

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mentouri de Constantine
Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et de l'Aménagement du
territoire
Département d'Architecture et d'Urbanisme

N° Ordre :.....

Série :.....

MEMOIRE

Pour l'Obtention du Diplôme de Magistère en Architecture

Option : Architecture Bioclimatique

THEME

**Evaluation du confort acoustique dans les
Salles de cours des établissements scolaires**
(Cas des lycées de Constantine)

Présenté par : Mme BOUKADOUM Amina

Sous la direction du Docteur ABDOU Saliha

Jury d'examen :

Président :	Pr. BOURBIA Fatiha	Université de Constantine
Examineur :	Pr. BOUCHAHM Yasmina	Université de Constantine
Examineur :	Pr. DEBACHE Samira	Université de Constantine
Rapporteur :	Dr. ABDOU Saliha	Université de Constantine

Soutenu le 02/07/2012

Sommaire

Table des matières.....	i
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	ix

Introduction générale

Introduction.....	1
Problématique.....	4
Méthodologie.....	7
Structure du mémoire.....	8

Chapitre I

Notions élémentaires en acoustique du bâtiment

Introduction	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
1. Composition des sons et du bruit	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2. Niveau de pression acoustique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3. Propagation du son dans un espace libre	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4. Propagation du son dans un espace clos	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1. Réflexion et absorption du son	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2. Réverbération.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3. Diffraction et réfraction.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.4. Focalisation du son.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.5. Echos	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.6. Ondes stationnaires	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.7. Ondes en opposition de phase.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5. Indices de performance acoustique	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1. Coefficient d'absorption α	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2. Aire d'absorption équivalente A.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.4. Indice d'affaiblissement acoustique aux bruits aériens	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.5. Isolements acoustiques relatifs aux bruits aériens	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.6. Indice de réduction du niveau de bruit de choc ΔL	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.7. Niveau de pression acoustique du bruit de choc	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6. Perception auditive, bruit et gêne sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.1. Champ auditif.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
6.2. Courbes d'isotonie.....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

6.3. Notion de gêne sonore.....	Erreur ! Signet non défini.
6.4. Indicateurs de la gêne sonore.....	Erreur ! Signet non défini.
6.4.1. Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A	Erreur ! Signet non défini.
6.4.2. Le niveau acoustique fractile	Erreur ! Signet non défini.
6.5. Effet de masque et intelligibilité	Erreur ! Signet non défini.
7. Réglementation algérienne pour la lutte contre le bruit _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
7.1. Les lois.....	Erreur ! Signet non défini.
7.2. Les arrêtés.....	Erreur ! Signet non défini.
7.3. Les décrets exécutifs	Erreur ! Signet non défini.
7.4. Le document technique réglementaire DTR C 3.1.1.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

Chapitre II

Confort acoustique: Isolation et correction

Introduction _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
1. L'onde sonore et la paroi _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2. Conditions du confort acoustique _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3. Principes de l'isolation acoustique des bruits aériens _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
3.1. Modes de transmission des bruits aériens	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Principe de masse.....	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Principe de double paroi.....	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Principe d'étanchéité.....	Erreur ! Signet non défini.
3.5. Implantation et conception des bâtiments	Erreur ! Signet non défini.
3.6. Qualité de l'enveloppe du bâtiment	Erreur ! Signet non défini.
3.6.1. Parois lourdes.....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.2. Parois légères	Erreur ! Signet non défini.
3.6.3. Bardage métallique.....	Erreur ! Signet non défini.
3.6.4. Vitrages et menuiserie	Erreur ! Signet non défