figure 5.2: Vue de loin des logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro

5.2.2 Cadre général de l'enquête auprès des habitants

5.2.2.1 Sélection et caractéristique des bâtiments

L'enquête s'est déroulée dans la cité des 1551 logements de N'Tabacoro, compte tenu de son taux d'urbanisation élevée et les futurs projets de construction des logements sociaux. Les bâtiments visités sont du type F3A et F3B. Pour mener à bien cette enquête, des fiches de questionnaires ont été élaborées pour servir d'instrument d'investigation auprès des usagers et des acteurs de constructions. L'accent est mis sur des visites de terrain afin d'observer les réalisations des différentes étapes de constructions des bâtiments, de collecter les besoins des uns et des autres, de recenser les dysfonctionnements, de faire des images pour illustration. Les visites de terrain ont concerné quelques logements en phase d'utilisation et les chantiers des futurs logements sociaux. Ces différentes phases de visite permettent de conforter les informations afin d'identifier les facteurs de risque et d'analyser les obstacles diminuant la portée des actions d'efficacité énergétique (la performance énergétique) du bâtiment.

5.2.2.2 Déroulement de l'enquête auprès des habitants

L'enquête a pour objectif de déterminer les renseignements indicatifs sur la performance thermique des logements sociaux de Bamako et le niveau de confort des usagers. Pour ce faire, nous avons mené du 05 mars au 11 avril 2018, une enquête auprès de la population des 1551 logements sociaux de N'Tabacoro. 148 logements du type F3A et F3B ont été visés par les enquêtes. Les questions adressées aux usagers sont basées sur les aspects suivants :

- le type de logement concerné ;
- le nombre d'années de résidence de l'utilisateur ;
- l'identification du système de climatisation du logement ;
- le niveau de satisfaction de l'habitant par rapport au confort thermique du logement ;
- les périodes de sensation de l'inconfort thermique ;
- l'identification des travaux de rénovation effectués ;
- les recommandations d'amélioration du confort (confère l'Annexe 3).

Des fiches d'enquêtes sous forme de questionnaires élaborés ont été distribuées aux habitants. Les entretiens auprès des bénéficiaires ou propriétaires du logement ayant répondu à notre sollicitation ont été effectués en majorité sur place. Au total, 160 fiches de questionnaires ont été élaborées pour les entretiens. La méthode utilisée a permis de renseigner 148 fiches sur 160 fiches distribuées soit 92,50%. La durée des entretiens consentis par les acteurs soumis aux enquêtes était comprise entre 15 et 45mn.

5.2.2.3 Résultats et discussions

Les résultats de l'enquête sont mentionnés ci-dessous (confère l'Annexe 3)

Pour la question « De quel type de logement social avez-vous bénéficié ? »

Sur les 148 logements concernés, trente-trois (33) sont du type F3A et cent-quinze (115) sont du type F3B.

À la question « Depuis combien d'années habitez-vous dans ce logement ? » :

- Quarante-un sur cent quarante-huit (41/148) des bénéficiaires soit 27,70% affirment qu'ils habitent y depuis 4 ans ;

- Quatre-vingt-trois sur cent quarante-huit (83/148) des usagers soit 56,08% disent qu'ils y habitent depuis 7 ans ;
- Vingt-quatre sur cent quarante-huit (24/148) des propriétaires soit 16,22% attestent qu'ils y sont depuis 9 ans.

À la question « A la réception, votre logement avait-il de système de climatisation ? » :

- Tous les bénéficiaires soit 100% des habitants soumis à l'enquête ont répondu par « **non** » ;
- Vingt-un sur cent quarante-huit (21/148) des bénéficiaires soit 14,20% ont opté pour le système de climatisation dans la salle de séjour et la chambre à coucher ;
- Trente-huit sur cent quarante-huit (38/148) des habitants soit 25,70% ont adopté pour le système de ventilation mécanique ;
- Vingt-six sur cent quarante-huit (26/148) des habitants soumis à l'enquête soit 17,60% ont planté des hangars devant la terrasse d'entrée ;
- Neuf sur cent quarante-huit (09/148) des bénéficiaires soit 06,10% ont renforcé l'isolation du bâtiment en végétalisant les façades ;
- Cinq sur cent quarante-huit (05/148) des usagers soit 03,40% ont planté des arbres dans la cour (côté façade sud) du logement ;
- Trente-neuf sur cent quarante-huit (49/148) des bénéficiaires soit 33,11% n'ont rien fait comme travaux pour rénover le bâtiment.

À la question « A quels moments de la journée l'inconfort thermique est beaucoup ressenti au sein du logement ? » :

- Soixante-cinq sur cent quarante-huit (65/148) des propriétaires soit 43,92% disent que l'inconfort thermique est beaucoup ressenti pendant la nuit ;
- Cinquante-un sur cent quarante-huit (51/148) des bénéficiaires soit 34,46% affirment que la période de soir est le moment de sensation de l'inconfort thermique ;
- Trente-deux sur cent quarante-huit (32/148) bénéficiaires soit 21,62% pensent que l'inconfort thermique est omniprésent au sein des bâtiments.

À la question « En dehors du confort thermique, avez-vous fait des travaux de rénovation aussi pour d'autres raisons ? » :

- Quatre-vingt-quinze sur cent quarante-huit (95/148) des locataires soit 64,20% ont fait les travaux pour d'autres raisons ;
- Cinquante-trois sur cent quarante-huit (53/148) des usagers à l'enquête soit 35,80% ont rénové seulement pour améliorer le confort thermique.

À la question « Si oui, quelles sont les raisons de ces travaux ? » :

- Trente-trois sur quatre-vingt-quinze (33/95) des propriétaires soit 34,74% ont fait des travaux pour des raisons d'esthétiques ; Quarante-sept sur quatre-vingt-quinze (47/95) des bénéficiaires soit 49,47% ont augmenté leur capacité d'accueil ;
- Quinze sur quatre-vingt-quinze (15/95) des usagers soit 15,79% ont effectué des transformations pour des raisons commerciales (création des boutiques, de pharmacie, de salon de coiffure, et cliniques).

À la question « De façon globale, quel est le niveau de satisfaction du confort thermique de votre logement avant et après rénovation ? » :

✚ Avant rénovation :

Aucun des bénéficiaires n'est satisfait du confort thermique de son logement.

✚ Après rénovation :

- quarante-cinq sur quatre-vingt-dix-neuf (45/99) de ceux qui ont rénové leur logement soit 48,50% sont satisfaits du confort thermique de leur logement ;
- cinquante-quatre sur quatre-vingt-dix-neuf (54/99) de ceux qui ont effectué des travaux de rénovation soit 51,50% sont insatisfaits du confort thermique de leur logement.

À la question «*Que diriez-vous, pour améliorer les futurs projets de logements sociaux?*» :

- Soixante-deux sur cent quarante-huit (62/148) des habitants soit 41,90% affirment prendre en compte l'aspect efficacité énergétique pour un meilleur confort thermique ;
- Quarante-deux sur cent quarante-huit (42/148) des bénéficiaires soit 28,40% demandent seulement un aspect esthétique ;
- Cinquante-quatre sur cent quarante-huit (54/148) des usagers soit 36,50% mettent l'accent sur l'aspect capacité d'accueil ;
- Trente sur cent quarante-huit (30/148) des enquêtes soit 20,30% formulent un accès facile à l'eau potable.

5.2.2.4 Synthèse

Les enquêtes ont concerné 148 logements sociaux dont 33 du type F3A et 115 du type F3B. La plupart des logements sont habités depuis plus de quatre ans. Aucun de ces logements n'avait de système de climatisation au moment de la réception. Pour des raisons de confort, les bénéficiaires de ces logements ont installé des systèmes de refroidissement (14,20% ont opté pour le système de climatisation, 25,70% ont opté pour le système de ventilation mécanique) d'autres ont installé des hangars devant la terrasse (17,60%) et renforcé l'isolation du bâtiment en végétalisant les façades (06,10%).

Faute de moyens 33,11% des habitants n'ont rien fait comme travaux pour rénover le bâtiment. Sur l'effectif des habitants soumis à l'enquête, 35,80% ont rénové leur bâtiment pour améliorer le confort thermique tandis que 64,20% ont rénové pour d'autres raisons (34,74% pour des raisons d'esthétiques, 49,47% pour augmenter la capacité d'accueil et 15,79% pour des raisons commerciales (création des boutiques, de pharmacie, de salon de coiffure, clinique). Avant les travaux de rénovation, aucun des habitants n'était satisfait du confort thermique du logement. Après les travaux de rénovation, 48,50% d'entre eux sont satisfaits du confort thermique contre 51,50% des insatisfaits du confort thermique. Pour les futurs projets de construction des logements sociaux, 41,90% des usagers veulent que l'aspect efficacité énergétique soit pris en compte ; 28,40% demandent l'aspect esthétique ; 36,50% ont mis l'accent sur l'aspect capacité d'accueil ; 20,30% ont formulé un accès facile à l'eau potable.

5.3 Enquêtes auprès des acteurs de construction

La méthodologie d'enquête consiste à effectuer des entretiens auprès des acteurs conformément à la description de la section 3.6 (les acteurs qui ont participé aux processus d'évaluation sont répartis en deux groupes). Les entreprises qui ont effectué la réalisation des projets de construction des logements sont des entreprises privées (les nationaux et les Chinois). Beaucoup de responsables de ces entreprises n'ont pas voulu participer, ils pensent que notre étude est une enquête d'évaluation déguisée. Nous avons mené les entretiens avec quelques techniciens du

projet de construction des logements sociaux qui ont voulu répondre à nos questions. Ils ont accepté de participer sous réserve de garder leur anonymat. Il s'agit d'un ingénieur, deux maçons, un plombier et un électricien qui ont constitué le premier groupe d'analystes. Le second groupe est composé des acteurs (un ingénieur, trois maçons, un électricien et un plombier) de l'Entreprise Générale d'Espoir (EGES) qui est une entreprise privée dont les acteurs de construction EGES n'ont pas participé à aucune des étapes du projet de construction de ces logements sociaux. La méthode d'enquête est basée sur des interviews sous forme de questions-réponses à l'aide d'une fiche de questionnaires. Avant les interviews avec les acteurs du bâtiment, nous avons effectué des visites de terrain afin d'observer les différentes étapes d'évolution des chantiers, recenser des informations et faire des photos des non-qualités et pathologies pouvant affecter la performance énergétique des bâtiments. Les non-qualités et pathologies constatées sont entre autres le manque d'isolation de l'enveloppe du bâtiment, les infiltrations (défauts d'étanchéité), les types d'ouvertures (portes et fenêtres), le problème d'orientation de certains logements, le problème de dimensionnement (parcelle de petite taille) de certains logements, présence de moisissures sur les façades internes, l'inexistence de système de ventilation ou de climatisation, la nature des planchers (figures 5.4). L'entretien avec les acteurs ayant participé aux travaux de construction porte sur les différentes non-qualités et pathologies observées lors des visites de terrain sur les bâtiments.



Figure 5.3: Vue de loin des différentes étapes de construction des logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro



Figure 5.4: Images de quelques non-qualités sur les logements sociaux type F3B de la cité de N'Tabacoro

- a) Images de traces de micro-organismes sur le plafond dû à l'humidité sur le toit du bâtiment test ;
- b) Images d'orientation de blocs de bâtiments (Bloc 1 orienté suivant l'axe est-ouest et Bloc 2 orienté suivant l'axe nord-sud) ;
- c) Images de fenêtres et portes en persiennes métalliques sans vitrage du bâtiment test ;
- d) Images de traces d'infiltrations d'eau sur la façade du bâtiment test.

Les questions des entretiens sont relatives aux problèmes (non-qualité, pathologie) observés sur les bâtiments. Les cas de risques discutés sont les suivants :

- cas des risques liés à l'orientation de certains logements (Bloc 1 orienté suivant l'axe est-ouest et Bloc 2 orienté suivant l'axe nord-sud) ;
- cas des risques liés aux types de fenêtres des ouvertures (fenêtres et portes en persiennes métalliques) ;
- cas des risques liés à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment ;
- cas des risques liés aux dimensions (la taille) des parcelles.

5.4 Évaluation des risques affectant la performance thermique du bâtiment

Les évaluations des risques dans les bâtiments concernent les aspects qui déterminent leur niveau de performance énergétique et environnementale à savoir la thermophysique de l'enveloppe, la géométrie (forme et orientation), la fenestration, l'étanchéité à l'air et l'infiltration. Des études ont montré que les deux tiers de l'inconfort pourraient être éliminés par l'utilisation judicieuse des conceptions passives simples en tenant compte des propriétés thermophysiques de l'enveloppe et la configuration de l'enveloppe [Ralegaonkar et Gupta, 2010]. Le schéma de configuration d'une construction tient compte des obstructions périphériques et toutes autres circonstances extérieures pertinentes pour déterminer la forme du bâtiment et l'orientation qui influencent la disponibilité de la lumière du jour et le gain solaire. La thermophysique de l'enveloppe consiste en l'application de matériaux d'isolation thermique et de stockage pour réduire le transfert de chaleur par conduction à travers les murs, le toit, les fenêtres et par la suite la charge de conditionnement d'air. Des paramètres tels que le ratio surface fenêtre/surface au sol de la pièce, l'emplacement de la fenêtre et le brise-soleil sont classés comme facteurs de géométrie influençant l'éclairage naturel, la ventilation et le gain d'énergie solaire. L'infiltration et l'étanchéité à l'air concernent le contrôle du gain ou la perte de chaleur à travers les fissures sur l'enveloppe du bâtiment.

5.5 Application de la méthode d'analyse et l'évaluation de risque

Dans cette étude, on utilise les non-qualités, les pathologies et les connaissances pratiques des acteurs de construction du projet comme la base pour la discussion. La méthodologie d'évaluation est basée sur le principe de capitalisation de retours d'expériences des acteurs de construction. Les logements sociaux du type F3B à Bamako sont étudiés pour évaluer les risques qui affectent la performance dans le contexte de bâtiments bioclimatiques. L'évaluation et l'analyse des risques permettent d'hierarchiser les désordres et non-qualités afin de leur proposer de solutions correctives. Le risque est évalué en fonction du niveau de criticité C. Le niveau de criticité C du risque est déterminé à l'aide de la formule classique ci-dessous :

$$C = P * G * M$$

Avec P : le niveau pondéré de la probabilité d'occurrence du facteur de risque ;

G : le niveau pondéré de la gravité de conséquences du facteur de risque ;

M : le niveau pondéré de la force de connaissance de l'évaluateur sur le domaine d'étude.

5.5.1 Cas de risque lié à l'orientation de certains logements

Première phase : Dans ce cas, l'effort est mis sur les risques associés à l'orientation du bâtiment. La description du scénario étudié est basée sur l'aspect orientation des bâtiments. Lors des visites de terrains, les observations des logements sociaux révèlent que certains bâtiments sont orientés suivant la direction longitudinale est-ouest et d'autres suivant la direction longitudinale nord-sud (figure 5.4 b). Ce choix d'orientation des bâtiments n'est pas fortuit. Vu le type de climat de la ville de Bamako (le climat chaud et sec), le risque d'inconfort thermique au sein du bâtiment dont les façades et les ouvertures sont vers l'ouest (direction longitudinale nord-sud) est très élevé. Les façades dans cette orientation reçoivent plus d'apports solaires en

été provoquant une augmentation de température de l'air intérieur [Olgyay, 1963]. Selon le groupe 1, l'orientation de ces bâtiments suivant la direction longitudinale nord-sud s'explique par le souci d'économie d'espace et les exigences d'application des plans de lotissement du projet. Le risque d'inconfort thermique au sein du bâtiment dû à ce choix d'orientation n'a donc pas été pris en compte par les acteurs de construction. La justification du scénario de risque lié à l'orientation des façades et ouvertures donnée par le groupe 1 se traduit comme suit :

- P_0 : la probabilité d'occurrence de ce scénario est jugée faible, ce qui correspond à un niveau de pondération égal à 2 ($P_0 = 2$) dans la matrice (tableau 2.1);
- G_0 : la gravité des conséquences (les apports solaires en été) est jugée mineure (le niveau de pondération égal à $G_0 = 1$ dans la matrice) ;
- M_0 : le niveau de connaissance du domaine est jugé fort (le niveau de pondération égal à $M_0 = 0,6$ dans la matrice).

Ces connaissances de base sur le scénario d'orientation des façades et ouvertures vers l'ouest permettent d'estimer et d'analyser le niveau de criticité du risque :

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 2, \quad G_0 = 1, \quad M_0 = 0,6$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 2 * 1 * 0,6 \quad C_0 = 1,2$$

Le niveau de criticité $C_0 = 1,2$ est inférieur à 4 ($C < 4$). Dans la matrice de criticité du risque, on lui octroie le code vert. Le risque est donc qualifié de faible.

Tableau 5-1: Niveau de criticité du risque lié à l'orientation de certains logements jugé par le groupe 1

Risque	Nature	Criticité	Code
	<i>Faible</i>	1,2	

Deuxième phase : Cette phase correspond à l'évaluation de la description effectuée par le groupe 1 sur le scénario lié à l'orientation des bâtiments. Les arguments apportés dans la description du risque déterminent le niveau de la maîtrise du domaine des concepteurs. Le manque de considération de l'aspect des apports solaires en été sur les façades et sur les ouvertures entraîne une augmentation de la température de l'air intérieur. Vu les réalités des conditions climatiques de Bamako (climat tropical chaud et sec), la description donnée par le groupe 1 n'est pas pertinente (un jugement léger du risque par le groupe 1). Le groupe 2 considère que l'hypothèse des concepteurs est moins congrue ; le niveau de la force de connaissance M_0 est donc jugé faible. Ces jugements sont basés sur les considérations [Flage et Aven, 2009] ci-dessous :

- les informations et les données ne sont pas pertinentes ;
- les avis des acteurs ne sont pas compatibles avec les réalités climatiques du site ;
- les phénomènes impliqués sont mal compris ;
- les prédictions ne sont pas cohérentes.

Par conséquent, le groupe 2 estime que le niveau de la force de connaissance des acteurs est moyen (le niveau pondéré est $M_1 = 0,8$ dans la matrice) et l'incertitude de la gravité est jugée importante (niveau pondéré est $G_1 = 3$ dans la matrice) et la probabilité d'occurrence est forte (niveau pondéré est $P_1 = 4$ dans la matrice).

Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 4 * 3 * 0,8 \text{ soit } C = 9,6$$

Le niveau de criticité est égal à 9,6 ($9 < C < 12$), le risque du scénario est fort (le code rouge dans la matrice de criticité).

Tableau 5-2: Niveau de criticité du risque lié à l'orientation de certains logements jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	<i>Fort</i>	9,6	

Troisième phase : La synthèse des descriptions des risques des groupes d'analystes (groupe 1 et le groupe 2) a permis d'apprécier l'impact de l'orientation sur la température de l'espace intérieur. Pour minimiser les dépenses d'énergie et garantir la performance thermique du bâtiment, le concepteur doit tenir compte d'une bonne implantation des bâtiments qui prend en compte les apports énergétiques du soleil et une meilleure position des ouvertures par rapport au vent. L'analyse du désaccord entre les avis des experts (les deux groupes analystes) du scénario d'orientation des façades et ouvertures de certains bâtiments vers l'ouest (direction longitudinale nord-sud) a permis aux groupes analystes de faire des propositions consensuelles sur les bonnes pratiques ou solutions correctives dans le cadre des travaux de rénovation pour une amélioration de confort thermique des usagers. Ces solutions correctives préconisées sont les suivantes :

- l'utilisation des auvents sur les fenêtres qui permet de stopper le rayonnement solaire pendant l'été ;
- l'utilisation de stratégie d'architecture bioclimatique permettant d'introduire de l'humidité dans les pièces (les courants d'air) à travers les ouvertures (végétation à proximité de la maison) [Francisco M A et al. 2015] ;
- l'utilisation des stores extérieurs en tant que stratégie de protection solaire.

5.5.2 Cas de risque lié aux types d'ouvertures (portes et fenêtres)

Première phase : Dans ce deuxième cas de risque, l'accent est mis sur le risque relatif aux infiltrations non désirées dues à l'utilisation des portes et des fenêtres en persiennes métalliques sans vitrage. Ces types d'ouvertures ne sont pas étanches à l'air, et au bruit. L'usage de ces types d'ouvertures dans les bâtiments entraîne des risques d'infiltration non désirés d'air, et d'insectes dangereux à certains moments de l'année (en hiver la prolifération des moustiques et l'activité de l'harmattan en été chargent le vent de poussières). Selon le groupe 1, l'utilisation des portes et fenêtres en persienne métallique s'explique par les exigences du cahier de charge du projet (économie d'investissement) et aussi que ces types d'ouvertures assurent la ventilation naturelle à travers les lamelles des fenêtres. Les explications du scénario de risque lié à l'utilisation des

portes et des fenêtres en persienne métallique sans vitrage faite par le groupe 1 s'interprètent comme suit :

- P_0 : la probabilité d'occurrence des infiltrations est jugée faible, ce qui correspond à un niveau de pondération égal à 2 ($P_0 = 2$) dans la matrice ;
- G_0 : la gravité des infiltrations due à l'usage des portes et fenêtres en persiennes métalliques sans vitrage est estimée tolérable (le niveau G_0 est pondéré à 2 dans la matrice) ;
- M_0 : le niveau de la force de connaissance du domaine est jugé fort (le niveau M_0 pondéré à 0,6 dans la matrice).

Ces informations sur l'interprétation de ce scénario permettent d'estimer le niveau de criticité du risque :

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 2, \quad G_0 = 2, \quad M_0 = 0,6$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 2 * 2 * 0,6 \quad C_0 = 2,4$$

Le niveau de criticité $C_0 = 2,4$ est inférieur à 4 ($C < 4$). Dans la matrice de criticité du risque, on lui octroie le code vert. Le risque est donc qualifié de faible.

Tableau 5-3: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe 1

Risque	Nature	Criticité	Code
	Faible	2,4	

Deuxième phase : La description effectuée par le groupe 1 sur le scénario décrit en phase 1 est évaluée par le groupe 2. La description donnée par le groupe 1 reflète évidemment le degré de maîtrise du domaine des acteurs qui ont réalisé le projet. Selon le groupe 2, l'utilisation de tels types d'ouvertures dans les bâtiments a évidemment négligé les risques de destruction de la qualité d'air (un taux élevé d'air renouvelé, et de poussière à l'intérieur) et de santé (piques des insectes). Cela peut s'expliquer par les raisons suivantes :

- la méconnaissance du terrain par le maître d'œuvre ;
- l'économie d'investissement de la part du gouvernement ;
- le manque d'exigence au niveau des contrôleurs ;
- le risque négligé par les acteurs de construction et les décideurs du projet.

Vu le faible niveau des hypothèses avancées et les modèles proposés concernant l'aspect d'infiltration, le groupe 2 estime que la maîtrise du domaine reste à désirer [Flage et Aven, 2009]. Il est donc important d'ajuster le niveau de risque lié à cet aspect d'infiltration à travers les portes et les fenêtres du bâtiment. En conséquence, il juge moyenne la force de maîtrise du domaine ou de la connaissance des acteurs de construction (avec un niveau pondéré $M_1 = 0,8$ dans la matrice), l'incertitude de la gravité jugée importante (niveau pondéré $G_1 = 3$ dans la matrice) et la probabilité d'occurrence considérée moyenne (niveau pondéré $P_1 = 3$ dans la matrice). Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 3 * 3 * 0,8 \text{ soit } C = 7,2$$

Le niveau de criticité est égal à 7,2 ($6 \leq C \leq 9$), et le risque du scénario est estimé moyen (le code jaune dans la matrice de criticité).

Tableau 5-4: Niveau de criticité du risque lié à l'usage des ouvertures (portes et fenêtres) jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	Moyen	7,2	

Troisième phase : L'analyse du désaccord entre les avis a permis aux deux groupes d'analystes de préconiser en commun accord des solutions correctives énumérées ci-après.

L'utilisation des fenêtres et des portes en aluminium ou en bois avec vitrages solaires ou films autocollants sur les vitrages (pour limiter les gains solaires aussi bien en hiver qu'en été), tout en associant :

- des moustiquaires de grillage à mailles fines adaptées aux cadres des fenêtres et des portes qui peuvent factoriser le renouvellement d'air à l'intérieur tout en empêchant les moustiques et autres insectes volants de pénétrer dans les habitations ou les locaux ;
- des brise-soleils bioclimatiques comme protection solaire qui peuvent être ouverts en été et fermés en cas de mauvais temps ou de températures moins clémentes grâce au processus de fermeture des brise-soleils.

5.5.3 Cas des risques sur l'isolation de l'enveloppe du bâtiment

Première phase : Pour ce troisième cas, la réflexion porte sur les risques qu'engendre le manque d'isolation des façades du bâtiment. Les murs du bâtiment sont faits avec des briques (parpaing) de 15 cm, et toitures en béton de ciment. Sans isolation thermique, les façades sont recouvertes à l'extérieur ainsi qu'à l'intérieur d'un enduit de ciment d'une épaisseur de 0,5 cm. Les explications données par groupe 1 relativement à ce scénario d'absence d'isolation de l'enveloppe reposent sur d'une part sur l'importance de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment (des briques en parpaing et du béton) pour le climat chaud et sec et d'autre part sur les objectifs du cahier de charge du projet (problème de financement). Les descriptions de ce scénario de risque lié à l'absence d'isolation de l'enveloppe par le groupe 1 se traduisent comme suit :

- P_0 : la probabilité d'occurrence de l'inconfort thermique durant les périodes chaudes est jugée très faible avec une pondération égale à $P_0 = 1$ dans la matrice ;
- G_0 : la gravité de conséquences est estimée tolérable (G_0 est pondéré à 2 dans la matrice) ;
- M_0 : le niveau de la force de connaissance du domaine est jugé moyen (M_0 pondéré à 0,8 dans la matrice).

Ces informations sur l'interprétation de ce scénario permettent d'estimer le niveau de criticité du risque :

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 1, \quad G_0 = 2, \quad M_0 = 0,8$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 1 * 2 * 0,8 \quad C_0 = 1,6$$

Le niveau de criticité $C_0 = 1,6$ est inférieur à 4. Dans la matrice de criticité du risque, on lui octroie le code vert. Le risque est donc qualifié de faible.

Tableau 5-5: Niveau de criticité du risque lié à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment jugé par le groupe1

Risque	Nature	Criticité	Code
	Faible	1,6	

Deuxième phase : Dans cette phase, le groupe 2 procède à l'évaluation de la description du scénario du manque d'isolation du bâtiment faite par le groupe 1. Malgré l'inertie des murs en parpaing et la présence du béton, vu la forte intensité du flux thermique en période de chaleur estivale, le risque d'inconfort thermique dû à l'absence d'isolation de l'enveloppe doit être pris au sérieux. L'inertie du béton et l'enduit sur des façades ne peuvent sûrement pas être l'argument du concepteur pour négliger l'isolation de l'enveloppe du bâtiment. Le groupe 2 considère donc que l'hypothèse des concepteurs n'est pas pertinente. Dans ce cas, la maîtrise du domaine est jugée faible (hypothèse avancée peu pertinente, et désaccord entre les opinions d'experts), ainsi les risques liés à l'absence d'isolation ne doivent pas être négligés (risque d'inconfort thermique et dilatation au niveau des ponts thermiques dû aux sollicitations climatiques). Le groupe 2 estime donc que la force de connaissance du concepteur est faible (niveau pondéré $M_1 = 1$ dans la matrice), l'incertitude de la gravité est importante (niveau pondéré $G_1 = 3$ dans la matrice) et la probabilité est forte (niveau pondéré $P_1 = 4$ dans la matrice).

Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 4 * 3 * 1 \quad \text{soit} \quad C = 12$$

Le niveau de criticité est égal à 12, cela conduit à un risque très fort et donc on lui attribue le code noir.

Tableau 5-6: Niveau de criticité du risque lié à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	Très fort	12	

Troisième phase : La synthèse des descriptions des deux groupes d'analystes sur le désaccord entre les avis a permis de réajuster le niveau de la force de connaissances du groupe 1 soutenant l'évaluation du scénario. Les deux groupes d'analystes ont recommandé des solutions correctives énumérées ci-dessous dans le cadre des travaux de rénovation pour une amélioration de la performance des bâtiments :

- l'isolation par l'extérieur qui renforce l'inertie thermique à l'intérieur des bâtiments ;

- l'étanchéité à l'air des parois pour un bon contrôle des flux de ventilation ;
- la réalisation des systèmes de protection solaires efficaces en été (l'isolation des toitures par végétation) afin d'éviter les surchauffes ;
- l'installation des panneaux solaires pour le besoin de la ventilation.

Des dispositifs de ventilation nocturne doivent également être installés pour :

- évacuer pendant la nuit les calories stockées durant la journée
- rafraîchir l'air entrant durant les heures les plus chaudes de la journée.

5.5.4 Cas des risques liés à la taille des parcelles

Première phase : Ce dernier cas relatif à la taille des parcelles permet de mettre en lumière le risque lié aux petites dimensions des parcelles dans le climat tropical chaud. Les logements de type F3B ont des dimensions 12,5m x 20m soit (250m²). Les alignements des façades, la réservation d'un garage, l'endroit pour planter des arbres sur une telle parcelle de petite taille (< 400m²) n'étaient pas faciles pour permettre une construction de qualité. Le risque d'une mauvaise intégration du bâtiment dans son environnement ne pouvait manifestement pas se constater que si un dimensionnement raisonnable des parcelles (au moins 400m²) était prévu par l'équipe de morcellement. Selon les explications du groupe 1, la petite taille des parcelles est un consensus depuis les phases initiales de construction du projet. Vu la forte demande de candidature des logements sociaux d'éditions en éditions, l'adoption des parcelles de petites tailles permet l'obtention d'un maximum des logements sociaux. Par conséquent, le groupe 1 a minimisé le risque lié à ce scénario de taille des parcelles des logements. Les descriptions faites par le groupe 1 par rapport au scénario lié à la taille des parcelles dans la construction de qualité s'interprètent comme suit :

- P_0 : la probabilité d'occurrence des perturbations de confort des habitants est jugée moyenne, avec une pondération égale à 3 dans la matrice ;
- G_0 : la gravité de conséquence de la petite taille des parcelles est estimée tolérable (ce qui correspond la valeur pondérée $G_0 = 2$ dans la matrice) ;
- M_0 : le niveau de la force de connaissance du domaine est jugé fort (M_0 pondéré à 0,6 dans la matrice).

Ces informations sur l'interprétation de ce scénario permettent d'estimer le niveau de criticité du risque :

$$C_0 = P_0 * G_0 * M_0 \quad \text{avec} \quad P_0 = 3, \quad G_0 = 2, \quad M_0 = 0,6$$

$$\text{donc} \quad C_0 = 3 * 2 * 0,6 \quad C_0 = 3,6$$

Le niveau de criticité $C_0 = 3,6$ est inférieur à 4 ($3,6 < C$). Dans la matrice de criticité du risque, on lui octroie le code vert. Le risque est donc qualifié de faible.

Tableau 5-7: Niveau de criticité du risque lié à la taille des parcelles jugé par le groupe1

	Nature	Criticité	Code
Risque	Faible	3,6	

Deuxième phase : Dans cette phase, le groupe 2 évalue le niveau de connaissance du groupe 1 sur le scénario lié au manque d'isolation du bâtiment. Bien que la demande de logement social par les citoyens soit forte, le choix de petite taille de parcelles des logements ne doit pas être un motif pour négliger le rôle que joue une cour externe dans l'harmonisation entre le bâtiment et son environnement. Pour une évaluation efficace des risques affectant la performance énergétique et environnementale, le groupe 2 a ajusté le niveau de risque lié à l'aspect de dimensionnement des parcelles. Il juge donc la force de connaissance du concepteur moyen (niveau pondéré $M_1 = 0,8$ dans la matrice) et la gravité de conséquence catastrophique avec un niveau de pondération égal à 4 ($G_1 = 4$) dans la matrice et la probabilité d'occurrence forte avec un indice de pondération égal à 4 ($P_1 = 4$) dans la matrice.

Ces informations permettent de calculer le niveau de criticité :

$$C_1 = 4 * 4 * 0,8 \text{ soit } C = 12,8$$

Le niveau de criticité est égal à 12,8 ($C > 12$), le risque du scénario est très fort (le code noir dans la matrice de criticité).

Tableau 5-8: Niveau de criticité du risque lié à la taille des parcelles jugé par le groupe2

Risque	Nature	Criticité	Code
	Très fort	12,8	

Troisième phase : L'analyse des avis des groupes analystes a permis de comprendre que les parcelles de petite taille ou dimension posent d'énormes problèmes aux concepteurs pour une exploitation convenable de l'environnement (concept bioclimatique). Des perturbations de performance énergétique et environnementale peuvent être considérables. Cela provoque de l'inconfort thermique en période de forte chaleur (période estivale) et entraîne donc un fort besoin de refroidissement (climatisation, et ventilation). Par conséquent des frais supplémentaires sont engendrés sur la facture d'électricité (manques à gagner importants). En commun accord, ils préconisent des solutions correctives énumérées ci-après :

- la prise en compte des facteurs de performance énergétique et environnementale pendant les phases de morcellement et de définition du projet ;
- la construction des hangars en paille à la devanture de la maison ;
- l'installation des panneaux solaires pour le besoin de ventilation.

5.5.5 Discussions

L'évaluation des risques dans les bâtiments ne date pas d'aujourd'hui. Beaucoup de méthodes ou techniques d'évaluation ont été proposées. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode de la gestion des risques adaptative [Bjerga T, Aven T, 2015] et les techniques d'évaluation de la conception passive GBRTs (BREEAM, LEED, CASBEE, BEAM plus et GBL-ASGB) [Chen et al., 2015]. Dans ce chapitre, nous essayons d'aborder le sujet par une autre méthode dans le but de renforcer les méthodes précédentes. L'évaluation par la méthode de la gestion des risques adaptative [Aven T, Renn O, 2009] nécessite une caractérisation plus détaillée des risques à travers des analyses en profondeur des incertitudes. Par exemple, le couple (C, U) dans la

perspective des risques [Aven T et Renn O, 2009 ; Aven T et Renn O, 2010] est considéré comme une généralisation de la base de probabilité bien connue avec la définition du risque fourni par Kaplan et Garrick [Kaplan et Garrick, 1981]. Dans la perspective du couple (C, U), le risque est défini sous forme de combinaison de deux dimensions (C, U) où C représente la gravité de la conséquence de l'activité considérée et U les incertitudes associées. Le risque est décrit en précisant les conséquences (C') et en utilisant une mesure (Q) (interprété dans un sens large) de l'incertitude conduisant à une description des risques (C', Q, K) où K est la connaissance de fond sur laquelle se basent C' et Q [Aven T et al., 2014]. La démarche de la gestion des risques adaptative basée sur les notions de la probabilité (théoriques) est pertinente. Mais en effet il est plus efficace d'ajouter les connaissances pratiques (expériences) dans l'évaluation des risques. Cette nouvelle approche fait l'objet d'étude dans ce chapitre. En principe, il est nécessaire de combiner la théorie et la pratique pour mieux diagnostiquer les risques de performance dans les bâtiments. L'approche de Retours d'Expériences des risques est appliquée à partir des enquêtes de terrain (interviews des acteurs du secteur du bâtiment, visites des sites, la prise des photos, etc.). Au cours de ces enquêtes de terrain, les facteurs de risques qui affectent la performance (énergétique et environnementale) des bâtiments sont constatés et recensés. Ces données recensées au cours des enquêtes sont ensuite exploitées pour extraire des connaissances afin d'évaluer les risques de Performance énergétique et les pathologies qui en découlent. Des solutions correctives ou préventives ainsi que des bonnes pratiques sont données en fonction de chaque cas. Les cinq outils et techniques d'évaluation de la conception passive GBRTs (LEED, CASBEE, BEAM plus et GBL-ASGB) ont tous proposé une méthode basée sur le principe de pondération comme norme d'évaluation des bâtiments. Les notations des cinq méthodes de la conception passive ne considèrent pas les connaissances pratiques des acteurs ou experts de la construction dans l'évaluation des risques et ne prévoient pas des solutions correctives ou préventives en cas de non-respect des normes établies. Cet aspect important est pris en compte dans ce chapitre, car il s'agit d'identifier les risques et pathologies, de diagnostiquer et de préconiser des solutions appropriées.

5.6 Mesures climatiques sur le bâtiment test

Dans le but d'estimer le niveau de confort thermique au sein du bâtiment expérimental, nous avons initié une campagne de mesure in situ des paramètres climatiques. Il s'agit des paramètres qui déterminent la condition du microclimat de la zone d'étude (la température, l'humidité relative). Ces mesures in situ restent la meilleure façon d'avoir une approche objective pour étudier le confort thermique au sein du bâtiment. Cette campagne de mesure est considérée comme une validation des informations obtenues dans les enquêtes auprès des usagers et acteurs de la construction. Elle nous permet d'examiner le confort thermique au sein du bâtiment, de déterminer les impacts qu'ils peuvent causer à la qualité d'ambiance (hygrothermique) des espaces intérieurs auxquels ils sont attachés (adapter les espaces extérieurs selon les conditions du climat local).

5.6.1 Protocole et déroulement des mesures

Pour déterminer l'influence de l'espace extérieur sur l'ambiance intérieure, la campagne de mesures a été menée sur le bâtiment test (logement social du type F3B). Les paramètres cités ci-dessus ont fait l'objet de cette campagne de mesures. Les séries de mesures instantanées ont été

effectuées à l'aide de trois capteurs (thermo hygromètres) de marque EasyLog **GFX (Data Logger)**, figure 5.5. Afin de vérifier nos mesures et nous faire une idée sur d'autres paramètres du site nous avons aussi utilisé les données sur la température, l'humidité relative, l'ensoleillement et la vitesse de l'air fournies par la Météorologie nationale.



Figure 5.5: Images des capteurs thermo hygromètres EasyLog GFX (Data Logger), accessoires et batteries de rechanges

Les mesures se sont déroulées sur une durée environ de sept mois allant du 12/02/2016 au 07/10/2016 pendant la période de non d'occupation du bâtiment test afin d'éviter l'influence de la ventilation sur les données mesurées. Les deux données climatiques (température et humidité relative) ont été relevées dans deux pièces du bâtiment test (le salon et la chambre à coucher) au niveau de trois points de mesures. Les capteurs sont placés à une hauteur de 1,50m du sol sur les parois interne et externe du bâtiment test et au centre de chaque pièce. L'objectif est d'évaluer la qualité d'ambiance intérieure (hygrothermique) du logement et de la comparer aux limites du confort définies dans l'analyse bioclimatique (*confère la section 2.2.2.1 du chapitre2*). Les mesures des températures extérieures sont comparées à celles données par la station météorologie Nationale de Sénou (la station la plus proche). Les résultats des mesures permettent de valider les résultats obtenus lors des enquêtes auprès des habitants et acteurs de la construction.

5.6.2 Calibrage des capteurs et exploitation des données

Afin de réduire les erreurs qui peuvent provenir de la variabilité des réponses de chaque capteur, un calibrage des capteurs a été effectué. Ces capteurs ont été programmés à un intervalle de temps de 10 secondes à l'aide du logiciel professionnel **EasyLog GFX** téléchargeable sur l'adresse www.easylogusb.com. Après les trois capteurs utilisés sont ensuite installés pour faire les enregistrements. Au terme des mesures in situ, les données enregistrées sont téléchargées et exportées vers Microsoft Excel, à l'aide du logiciel professionnel, pour le dépouillement et la création des tableaux et des graphes analytiques.

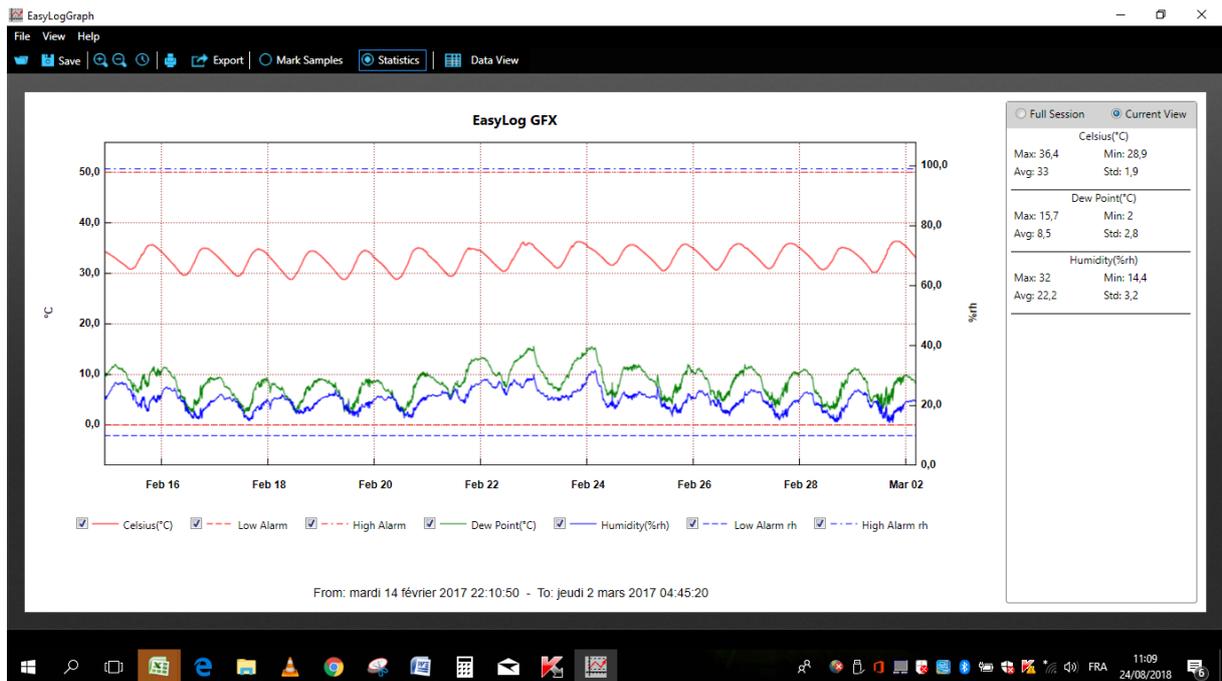


Figure 5.6: l'interface du logiciel EasyLog-GFX

5.6.3 Techniques de déroulement des mesures

Les capteurs **EasyLog GFX (Data Logger)** sont installés aux différents points de mesures dans chacune des pièces pour enregistrer simultanément les températures et les taux d'humidité relative (figures 5.8) de la manière suivante :

- ✓ Dans le salon
 - À l'extérieur à une hauteur de 1,50m au point A sur la façade sud ;
 - À l'intérieur à une hauteur de 1,50m au point B sur la façade sud ;
 - Au centre du salon à 1,50m au de dessus du sol point C.
- ✓ Dans la chambre à coucher
 - À l'extérieur à une hauteur de 1,50m au point A' sur la façade ouest ;
 - À l'intérieur à une hauteur de 1,50m au point B' sur la façade ouest ;
 - Au centre de la chambre à coucher à 1,50m au de dessus du sol point C'.

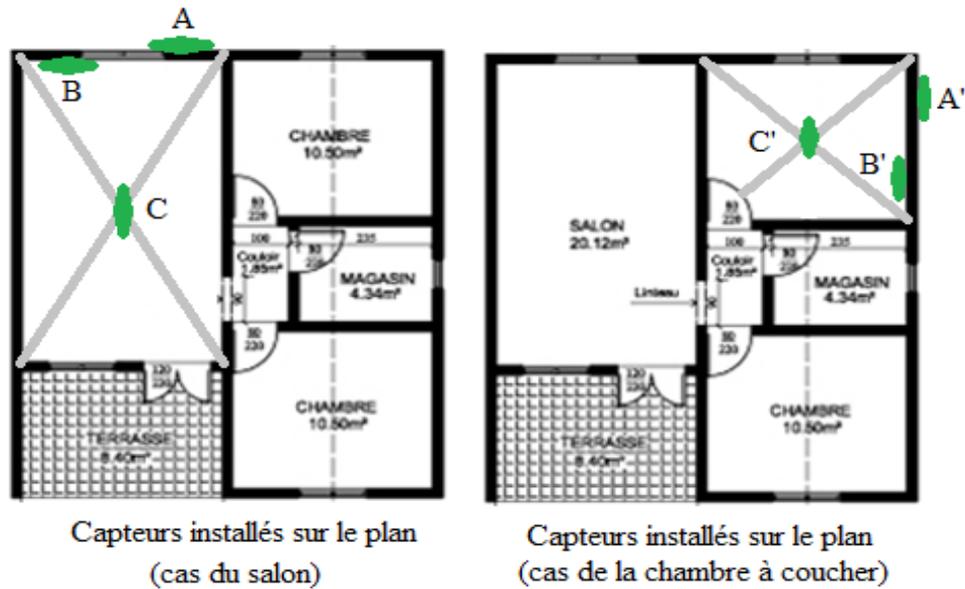


Figure 5.7: Le plan illustratif de l'installation des capteurs



Figure 5.8: illustratif des capteurs installés à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment

Vu le nombre limité des capteurs de mesures, nous avons mené des séquences de mesures durant les sept mois de campagnes de mesures afin d'avoir une idée sur l'ambiance thermique interne des deux pièces expérimentales en fonction des différentes périodes climatiques de Bamako (période chaude et période humide). Selon les données climatiques représentées ci-dessous fournies par la météo nationale, nous avons dégagé les deux périodes (voir le tableau 5.9).

5.6.4 Analyse climatique de la ville de Bamako

L'analyse des données du tableau 5.9 montre que l'ensoleillement moyen de la ville de Bamako est de 247 jours par an et les valeurs extrêmes de températures oscillent entre 15,5°C et 40,8°C sous abri. Les valeurs moyennes des températures sont comprises entre 22,1°C et 35,5°C. La période la plus chaude à Bamako s'étend du mois de février au mois de juin. On observe sur une période de 5 mois (avril-décembre) de l'année des valeurs extrêmes d'humidité relative de l'air

variant de 12% à 98%. La période la plus humide (plus abondante en pluies) s'étend du mois de juillet au mois de septembre avec 221mm en moyenne. Durant cette période, la température maximale moyenne peut atteindre 31,7°C avec une humidité relative moyenne de 97% et une vitesse moyenne de 2,7m/s.

Tableau 5-9: valeurs moyennes des données climatiques (2012-2016) de la ville de Bamako

Grandeurs	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
T°C max	32	34,2	38,4	40,8	37,5	34,4	33,9	31,4	32,8	33,6	34,4	31,3
T°C min	15,7	20,3	22,4	24,3	25,1	23,6	22,2	21,0	21,7	22,1	17,2	15,5
Hr % max	36	40	37	54	76	87	97	98	98	98	83	51
Hr % min	13	12	15	23	34	47	58	62	58	53	23	15
Insol (h)	267,0	281,7	265,0	237,3	240,7	217,8	243,7	211,4	217,7	263,6	286,1	237,2
Vm/s	3,4	3,5	3	2,8	2,9	3	2,2	2,1	1,6	1,6	2,1	3,4

Source : météo nationale Sénou

5.6.5 Influence des données climatiques sur le confort thermique dans le bâtiment expérimental

Le confort thermique est une notion subjective et fonction de paramètres résultant du milieu environnant (température, humidité et vitesse de l'air, température radiante des corps environnants ...). Il dépend aussi de l'individu (le métabolisme, l'activité des occupants, l'âge, le sexe des individus ...). Une approche vériste de l'étude du confort consiste à ne prendre en compte que quelques-uns de ces paramètres parmi lesquels les plus importants. Dans l'analyse qui suit, nous mettons l'accent sur les effets combinés de la température sèche (température extérieure mesurée sous abri météorologique) et de l'humidité relative.

5.6.5.1 Résultats et discussions

5.6.5.1.1 Extraits des données mesurées sur le bâtiment test

Pour étudier le confort thermique du bâtiment test, nous avons effectué des mesures dans le salon et dans la chambre à coucher respectivement durant les périodes suivantes :

- 12/02/2016 au 20/04/2016 (période chaude) et 02/07/2016 au 17/08/2016 (période humide) ;
- 21/04/2016 au 28/06/2016 (période chaude) et 18/08/2016 au 07/10/2016 (période humide).

Les résultats de ces mesures permettent d'avoir une idée sur le microclimat et de faire l'analyse bioclimatique de la zone d'étude.

Tableau 5-10: Valeurs moyennes mesurées dans le salon durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres fermées

Grandeurs	Fev	Mars	Avril	Juil	Août
Te°C	34,1	38	40,6	32,3	31,0
Tif°C	34,6	37,6	39,6	31,1	28,8
Tcf°C	34,8	37,6	39,7	31,3	28,9
T°C max météo	34,2	38,4	40,8	33,9	31,4
Hre %	41	35	51	95	97
Hrif %	39	32	47	92	93
Hrcf %	40	32	47	92	93
H % max météo	40	37	54	97	98

Te°C : Température externe ;

Tif°C : Température interne avec portes et fenêtres fermées ;

Tcf°C : Température au centre avec portes et fenêtres fermées ;

Hre % : Humidité relative externe ;

Hrif % : Humidité relative interne avec portes et fenêtres fermées ;

Hrcf % : Humidité relative au centre avec portes et fenêtres fermées.

Les graphiques représentés ci-dessous illustrent les données du tableau 5.7

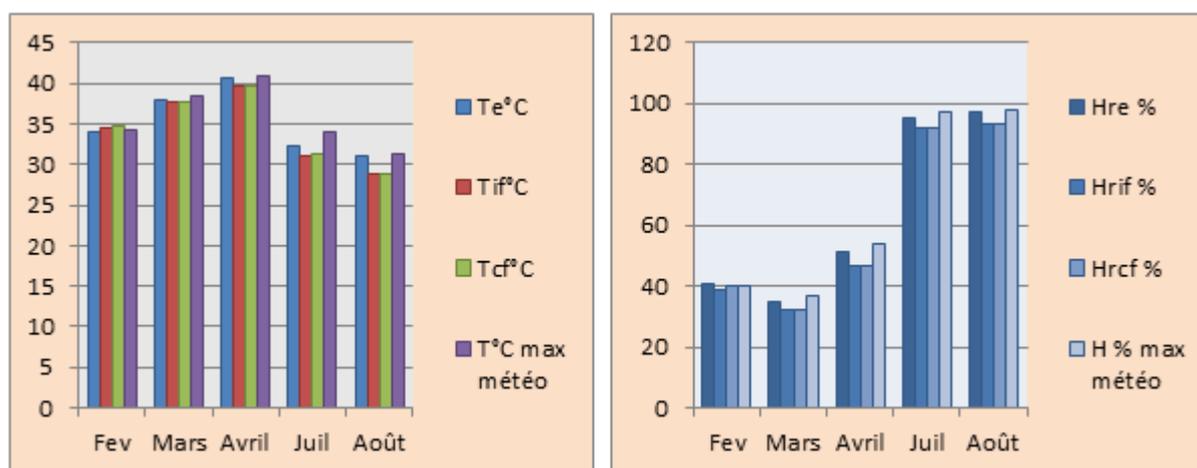


Figure 5.9 : Représentation graphique de températures mesurées dans le salon avec portes et fenêtres fermées

Figure 5.10: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans le salon avec portes et fenêtres fermées

Tableau 5-11: Valeurs moyennes mesurées dans le salon durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres ouvertes

Grandeurs	Avril	Mai	Juin	Août	Sept
Te°C	40,6	36,3	33,4	32,4	31,1
Tio°C	37,2	33,0	28,8	26,2	27,1
Tco°C	37,0	32,8	28,0	31,4	32,8
T°C max météo	40,8	37,5	34,4	33,9	31,4
Hre %	51	74	86	97	97
Hrio %	49	72	84	95	96
Hrco %	49	71	83	93	95
H % max météo	54	76	87	98	98

Te°C : Température externe ;

Tio°C : Température interne avec portes et fenêtres ouvertes ;

Tco°C : Température au centre avec portes et fenêtres ouvertes ;

Hre % : Humidité relative externe ;

Hrio % Humidité relative interne avec portes et fenêtres ouvertes ;

Hrco % : Humidité relative au centre avec portes et fenêtres ouvertes.

Les graphiques représentés ci-dessous illustrent les données du tableau 5.8

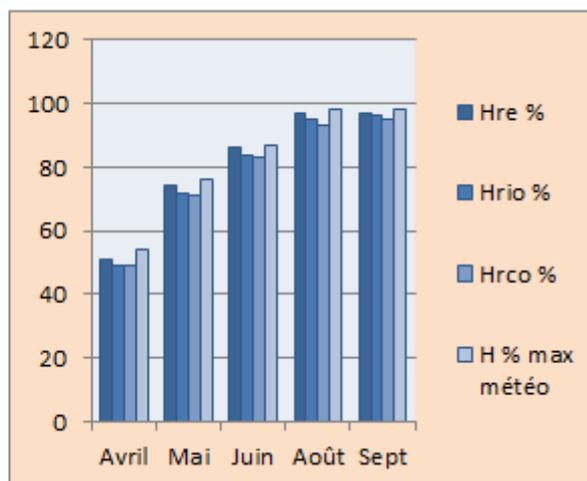
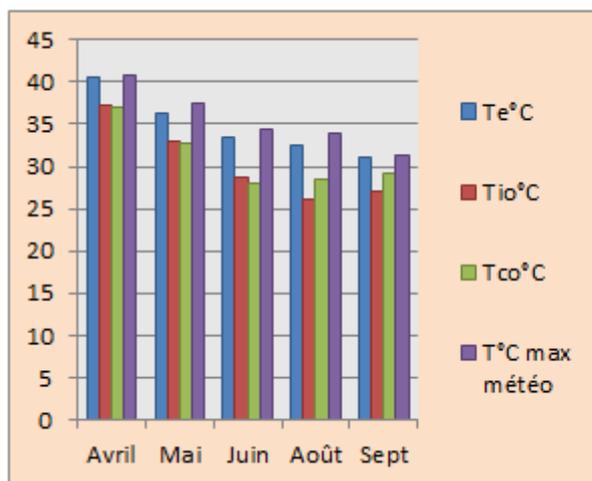


Figure 5.11: Représentation graphique de températures mesurées dans le salon avec portes et fenêtres ouvertes

Figure 5.12: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans le salon avec portes et fenêtres ouvertes

Tableau 5-12 : Valeurs moyennes mesurées dans la chambre à coucher durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres fermées

Grandeurs	Feb	Mars	Avril	Juil	Août
Te°C	36,3	38	40,6	32,3	31,0
Tif°C	34,9	37,8	40,2	31,8	29,2
Tcf°C	34,8	37,7	39,9	32,1	29,0
T°C max météo	34,2	38,4	40,8	33,9	31,4
Hre %	41	35	51	95	97
Hrif %	40	33	46	91	91
Hrcf %	39	33	47	90	91
H % max météo	40	37	54	97	98

Les graphiques représentés ci-dessous illustrent les données du tableau 5.9

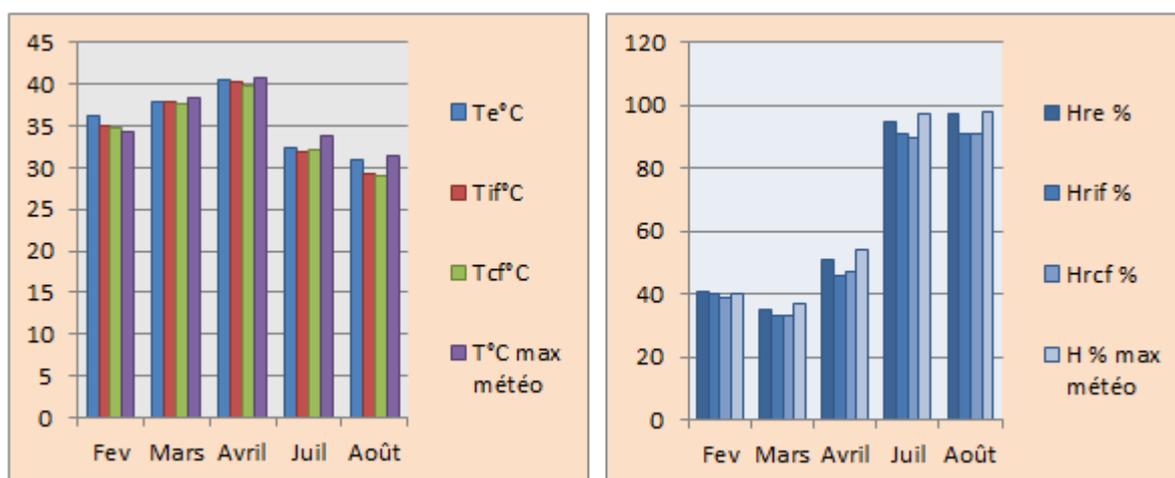


Figure 5.13: Représentation graphique de températures mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres fermées

Figure 5.14: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres fermées

Tableau 5-13 : Les valeurs moyennes mesurées dans la chambre à coucher durant les périodes chaudes et humides avec portes et fenêtres ouvertes

Grandeurs	Avril	Mai	Juin	Août	Sept
Te°C	40,6	36,3	33,4	31,0	32,1
Tio°C	38,6	34,2	31,1	27,3	27,5
Tco°C	38,5	34,1	31,0	27,4	27,6
T°C max météo	40,8	37,5	34,4	33,9	31,4
Hre %	51	74	86	97	97
Hrio %	52	73	83	93	95
Hrco %	51	73	82	92	94
H % max météo	54	76	87	98	98

Les graphiques représentés ci-dessous illustrent les données du tableau 5.10

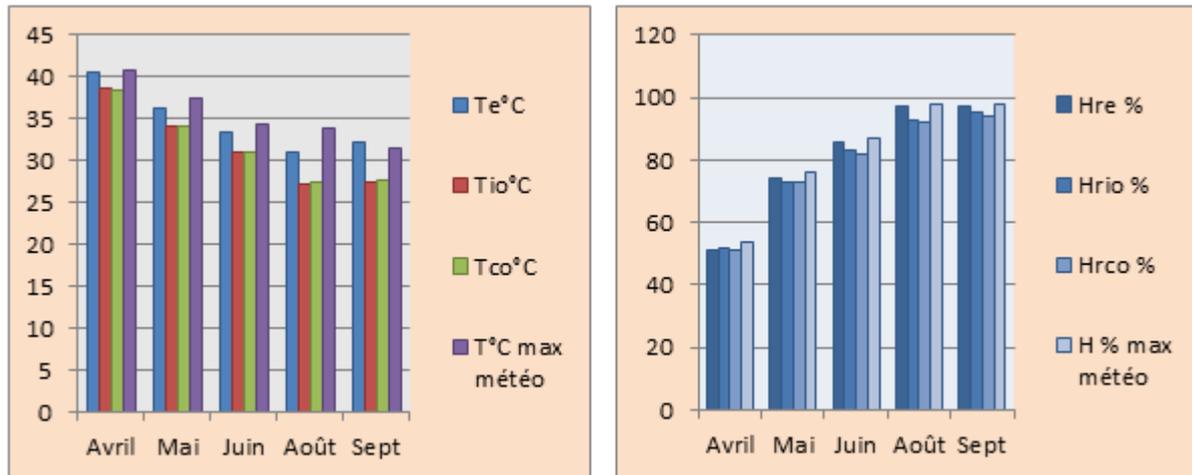


Figure 5.15: Représentation graphique de températures mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres ouvertes

Figure 5.16: Représentation graphique d'humidités relatives climatiques mesurées dans la chambre à coucher avec portes et fenêtres ouvertes

5.6.5.1.2 Extraits des données des degrés-jours de chauffage et de climatisation de la ville de Bamako

En plus des données mesurées et celles fournies par la météo nationale, nous avons aussi utilisé les données sur le degré-jours de chauffage et degré-jours de climatisation de la ville de Bamako. Ces données climatiques ont été extraites à partir de la base de données climatique du logiciel RETScren Expert (voir tableau 5.14). Elles nous permettent d'avoir une idée sur les consommations d'énergies de chauffage d'un bâtiment en période froide et de climatisation en période chaude.

Tableau 5-14: Données des degrés-jours de chauffage et de climatisation de la ville de Bamako

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
D-J de chauf 18°C (°C-j)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D-J de clima 10°C (°C-j)	459	501	648	675	663	558	505	487	483	536	507	462

Source RETScren Expert

D-J de chauf : Degré-jours de chauffage 18°C (°C-j)

D-J de clim : Degré-jours de climatisation 10°C (°C-j)

A partir de ces données, nous obtenons le graphe de la figure V.12

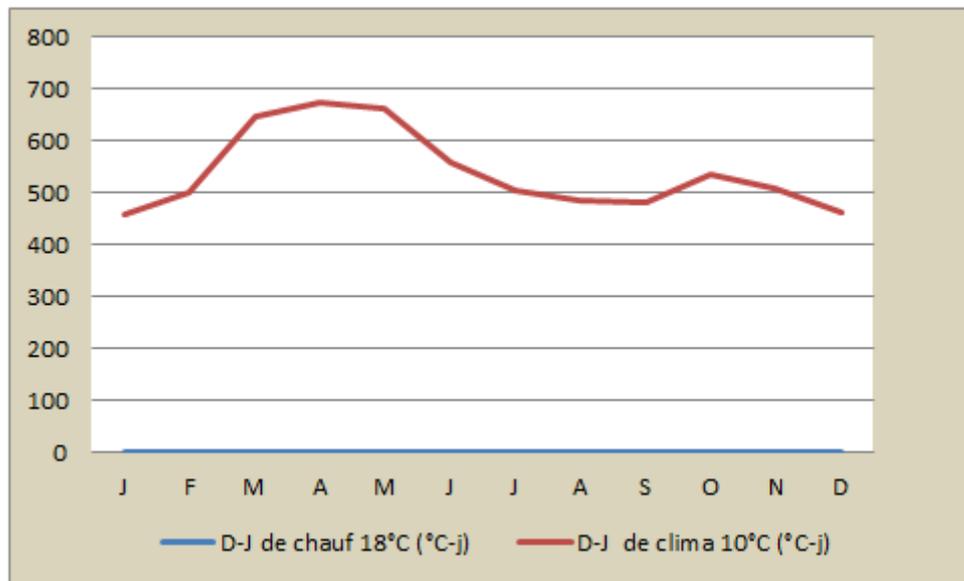


Figure 5.17: Représentation graphique de D-J de chauffage et D-J de climatisation de la ville de Bamako

Interprétations et analyses bioclimatiques

Afin d'estimer le niveau de confort du bâtiment test, nous avons comparé les valeurs moyennes de températures mesurées sur le bâtiment test avec celles mesurées par la météo nationale pendant la même période. L'analyse des données des mesures in situ (tableau 5.7, tableau 5.8, tableau 5.9 et tableau 5.10) montre que :

- ✚ l'écart entre la moyenne des températures maximales fournies par la météo nationale ($T_{max} = 35,7^{\circ}\text{C}$) et celle des températures mesurées à l'extérieur du bâtiment ($T_{e\text{ moy}} = 35,2^{\circ}\text{C}$) est de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$;
- ✚ l'écart entre la moyenne d'humidités relatives maximales fournies par la météo nationale ($H_{rmax} = 73,9\%$) et celle d'humidités relatives mesurées à l'extérieur du bâtiment ($H_{re\text{ moy}} = 72,4\%$) est de l'ordre de $1,5\%$;
- ✚ avec les portes et les fenêtres ouvertes, l'écart entre les températures extérieures ($T_e^{\circ}\text{C}$) et celle mesurée à l'intérieur du bâtiment ($T_{io}^{\circ}\text{C}$) varie de $3,3$ à 5°C (dans le salon) et 2 à $4,6^{\circ}\text{C}$ (dans la chambre à coucher) ;
- ✚ avec portes et fenêtres fermées, l'écart entre les températures intérieures ($T_{if}^{\circ}\text{C}$) et celle mesurée à l'extérieur du bâtiment ($T_e^{\circ}\text{C}$) varie de $0,7$ à $0,35^{\circ}\text{C}$ (dans le salon) et $1,33$ à $0,28^{\circ}\text{C}$ (dans la chambre à coucher) ;
- ✚ avec les portes et les fenêtres ouvertes, l'écart entre les humidités relatives extérieures ($H_{reo} \%$) et celle mesurée à l'intérieur du bâtiment ($H_{rio} \%$) varie de 1 à 2% (dans le salon) et 1 à 4% (dans la chambre à coucher) ;
- ✚ avec portes et fenêtres fermées, l'écart entre les humidités relatives extérieures ($H_{reo} \%$) et celle mesurée à l'intérieur du bâtiment ($H_{rio} \%$) varie de 2 à 4% (dans le salon) et 1 à 6% (dans la chambre à coucher) ;
- ✚ les valeurs moyennes des températures internes $T_{io}^{\circ}\text{C}$ sont comprises entre ($24,3^{\circ}\text{C}$ à $38,6^{\circ}\text{C}$) avec les portes et les fenêtres ouvertes ;

- ✚ les valeurs d'humidités relatives internes H_{rio} sont comprises entre (49% à 95%) avec les portes et les fenêtres ouvertes ;
- ✚ ces valeurs de températures internes excèdent les valeurs limites (21 et 26°C) de la zone de confort bioclimatique ;
- ✚ ces valeurs d'humidités relatives internes excèdent les valeurs limites (20% et 70%) de la zone de confort bioclimatique.
- ✚ Les bâtiments de la ville de Bamako n'ont pas besoin de chauffage tandis leur climatisation est une nécessité sur toute la période de l'année (le graphique de la figure 5.12 renseigne un fort besoin de la climatisation ou refroidissement pendant les mois de **mars, avril et mai** par rapport aux autres mois de l'année).

Selon les périodes, ces écarts sont présentés ci-dessous :

- Pendant les périodes de la journée (de 08H à 19H) :
 - l'écart entre la température externe et la température interne relativement au salon et à la chambre à coucher est respectivement de l'ordre (3,3 à 5°C) et (2 à 4,6°C) ;
 - l'écart entre l'humidité relative externe et l'humidité relative interne relativement au salon et la chambre à coucher est respectivement de l'ordre (1 à 2% et (1 à 4%) ;
- Pendant les périodes de la nuit (de 20H à 07H) :
 - l'écart entre la température interne et la température externe relativement au salon et la chambre à coucher est respectivement de l'ordre (0,7 à 0,35°C) et (1,33 à 0,28°C) ;
 - l'écart entre l'humidité relative externe et l'humidité relative interne relativement au salon et la chambre à coucher est respectivement de l'ordre (2 à 4% et (1 à 6%).

Les résultats renseignent qu'à la même période, les relevés de la météorologie (les valeurs moyennes des températures et d'humidités relatives) sont très proches à celles mesurées à l'extérieur du bâtiment test. Les valeurs moyennes des températures et d'humidités mesurées au niveau du bâtiment test varient respectivement (entre 24,3°C et 37,2°C) et (entre 49% et 86%). Ces résultats correspondent à la zone 10 sur le diagramme bioclimatique (figure 2.5) [Givoni B, 1992 et Francisco M A et al., 2015]. L'analyse de ces résultats révèle que :

- la température est presque uniforme dans les pièces du bâtiment (même valeur mesurée au niveau des deux points de mesures à l'intérieur des pièces) ;
- les mesures externes des températures excèdent de quelques degrés Celsius celles mesurées à l'intérieur durant les périodes de la journée (08H à 19H) tandis le phénomène s'inverse durant les périodes de la nuit (les mesures internes des températures sont supérieures à celles mesurées à l'extérieur).
- Les mesures internes d'humidités relatives des périodes chaudes sont faibles.

5.6.6 Propositions de solutions pour l'amélioration du confort thermique au sein du bâtiment

Le bâtiment expérimental est un logement du type F3B construit en dur. Son toit est en dalle de béton, les murs sont en briques creuses classiques (parpaing creux béton) et crépis en couche de 1,5 cm de ciment (pas d'isolation). Les portes et des fenêtres sont métalliques en lamelles fixes et non étanches (pas de vitrage).

Le faible écart entre les températures externes et internes s'explique par l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment (dalle en béton et les murs en parpaing creux). Cette inertie permet par ses propriétés de stocker le flux thermique durant la journée et de les restituer plus tard la nuit. Durant les périodes de la nuit, le niveau élevé de température interne s'explique par la chaleur restituée. Cela surchauffe l'intérieur des pièces et crée de l'inconfort thermique.

Pour amortir ce phénomène, il est nécessaire d'appliquer certaines pratiques pour améliorer la performance énergétique et le confort thermique à l'intérieur. Ces applications sont les suivantes :

- adoption du système de ventilation naturelle à l'intérieur du bâtiment durant les nuits. L'air ventilé favorise la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur ;
- utilisation de brasseurs d'air (ventilation mécanique) qui permet d'accentuer le mouvement de l'air intérieur et d'intensifier les échanges convectifs. Cette stratégie permet ainsi de réduire considérablement les pics de chaleur dans le bâtiment. Dans les bâtiments non climatisés, elle contribue à amortir les fortes fluctuations de température extérieure et à maintenir la température intérieure dans la zone de confort de manière à limiter les surchauffes.
- Renforcement de l'isolation interne avec les plaques de plâtre, l'état des surfaces d'échanges entre l'air et les matériaux constituant l'enveloppe ;
- adoption de la stratégie de refroidissement par évaporation. Il s'agit d'atteindre le confort en réduisant la température par l'évaporation de l'eau tout en augmentant simultanément l'humidité relative. L'humidification peut être obtenue en utilisant la végétation extérieure, la couverture végétale du toit pour le refroidissement par évaporation ; l'arrosage du toit pour le refroidissement par évaporation [Francisco M A et al., 2015] ;
- amélioration de l'enveloppe de la toiture par l'isolation interne afin d'amortir la température radiante (car le toit est la partie la plus exposée aux rayonnements solaires) ;
- utilisation des sources d'énergie renouvelable pour alimenter le système de refroidissement installé pendant les moments de forte chaleur. Cela permet donc d'assurer une économie d'énergie et de préserver l'environnement ;
- protéger le bâtiment contre le rayonnement solaire soit par des arbres à feuilles caduques, des auvents, et des rideaux, soit par des masques divers.

Pour ne pas être, tenus de rénover toujours les logements sociaux afin d'assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments, le processus de réalisation des logements doit tenir compte des techniques et matériaux de construction que nos ancêtres utilisaient. Il s'agit d'une part d'adapter les bâtiments d'aujourd'hui à l'architecture traditionnelle et d'autre part d'utiliser nos ressources naturelles abondantes (les matériaux locaux de construction, et le potentiel d'ensoleillement du pays)

Dans cette optique, les maîtres d'œuvres et maîtres d'ouvrages des futurs projets de construction des logements sociaux gagneraient à s'orienter vers :

- les matériaux locaux (le banco ou l'argile) dans la construction au détriment des matériaux modernes (les briques en ciment, et le béton);

- les énergies renouvelables (les panneaux photovoltaïques, et les capteurs solaires) pour assurer l'alimentation des logements en électricité et en eau potable.

Les techniques utilisant les ressources naturelles de construction offrent des avantages sur le plan économique et environnemental. Elles permettent d'une part de diminuer le risque de consommation excessive d'énergie générée par la climatisation pour le confort thermique et énergétique du secteur résidentiel et d'autre part de valoriser le patrimoine culturel et les mains-d'œuvre locales du Mali.

Conclusion

Les bâtiments bioclimatiques des zones tropicales sont au centre de l'étude de ce chapitre. Une méthodologie a été proposée en intégrant l'approche du retour d'expérience issue des investigations de terrain. Ces investigations de terrain sont menées sous forme d'enquêtes auprès des habitants, d'interviews des acteurs du secteur des bâtiments, d'observations et des prises de photos en vue de recueillir des informations et des connaissances pertinentes sur les techniques de construction. L'étude de cas a porté sur les logements sociaux du type F3B à Bamako. Elle a permis de mettre en évidence les informations indicatives sur les facteurs de risques qui affectent la performance énergétique, les difficultés que les acteurs peuvent rencontrer au cours de la réalisation des projets de construction et de rénovation. Les réponses adéquates à ces difficultés sont hiérarchisées et proposées pour le développement des actions et des services efficaces des constructions durables. En somme, une meilleure gestion des risques dans les processus de retour d'expérience permet d'analyser concrètement des situations de construction en lien avec les réalités socio-économiques, technologiques et énergétiques du terrain. Cette analyse constitue un levier d'action pour des processus d'amélioration continue via le partage des connaissances et la diffusion des meilleures pratiques.

Conclusion générale et perspectives

Notre travail de recherche au cours de ces trois dernières années s'est inscrit dans le cadre d'une thèse de cotutelle entre l'Institut Polytechnique de Toulouse et l'Université des Sciences Techniques et Technologies de Bamako. Dans cette thèse, notre objectif principal est d'évaluer les risques et facteurs de risque qui affectent la performance des bâtiments. Nous avons structuré le mémoire en cinq chapitres.

Le chapitre 1 constitue la première section de l'état de l'art dans laquelle nous avons passé en revue les notions de durabilité des bâtiments dans le contexte aéroportuaire. Nous avons ainsi décrit les éléments descriptifs sur les phénomènes sonores à proximité des aéroports, les techniques d'évaluation et de gestion de bruit des avions (la perception des phénomènes sonores, les indicateurs de gênes ou de nuisances sonores, les descripteurs énergétiques intégrés, et les descripteurs événementiels). Également, le concept de l'acoustique du bâtiment fut décrit (les conditions du confort acoustique, la transmission acoustique par la façade, le principe de masse, le principe de double paroi et le principe d'étanchéité) ainsi que l'indice d'affaiblissement acoustique du bâtiment avec les portes et les fenêtres fermées à l'égard du bruit des avions.

Le chapitre 2 correspond à la seconde section de l'état de l'art qui présente de façon détaillée le contexte énergétique du Mali. Aussi un regard sur le concept de l'architecture bioclimatique utilisant des techniques éprouvées en étroites relations avec le climat a été développé à travers une description détaillée du principe bioclimatique, des notions d'orientation, d'infiltration, d'étanchéité des ouvertures, d'inertie thermique, d'isolation de l'enveloppe du bâtiment, du climat et de diagramme bioclimatique. Enfin, nous avons terminé ce chapitre par un aperçu général sur l'architecture et l'urbanisation au Mali.

Le chapitre 3 détaille la méthodologie adoptée pour l'évaluation des risques qui affectent la performance des bâtiments. Nous avons, tout d'abord, développé les notions de risques, de retour d'expérience (REX). Quelques aperçus des éléments conceptuels relatifs aux risques (événement, état, mesure et incertitude) et la classification de REX (correctif, préventif et positif) ont été définis et détaillés. Dans cette partie, l'accent est mis sur l'absence de description et de caractérisation des connaissances pratiques (maîtrise du domaine) dans les évaluations des risques. L'objectif poursuivi est de montrer la nécessité de l'application ou la prise en compte des idées et réflexions sur la force caractérisant la solidité des connaissances pratiques (maîtrise du domaine) des acteurs et experts de la construction dans le processus d'évaluation des facteurs de risque susceptible d'influencer les niveaux de performance. Cette méthodologie est appliquée sur les études de cas dans les deux chapitres qui suivent.

Le chapitre 4 repose sur la première étude de cas. Des visites de chantiers et de zones habitées ont été effectuées pour identifier des facteurs de risque qui affectent la performance acoustique des bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako. Des investigations sous forme d'enquête sont menées pour identifier, d'une part les besoins et comportements des habitants et d'autre part, les techniques et pratiques des acteurs de constructions. Un bâtiment de la zone aéroportuaire de Bamako est choisi pour mener les études expérimentales. Les évaluations de risques qui affectent la performance acoustique ont été menées selon les principes de la méthodologie présentée au niveau du chapitre 3. Les deux groupes d'analystes ont été constitués. L'équipe qui a réalisé le bâtiment test représente le premier groupe d'analyse. Le second groupe d'analystes est constitué des techniciens qui n'ont pas participé aux travaux de réalisation du bâtiment. Les évaluations ont concerné les risques associés aux infiltrations des bruits des avions dans le bâtiment, les risques liés au manque de l'isolation acoustique et l'existence de ponts phoniques sur le bâtiment dus aux types d'ouvertures utilisés (les portes et fenêtres en persiennes métalliques). L'analyse et interprétation des résultats d'évaluations montrent que les facteurs de risque étudiés diminuent la performance acoustique du bâtiment. Ces informations sont capitalisées et hiérarchisées. En retour d'expérience, les deux groupes d'analystes ont préconisé des solutions correctives pour les travaux de rénovation et de futurs projets de construction. Aussi, des mesures in situ des niveaux de pression acoustiques ont été menées à l'aide des capteurs (sonomètres Voltcraft). Les résultats issus de ces mesures montrent que :

- les niveaux de pression acoustique mesurés à l'intérieur du bâtiment sont proches à ceux de l'extérieur dans le cas où les portes et fenêtres sont fermées (les éléments de façades atténuent très peu les niveaux de pression acoustique) ;
- le trafic de l'aéroport de Bamako s'intensifie généralement durant les périodes matinales (03 heures et 07 heures) et les soirées (19 heures et 23 heures) ;
- les valeurs de l'indicateur L_{AeqD} qui oscillent entre 67,5 et 65,6 dB(A) avec les portes et fenêtres ouvertes et entre 66,9 et 64,0 dB(A) avec les portes et fenêtres fermées, dépassent très largement 55 dB(A) ;
- le seuil de sensation d'une forte gêne à l'intérieur des habitations, les valeurs l'indicateur L_{AeqN} (varient entre 62,4 et 60,5 dB(A) avec les portes et fenêtres ouvertes et entre 61,1 et 60,0 dB(A) avec les portes et fenêtres fermées) sont supérieures à 40 dB(A) le seuil de forte perturbation du sommeil [Slama et al., 2008] ;
- le niveau L_{DN} (compris entre 70,01 et 68.1dB (A) avec les portes et fenêtres ouvertes et entre 68,97 et 67,25 dB(A) avec les portes et fenêtres fermées) excède très nettement le niveau de la limite supérieure (52,6 dB(A)) pour les zones résidentielles strictement urbaines (norme NBR 10151) ;
- le niveau de bruit représentatif au passage des avions (le niveau d'exposition au bruit SEL) est entre 100 à 90 dB(A) durant la journée et 80 à 90 dB(A) durant la nuit à l'extérieur des habitations, l'atténuation de l'intensité du niveau sonore des parois (l'indice d'affaiblissement) est faible de l'ordre de 10,7 et 13,9 dB(A) et de l'ordre de 9,6 et 13,7 dB(A), respectivement le 23/02/2017 et le 04/03/2017.

Ces résultats montrent que les nuisances sonores liées aux survols des avions sont susceptibles de diminuer le confort acoustique et la qualité de vie des habitants de la zone l'aéroportuaire de Bamako. Les parois du bâtiment test n'ont pas de performance acoustique adéquate pour un bâtiment aéroportuaire. Des recommandations de bonne gestion de bruit à proximité de

l'aéroport et des solutions de renforcement de la performance acoustique du bâtiment ont été préconisées.

Le chapitre 5 est basé sur la seconde étude de cas. Des évaluations des facteurs de risques qui affectent la performance thermique des logements sociaux de type F3B dans le contexte bioclimatique ont été effectuées. Ces évaluations sont basées sur les principes de la méthodologie présentée au niveau du chapitre 3. Deux groupes d'analystes d'acteurs de construction ont été constitués. Le groupe 1 est constitué de techniciens qui ont participé à la réalisation des travaux de construction des logements sociaux et ceux du groupe 2 n'ont pas participé aux travaux de construction. Les discussions de la méthode d'évaluation de risque ont porté sur les facteurs de risques identifiés lors des visites de terrain et pouvant affecter la performance thermique du bâtiment. Il s'agit du cas d'orientation de certains logements, des types de fenêtres et portes utilisées dans les ouvertures, du cas d'isolation de l'enveloppe du bâtiment et du cas des dimensions des parcelles des logements sociaux de type F3B. Les analyses des informations fournies par les groupes d'experts lors de ces processus d'évaluation révèlent que les facteurs cités ci-dessus ont des influences négatives sur la performance thermique du bâtiment et, par conséquent, sur le confort des habitants. Les informations et les connaissances fournies par les groupes d'analystes sur les risques ont été capitalisées et hiérarchisées. En retour d'expérience, des solutions correctives et des pratiques préventives sont préconisées par les groupes d'analystes dans le cadre des travaux de rénovation et futurs projets de construction des logements sociaux. L'étude de cas a porté sur un bâtiment du logement social de type F3B à Bamako. Sur le bâtiment test, des mesures in situ des paramètres climatiques (température et humidité relative) ont été effectuées à l'aide des capteurs (Easy GFD). Les résultats des mesures in situ des paramètres climatiques montrent que les températures moyennes et les humidités relatives sont respectivement comprises entre 24,3 et 38,6°C et 49-95%. Des résultats qui correspondent à la zone 10 sur le diagramme bioclimatique (figure 2.5) [Givoni, B., 1992 et Francisco, M.A., et al., 2015]. Aussi l'écart entre les températures externes et internes est de l'ordre de quelques degrés Celsius (0,4 à 2,2°C) et (3,3 à 5°C) respectivement dans le salon et dans la chambre à coucher durant les périodes du jour (08 H à 19 H). Cette tendance s'inverse progressivement durant les périodes de la nuit (20H à 07H), des températures internes sont légèrement supérieures à celles mesurées à l'extérieur (avec des écarts variant de (0,7 à 0,35°C) et (1,33 à 0,28°C) respectivement dans le salon et dans la chambre à coucher). La température est presque uniforme dans le volume de la pièce test. Les mesures externes d'humidité relative sont supérieures à celles mesurées à l'intérieur durant une longue période de la journée. Vu ces résultats des stratégies bioclimatiques ont été préconisées.

En perspectives, nous proposons comme pistes de recherches futures de mener une étude :

- d'interaction entre le confort acoustique et les autres paramètres de confort (thermique, et éclairage) ;
- de mesures d'isolation des façades des bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako afin de voir l'impact réel des différents matériaux de construction sur l'atténuation des bruits extérieurs et la perception des usagers ;

- de confort thermique et acoustique selon le comportement des habitants dans l'usage des bâtiments en zone aéroportuaire ;
- des risques de pollution atmosphérique des zones d'habitation à proximité de l'aéroport de Bamako ;
- de performance thermique des bâtiments construits avec des matériaux locaux ou bio-sourcés (le banco ou l'argile, la pierre et les pailles) ;
- quantitative du potentiel d'énergie solaire pour la satisfaction du besoin de climatisation des bâtiments en zone de climat tropical chaud et sec ;
- comparative sur le plan du confort thermique et de l'efficacité énergétique entre les bâtiments construits avec les blocs de ciment et ceux réalisés avec les matériaux locaux ;
- d'amélioration des résultats de recherche par des simulations thermiques et acoustiques des bâtiments, en vue d'identifier des actions efficaces et des mesures efficaces pour la pérennité de l'efficacité énergétique et acoustique dans le bâtiment, ainsi que pour le développement durable ;
- de modélisations, à l'aide de logiciels informatiques récents, afin de calculer les différents paramètres qui influent sur l'orientation du bâtiment, d'estimer l'orientation optimale et favorable des bâtiments pour le climat tropical chaud et sec.

Annexe 1

Fiches d'enquêtes In-situ auprès des habitants à proximité de l'aéroport de Bamako

Dans le cadre de nos recherches doctorales sur *la performance acoustique des bâtiments à proximité de l'aéroport de Bamako*, nous sollicitons votre aide pour répondre à nos questions de recherches ci-dessous.

Merci d'avance pour votre coopération.

Identification de l'usager (anonymat garanti)

Nom et Prénoms du propriétaire du logement :

.....

Adresses :

1. *Quel est le type de votre logement ?*

- individuel

- collectif

- autres Si autres précisé le type de logement.....

2. *La construction de votre logement a-t-elle précédé celle de l'aéroport ?*

Oui

Non

2.1. *Si oui, comment qualifierez-vous la performance acoustique de votre maison ?*

Faible

Moyenne

Forte

Avez-vous envisagé des travaux de rénovation (pour performance faible ou moyenne) ?

Argumentez votre réponse ?

.....
.....
.....
.....

2.2 *Sinon, avez-vous tenu compte des performances acoustiques dans la construction ?*

Oui

Non

Argumentez votre réponse ?

.....
.....
.....
.....

3. *Selon vous, quel est le niveau de la fréquence du trafic des avions autour de votre maison?*

Élevé Moyen Faible

4. Que diriez-vous de votre environnement sonore dû à la présence d'avions ?

4.1. A l'intérieur du bâtiment

Matin : Calme Bruyant Très bruyant

Après-midi : Calme Bruyant Très bruyant

Nuit : Calme Bruyant Très bruyant

4.2. A l'extérieur du bâtiment

Matin : Calme Bruyant Très bruyant

Après-midi : Calme Bruyant Très bruyant

Nuit : Calme Bruyant Très bruyant

5. Que diriez-vous de votre sensibilité au bruit des avions ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond au mieux à votre sensibilité au bruit des avions.

Très sensible	Moins sensible	sensible	Pas du tout sensible
---------------	----------------	----------	----------------------

6. Selon vous vivre à proximité de l'aéroport est-il synonyme de danger ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre appréciation du danger.

Extrêmement dangereux	Moins dangereux	dangereux	Pas du tout dangereux
-----------------------	-----------------	-----------	-----------------------

7. Les ouvertures (portes et fenêtres) de votre logement sont-elles équipées de vitrage ?

Pas du tout sensible

Oui Non Ne sait pas

Si oui ; lequel des cas ci-dessous

Double vitrage Survitrage simple vitrage Ne sait pas.

8. Quels sont les méfaits des bruits sur la qualité de cadre de vie ?

.....
.....
.....

9. En dehors des confort acoustiques, plaignez-vous d'autres impacts des bruits des avions ?

.....
.....
.....
.....

Merci de votre participation.

Annexe 2

Questionnaire d'interview adressé aux acteurs de construction

Dans le cadre de nos recherches doctorales sur le thème « *Retour d'expérience pour l'évaluation de risques dans les bâtiments performants en zone aéroportuaire* », nous sollicitons votre aide pour répondre à nos questions de recherches ci-dessous. Merci d'avance pour votre coopération.

Identification

Nom : Prénoms :
Nom de l'entreprise :
Adresses : Contact:

1. *Avez-vous réalisé des constructions à proximité de l'aéroport de Bamako ?*

Oui Non

2. *Existe des réglementations acoustiques pour construire à proximité de l'aéroport de Bamako ?*

Oui Non

Sinon, quelle autre réglementation existe ?

<i>thermiques</i>	<i>Interdictions</i>	<i>Autres</i>
-------------------	----------------------	---------------

Sinon, quelles dispositions prenez-vous pour assurer la performance acoustique des bâtiments de la zone ?

.....
.....
.....
.....
.....

3. *Les matériaux de construction pour performance acoustique existent-ils sur le marché local ?*

Oui Non

Sinon, comment faites-vous pour trouver ou remplacer ces matériaux ?

.....
.....
.....
.....
.....

4. Avez-vous d'acousticien dans votre équipe de construction ?

Oui Non

Sinon, comment faire pour gérer les problèmes de confort acoustique sur les constructions ?

.....
.....
.....
.....

5. Pour le confort acoustique, les façades des bâtiments de la zone aéroportuaire sont-ils isolés ?

Oui Non

Si oui, quels sont les éléments de façades concernés ?

.....
.....
.....

Décrire brièvement les matériaux isolants utilisés

.....
.....
.....

Sinon, pourquoi ?

.....
.....
.....

Merci de votre participation.

Annexe 3

Fiches d'enquêtes in situ auprès des propriétaires des logements sociaux

Dans le cadre de nos recherches doctorales sur le thème « *Retour d'expérience pour l'évaluation de risques dans les bâtiments performants en zone aéroportuaire* », nous sollicitons votre aide pour répondre à nos questions de recherches ci-dessous. Merci d'avance pour votre coopération.

Identification de l'utilisateur (anonymat garanti)

Nom et Prénoms du propriétaire du logement :

.....

Adresses :

1. De quel type de logement social avez-vous bénéficié ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond à votre réponse.

F3A

F3B

2. Depuis combien d'années habitez-vous dans ce logement ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond à votre réponse.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10+
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----

3. À la réception, votre logement avait-il de système de climatisation ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond à votre réponse.

Oui

Non

Si oui, quelles sont les pièces climatisées ?

Chambres

Salle de séjour

Toilette

Toutes

Si non, quelles solutions avez-vous envisagées pour le confort thermique ?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

4. **À quels moments de la journée l'inconfort thermique est beaucoup ressenti au sein du logement ?**

Jour (06H-17H)	Soir (17H-22H)	Nuit (22H-06H)
----------------	----------------	----------------

5. **En dehors du confort thermique, avez-vous faire des travaux de rénovation aussi pour d'autres raisons ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond à votre réponse.

Oui Non

Si oui, quelles sont les raisons de ces travaux ?

- Raison esthétique
- Augmentation de la capacité d'accueil
- Autres

Justifier

.....
.....
.....
.....
.....

6. **De façon globale, quel est le niveau de satisfaction du confort thermique de votre logement avant et après rénovation ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir à la réponse qui correspond à votre réponse.

Très satisfait	Satisfait	Insatisfait	Très insatisfait
----------------	-----------	-------------	------------------

7. **Que diriez-vous, aux décideurs pour améliorer les futurs projets de logements sociaux?**

.....
.....
.....
.....

Merci de votre participation.

Références bibliographiques

- [Abeeku B H, 2010] Abeeku Brew-Hammond., 2010. Energy access in Africa: Challenges ahead, *Energy Policy* 38; 2291-2301.
- [ACNU, 2006] ACNUSA. Rapport d'activité. 2006
- [Airbus, 2012] Airbus, 2012. Global Market Forecasts 2011-2031.
- [Airbus, 2014] Airbus, 2014. Global Market Forecast 2015-2034. Available online at www.airbus.com/company/market/forecast/, Accessed date: 13 March 2016.
- [Allard et al., 2013] Allard, I., Olofsson, T., Hassan, O.A.B., 2013. Methods for energy analysis of residential buildings in Nordic countries. *Renew. Sustain Energy Rev.* 22, 306-318.
- [Al-Obaidi KM et al., 2014] Al-Obaidi, K.M., Ismail, M., Abdul Rahman, A.M., 2014. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in South East Asia: a literature review. *Front. Archit. Res.* 3, 283-297.
- [Amgoud L et Prade H, 2009] Using arguments for making and explaining decisions, *Artificial Intelligence* 173 (2009) 413–436
- [Arntzen et Simons, 2014] Arntzen, M., Simons, D.G., 2014. Modeling and synthesis of aircraft flyover noise. *Appl. Acoust.* 84, 99-106 (October).
- [ASHRAE, 2013] ASHRAE., 2013. ASHRAE hand book fundamentals: Si edition: fundamentals: Si edition, ASHRAE hand book fundamentals systems-international metric system. Amer Society of Heating.
- [Aven et Renn, 2009] Aven, T., Renn, O., 2009. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. *J. Risk Res.* 12 (1), 1-11.
- [Aven et Renn, 2010] Aven, T., Renn, O., 2010. *Risk Management and Governance: Concepts, Guidelines and Applications*. Springer, Berlin.
- [Aven T, 2013] Aven, T., 2013. Practical implications of the new risk perspectives. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 115, 136–145 (July).
- [Aven T et al., 2014] Aven, T., Baraldi, P., Flage, R., Zio, E., 2014. *Uncertainties in Risk Assessments*. Wiley, Chichester.
- [Aven et Zio, 2011] Aven, T; Zio, E., 2011. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision-making. *Reliability Engineering and System Safety* 96, 64–74.
- [Badescu et Staicovici, 2006] Badescu V, Staicovici M D., 2006. Renewable energy for passive house heating: model of the active solar heating system. *Energy Build*; 38 (2):129-41.
- [BAMAKO / Sénou (GABS), 2017] « BAMAKO / Sénou (GABS) » [archive], sur ais-asecna.org (consulté le 9 septembre 2017).
- [Barbot B, 2008] Barbot Benoit., 2008. Caractérisation perceptive des bruits d'avions : Influence de leur qualité sonore confrontée à la répétition des événements sur l'expression de la gêne fonctionnelle. PhD Thesis. Université de Cergy-Pontoise (May).
- [Bay J H, 2010] Bay J H. (2010) Towards a fourth ecology: social and environmental sustainability with architecture and urban design. *J Green Build*; 5 (4): 176–97.
- [Benhamou et Bennouna, 2013] Benhamou, B., Bennouna, A., 2013. Energy performances of a passive building in Marrakech: parametric study. *Energy Proc.* 42, 624- 632.
- [Bentes et Slama, 2011] Bentes, F.M., Slama, J.G., (2011). Sensitivity analysis of airport noise using computer simulation. *J. Aerosp. Technol. Manag.* 3 (3), 295-300.
- [Béler, 2008] Béler, C., 2008. Modélisation générique d'un retour d'expérience cognitif. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

- [**Bjerga T et Aven T, 2015**] Bjerga, Torbjørn, Aven, Terje, February 2015. Adaptive risk management using new risk perspectives e an example from the oil and gas industry. Reliab. Eng. Syst. Saf. Pages 134, 75-82.
- [**Boegli et al., 2006**] Boegli, H., Balmer, M., Schaffner, M.H., 2006. Évaluation des risques d'exposition au bruit - la perspective suisse. Procédure d'Euronoise, Dans Finlande; 2006.
- [**Boeing, 2014**] Boeing., 2014. Airports with Noise and Emissions Restrictions. Retrieved February 11, 2014, from Boeing. <http://www.boeing.com/boeing/commercial/noise/list.page>.
- [**Boukadoum A, 2012**] Mme Boukadoum Amina., 2012. Evaluation du confort acoustique dans les Salles de cours des établissements scolaires (Cas des lycées de Constantine), Thèse de l'Université Mentouri de Constantine.
- [**Brown & Dekay, 2001**] Brown, G.Z., & Dekay, M. (2001) Sun, wind, and light: architectural design strategies, John wiley & sons, New York, 378p.
- [**Brutel-Vuilmet C, 2005**] Brutel-Vuilmet, C., (2005) Prise en compte de l'angle d'incidence dans la caractérisation en laboratoire de la transmission acoustique des éléments de façade. PhD Thesis. Institut national des sciences appliquées de Lyon (novembre).
- [**Butti K et Perlin J, 1980**] Butti K., Perlin J. (1980) A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology. New York: Cheshire Books.
- [**Callejon-Ferre A J et al., 2001**] Callejon-Ferre A J, Manzano-Agugliaro F, Diaz-Perez M, Carreno-Sanchez J. (2011) Improving the climate safety of workers in Almeria-type green houses in Spain by predicting the periods when they are most likely to suffer thermal stress. ApplErgon; 42 (2): 391–6.
- [**Camara et al., 2017**] Camara T, Kamsu-Foguem B, Diourte B, Maiga A. I, Habbadi H, Management and assessment of performance risks for bioclimatic buildings, Journal of Cleaner Production 147 (2017) 654-667 (January).
- [**Camara et al., 2018**] Camara T, Kamsu-Foguem B, Diourte B, Faye J.P, Hamadoun O, Management of acoustic risks for buildings near airports ? Ecological Informatics 44 (2018) 43–56 (March)
- [**CE, 2002**] Conseil Européen. Directive 2002/42/CE du Parlement Européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement. Journal Officiel des Communautés Européennes, n°189 du 18 juillet 2002, 12 p.
- [**Chahwane L, 2012**] Layal Chahwane, 2012. Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, PhD, Université de Grenoble, 4 May 2012.
- [**Chen et al., 2015**] Chen, Xi, Yang, Hongxing, Lu, Lin, October 2015. A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. Renew. Sustain. Energy Rev. Pages 50, 1425-1436.
- [**Clermont et al., 2007**] Clermont, P., Béler, C., Rakoto, H., Desforges, X. et Geneste, L. (2007) Capitalisation et exploitation du retour d'expérience : un raisonnement à partir de cas étendu aux systèmes sociotechniques. Raisonnement à partir de cas, conception et configuration de produit, volume 1: pages 249-277.
- [**Coch H, 1998**] Coch H (1998) Bioclimatisme in vernacular architecture. Renew Sustain Energy Rev; 2(1): 67-87.
- [**Cook J, 1983**] Cook J. (1983) The future of solar architecture: a synthesis for the urban tropics. In: Lim B, editor. Solar energy applications in the tropics. Netherlands: Springer. p. 227-56.
- [**Courgey & Oliva, 2006**] Courgey, S., & Oliva, J-P., 2006. La conception bioclimatique, terre vivante (Ed.), Mens, 239p.

[Davidson et Sokona, 2002] Davidson, O., Sokona, Y., 2002. A new sustainable energy path for African development: think bigger act faster. Energy and Development Research Centre (EDRC), Cape Town, South Africa and Environmental Development Action in the Third World (ENDA), Dakar, Senegal.

[de Villermay D, 1980] de Villermay, D. (1980) Renaissance of bioclimatic architecture. *Revue de l'infirmière. Informations*; (4): 16.

[DGAC, 2006] DGAC, 2006. Note technique de la Direction Générale d'Avion civil, Insonorisation des logements proches des aéroports, Points de repères Octobre 2006.

[Dinato et Schaal, 2014] Dinato, A.C., Schaal, R.E., 2014. Simulation of aircraft noise in the surroundings of the Ribeirão Preto airport. *J. Trans. Lit.* 8 (1), 285-303.

[Doubouya et., 2015] Combining conceptual graphs and argumentation for aiding in the teleexpertise, *Computers in Biology and Medicine* 63 (2015) 157–168 (May)

[Exp-concept, 2012] <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/>

[Faburel et al., 2006] Faburel, G., Chatelain, F., Gobert, J., Lévy, L., Manola, Th., Mikiki, F., Zegagh, D., 2006. (coord). Les effets des trafics aériens autour des aéroports franciliens. Tome1: Etat des savoirs et des méthodes d'évaluation sur les thèmes d'environnement. Rapport final du CRETEIL pour l'ACNUSA, ADP et la DGAC. (May, 158 p).

[Fidell, 2003] Fidell, S. (2003). “The Schultz curve after 25 years: a research perspective”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 114, pp. 2007-2015.

[Flage et Aven, 2009] Flage, R., Aven, T., 2009. Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis (QRA). In: *Reliability, Risk Anal.: Theory and Applications*. 2 (13). pp. 9–18.

[Flores-Fillol, 2010] Flores-Fillol, R., 2010. Congested hubs. *Transp. Res. B* 44 (3), 358-370 (March).

[Francisco M A et al., 2015] Francisco Manzano-Agugliaroa, Francisco G. Montoya, Andrés Sabio-Ortega, Amós García-Cruz (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort Francisco, *Journal: Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 736–755

[Freire R Z et al., 2008] Freire R Z, Oliveira G H, Mendes N. (2008) Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy Build*; 40 (7): 1353-65.

[Gaitani N et al., 2007] Gaitani N, Mihalakakou G, Santamour is M. (2007) On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Build Environ*; 42 (1): 317-24

[Ganic et al., 2015] Ganic, E.M, Netjasov, F., Babic, O., (2015). Analysis of noise abatement measures on European airports. *Appl. Acoust.* 92, 115-123 (May).

[Gao C F et Lee WL, 2011] Gao CF, Lee WL. Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong. *Build Environ* 2011; 46:961-9

[Girvin, 2009] Girvin R. FAA efforts to characterize and mitigate aircraft noise impacts. *Proceedings of the 8th European Conference on Noise Control-Euro Noise 2009*, Edinburgh, UK; 2009.

[Givoni, 1978] Givoni, B. (1978) *l'Homme, l'Architecture et le Climat*, Le Moniteur, Paris, 460p.

[Givoni B, 1992] Givoni B. (1992) Comfort, climate analysis and building design guide lines. *Energy Build*; 18 (1): 11-23.

- [**Givoni B, 1994**] Baruch-Givoni. Passive and Low Energy Cooling of Buildings. Van nostrand Reinhold, USA, 1994.
- [**Gourc, 2006**] Gourc, D. (2006). Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services : Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées - Mémoire pour l'Habilitation à Diriger la Recherche (HDR). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [**Guid, 2015**] Guide du bâtiment durable en régions tropicales Tome 2 : Efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales, L'IFDD et ENERGIES 2050 -Septembre 2015
- [**Habitat, ONU 2014**] Habitat, ONU (2014). L'état des villes Africaines 2014 Réinventer la transition urbaine. 1, 5.
- [**Hamayon L, 2006**] Hamayon, Loïc. (2006) Réussir l'Acoustique du Bâtiment, 2ème édition, Editions Le Moniteur, Paris, 234 p.
- [**Hamayon L, 2008**] Hamayon, Loïc. (2008) Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments, Editions Le Moniteur, Paris, 237 p.
- [**Herde A De Liébard A, 1996-2004**] Herde, A. De, Liebard, A., 1996-2004. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. xv, vol. 7, Editions Le Moniteur, Paris, 2005.
- [**Hussein H, 2012**] Muhannad HAJ HUSSEIN, Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitats palestiniens, Thèse en Mécanique, Université Bordeaux, Sept 2012.
- [**IATA, 2014**] IATA, 2014. 20 Year Passenger Forecast 2014-2034
- [**ICAO, 2007**] ICAO news release PIO 08/07. International Civil Aviation Organization,
- [**Ignaccolo M, 2000**] Ignaccolo, M., 2000. Environmental capacity: noise pollution at Catania-Fontanarossa international airport. J. Air Trans. Manage. 6 (4), 191-199 (October).
- [**Ilha et al., 2009**] Ilha, M.S.O., Oliveira, L.R., Goncalves, O.M., 2009. Environmental assessment of residential buildings with an emphasis on water conservation. J. Build. Serv. Eng. Res. Technol 30, 15- 26.
- [**ISO, 2002**] ISO (2002). ISO/IEC Guide 73: Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards. Rapport technique, International Organization for Standardization (ISO) - Genève (Suisse).
- [**ISO, 2003**] ISO (2003). ISO 17666: Space systems - Risk management. Rapport technique, International Organization for Standardization (ISO) - Genève (Suisse)
- [**ISO, 2009a**] ISO, 2009a. Risk Management-Vocabulary. Guide 73:2009.
- [**ISO, 2009b**] ISO, 2009b. Risk Management-Principles and Guidelines, ISO 31000: 2009.
- [**Jagniatinskis et al., 2016**] Jagniatinskis, A., Fiks, B., Zaporozhets, O., van Oosten, N., 2016. Annual noise assessment in the vicinity of airports with different flights' intensity. Appl. Acoust. 101 (1), 168-178 (January).
- [**Janssen et al., 2014**] Janssen, S.A., Centen, M.R., Henk, V., van Kamp, I., 2014. The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality. Appl. Acoust. 84, 9-16 (October).
- [**Júnior et al., 2012**] Júnior, E. B. C., Garavelli, S. L., Maroja, A. M. (2012) Análise dos efeitos do ruído aeronáutico em zonas residenciais circunvizinhas ao Aeroporto Internacional de Brasília. Journal of Transport Literature, vol. 6, n. 4, pp. 59-81.
- [**Kaplan et Garrick, 1981**] Kaplan, S and Garrick, B.J., 1981. On the quantitative definition of risk. Risk Anal. 1, 11-27.
- [**Kervern et Rubise, 1991**] Kervern, G.-Y et Rubise, P. (1991). L'archipel du danger : introduction aux cindyniques. Economica, Paris.
- [**Kruzner K et al., 2013**] Kruzner, K., Cox, K., Machmer, B., Klotz, L., 2013. Trends in observable passive solar design strategies for existing homes in the US. Energy Policy 55, 82-94.
- [**Lafarge, 2010**] LAFARGE plâtre commercialisation, Memento 2010, Fichier Pdf (consulté le 01/05/18) [En ligne], <http://www.lafarge-france.fr/memonto-2010-12-Reglementation>

[Leef milieu brussel, 2017]

http://www.leefmilieubrussel.be/Templates/download/19990527_agb_LutteBruit_TraficAerien.pdf? Langtype = 2060 Last accessed on 04/08/2017.

[Levy A, 2009] Levy A. (2009) Space complexity and architectural conception: revisiting Alberti's treatise. *Semiotica* 2009; (175): 253–67.

[Lombera et Rojo, 2010] Lombera, José-Tomás San-José, Rojo, Jesús Cuadrado, 2010. Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability. *J. Constr. Build. Mater* 24 (4), 438-447.

[Lowrance W, 1976] Lowrance W, (1976). Of acceptable risk science and the determination of safety. Los Altos, CA: William Kaufmann Inc.

[Mahdavi A et Doppel bauer, 2010] Mahdavi, A., Doppel bauer E-M., 2010. A performance comparison of passive and low energy buildings. *Energy Build.* 42, 1314-1319.

[Marrs et Mundt, 2007] Marrs, F. O. et Mundt, B. M. (2007). *Enterprise Concept: Business Modeling Analysis and Design*, pages 26–60. John Wiley and Sons, Inc.

[Mazria, 2005] Mazria, E. (2005) *Le guide de la maison solaire*, traduit par Bazan P., Ed Parenthèses, 339p.

[MCA-Mali, 2005] Millennium Challenge Account (MCA), composante aéroport de Bamako Sénou 2005, site internet du MCA Mali «mcamali.org»

[McMillen, 2004] McMillen, D.P., 2004. Airport expansions and property values: the case of Chicago O'Hare Airport. *J. Urban Econ.* 55 (3), 627–640 (May).

[Metallinou V, 2006] Metallinou V. (2006) Ecological propriety and architecture. In: Broadbent G, Brebbia CA. *Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature*, WIT Transaction son The Built Environment, vol. 86; 2006. p. 15–22.

[Mileto C et al., 2012] Mileto C, Vegas F, Cristini V. (2012) *Rammed earth conservation*. London: CRC Press.

[Modi et al., 2005] Modi, V., Mc Dade, S., Lallement, D., Saghir, J., (2005). *Energy Services for the Millennium Development Goals*. UN Millennium Project, UNDP, The World Bank and Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Washington, DC.

[Morillón-Gálvez D et al., 2004] Morillón-Gálvez D, Saldaña-Flores R, Tejeda-Martínez A. (2004) Human bioclimatic atlas for Mexico. *Solar Energy* 2004; 76 (6): 781–92.

[Morrell et Lu, 2000] Morrell, P., Lu, C.H.-Y., 2000. Aircraft noise social cost and charge mechanisms a case study of Amsterdam Airport Schiphol. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 5 (4), 305-320 (July).

[Muhaisen, 2006] Muhaisen, A. (2006) Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions, *Building and Environment*, Vol. 41, pp.1731-174.

[Netjasov, 2012] Netjasov, F., 2012. Contemporary measures for noise reduction in airport surroundings. *Appl. Acoust.* 73, 1076–1085 (May).

[OACI, 2012] AOCI, 2012. Annual Report. IPCC, 1999. *Aviation and the Global Atmosphere*. 113/08.

[Ogalama Y G, 2013] Ogalama, Y, G., (2013), *La Pratique de l'urbanisme en Afrique subsaharienne : Bilan et perspective stratégique. L'exemple de la ville de Bangui (Centrafrique)*.

[Olgyay V et Olgyay A, 1963] Olgyay V, Olgyay A. *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*, vol. 1. Princeton: Princeton University Press; 1963.

[Olgyay V, 1967] Olgyay V. Bioclimatic orientation method for buildings. *Int J Biometeorol* 1967; 11 (2): 163–74.

[OMS, 2011] OMS, 2011. European Centre for Environment and Health. (JRC EU978 92 890 0229

[ONU Habitat, 2015] ONU habitat (<http://unhabitat.org/urban-themes-2/>)

[ONU rapport, 2017] World Population Prospects United Nation, New York 2017

- [Ouis, 2001] Ouis, D (2001). Annoyance from road traffic noise: A review. *Journal of Environmental Psychology*, vol. 21, pp. 101-120.
- [Ozkurt, N et al., 2014] Ozkurt, N., Sari, D., Akdag, A., Kutukoglu, M., Gurarslan, A., 2014. Modeling of noise pollution and estimated human exposure around Istanbul Atatürk Airport in Turkey. *Sci. Total Environ.* 482-483, 486–492 (June).
- [Pacheco R, 2012] Pacheco, R., Ordoñez, J., Martínez, G., 2012. Energy efficient design of building: a review. *Renew. Sustain Energy Rev.* 16, 3559-3573
- [Park H K et Kim H, 2015] Park, H.K., Kim, H., 2015. Acoustic insulation performance of improved airtight windows. *Constr. Build. Mater.* 93, 542–550 (June).
- [Passivact, 2016] <http://passivact.com/Infos/InfosConcepts/files/QualiteThermiqueComparaisonsMateriaux.html> Last accessed on 07/01/2016.
- [Pérez G et al., 2006] Pérez, G., Coma, J., Barreneche, C., de Gracia, A., Urrestarazu, M., Burés, S., Cabeza, L.F., 2016. Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. *Appl. Acoust.* 110, 218-226 (March).
- [Porcaro et Takada, 2004] Porcaro, J., Takada, M., 2004. In: *Achieving the Millennium Development Goals: The Role of Energy Services - Case Studies from Brazil, Mali and The Philippines*. UNDP, New York.
- [Pourvahidi P, 2010] Pourvahidi P., 2010. Bioclimatic analysis of vernacular Iranian architecture [Ph.D. thesis]. Eastern Mediterranean University (EMU).
- [Pourvahidi P et Ozdeniz M B, 2013] Pourvahidi P, Ozdeniz M B. Bioclimatic analysis of Iranian climate for energy conservation in architecture. *Sci Res Essays* 2013; 8 (1): 6–16.
- [Pujol S, 2012] Pujol S., 2012. *Le bruit environnemental en milieu urbain : exposition d'une population d'enfants et performances scolaires*, Thèse de l'Université de Franche-Comte
- [Ralegaonkar et Gupta, 2010] Ralegaonkar, R.V., Gupta, R., 2010. Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renew. Sustain Energy Rev.* 14, 2238-2242.
- [Rapport octobre, 2014. Grenelle de l'Environnement] Rapport octobre., 2014. Grenelle de l'Environnement, Retours d'Expériences (REX-Bâtiments-Performants-Risques).
- [Rapport OMH, 2010] Rapport OMH., 2010. Colloque International sur le logement Social à Ouagadougou, 24, 25 et 26 juin 2010 présentation: office malien de l'habitat (OMH politique de logements sociaux au mali.
- [Rapport, ORWB, 2010] Rapport ORWB., 2010. Stratégie de développement de la maîtrise de l'énergie au Mali, Département Régional Ouest II.
- [REXAO, 2003] REXAO., 2003. Groupement rexao (retour d'expérience et apprentissage organisationnel). Rapport technique.
- [Rodríguez-Díaz et al., 2017] Rodríguez-Díaz, A., Adenso-Díaz, B., González-Torre, P.L., 2017. A review of the impact of noise restrictions at airports. In: *Article Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 50. pp. 144-156 (January).
- [Schultz T J, 1978] Schultz, T.J., 1978. Synthesis of social surveys on noise annoyance. *J. Acoust. Soc. Am.* 64 (2), 377-405.
- [Slama et al., 2008] Slama, J.G., Mora-Camino, F.A.C., Revoredo, T.C., 2008. Is DNL appropriate for airport noise zoning. In: *European conference on Noise Control, Paris, French*, pp. 1967–1971 (June 29 July 4).
- [Sienou, 2009] Sienou, A. (2009). Proposition d'un cadre méthodologique pour le management intégré des risques et des processus d'entreprise. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Singh, M K et al., 2009] Singh M K, Mahapatra S, Atreya S., 2009. Bioclimatisme and vernacular architecture of north-east india. *Build Environ*; 44 (5): 878-88.
- [Singh et Dev, 2010] Singh, V., Dev, P., 2010. Environmental impact of noise pollution, a case study in Saharanpur City, Western Uttar Pradesh, India. *Int. J. Earth Sci. Eng.* 3 (6), 869-

874.

[**Sondakh D et al., 2014**] Sondakh, D., Maryunani, Soemarno, Setiawan, B., 2014. Analysis of Noise Pollution on Airport Environment (Case study of International Airport of Sam Ratulangi Manado, Indonesia). *Int. J. Eng. Invent.* 4 (2), 13-19 (August).

[**Standards Association of Australia, 1999**] Standards Association of Australia (1999). Guidelines for managing risk in the Australian and new zealand public sector - standard AS/NZS HB 143 : 1999 (99457). Rapport technique.

[**Tian W et al., 2014**] Tian, W., Song, J., Li, Z., de Wilde, P., 2014. Bootstrap techniques for sensitivity analysis and model selection in building thermal performance analysis. *Appl. Energy* 135, 320-328.

[**Thompson et al. 2005**] Thompson K M, Deisler Jr P H, Schwing R C, 2005, Interdisciplinary vision : the first 25 years of the Society for Risk Analysis (SRA) , 1980-2005 . *Risk Analysis* 2005; 25: 1333 – 86.

[**Vanos J, 2010**] Vanos J, Warland J, Gillespie T, Kenny N. Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *Int J Biometeorol* 2010; 54 (4): 319-34.

[**Vespermann et Wald, 2011**] Vespermann, J., Wald, A., 2011. “An analysis of economic impacts and ecologic effects of the EU-emission trading scheme in the aviation industry. *Transp. Res. Part A* 45, 1066–1076.

[**Vérot, 2001**] Vérot, Y. (2001). Retour d’expérience dans les industries de procédé. *Techniques de l’Ingénieur*, volume AG4610.

[**vikidia, 2015**] https://fr.wikidia.org/wiki/Climat_tropical Last accessed on 15/12/2015

[**Villeneuve E, 2012**] Éric Villeneuve (2012). Hybridation des retours d'expérience statistique et cognitif pour l'évaluation des risques : Application à la déconstruction des aéronefs. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

[**Vogiatzis K, 2012**] Vogiatzis, K., 2012. Airport environmental noise mapping and land use management as an environmental protection action policy tool. The case of the Larnaka International Airport (Cyprus). *Sci. Total Environ.* 424, 162-173 (May).

[**Vogt J, 2005**] Vogt J (2005) The relative impact of aircraft noise and number in a full-factorial laboratory design *Journal of sound Vibration*, Vol. 282, pp. 1085-1100.

[**Wang Z, 2014**] Wang, Z., Ding, Y., Geng, G., Zhu, N., 2014. Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method. *Energy Convers. Manag.* 77, 233-242.

[**Wang et al., 2013**] Wang, Z., Ding, Y., Geng, G., Zhu, N., 2013. Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method. *Energy Convers. Manag.* 77, 233-242.

[**Wazeri, 2002**] Wazeri, Y. (2002) Applications on environmental architecture: solar design for interior courtyard: studies on Cairo and Toshka. Madbouli, Cairo.

[**Wijnen et Visser, 2003**] Wijnen, R.A.A., Visser, H.G., 2003. Optimal departure trajectories with respect to sleep disturbance. *Aerosp. Sci. Technol.* 7, 81–91 (1 January).

[**Wybo., 1999**] Wybo, J. L. (1999). Introduction aux cindyniques. ESKA, Paris.

Bibliographie de l'auteur

[Camara et al., 2018] Tamba Camara, Bernard Kamsu-Foguem, Badié Diourté, Jean Pierre Faye, Oumar Hamadoun. Management of acoustic risks for buildings near airports. *Ecological Informatics*, Volume 44, March 2018, Pages 43-56.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.12.007>

[Camara et al., 2017] Tamba Camara, Bernard Kamsu-Foguem, Badié Diourté, Alhouseini Issa Maïga, Abdallah Habbadi. Management and assessment of performance risks for bioclimatic buildings. *Journal of Cleaner Production*, Volume 147, 20 March 2017, Pages 654-667.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.063>

[Camara et al., 2016] Tamba Camara, Bernard Kamsu-Foguem, Badié Diourte, Alhouseini Issa Maïga. Experience feedback for risk assessment in aeronautic buildings. *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, 20 November 2016, Pages 1237-1245.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.07.169>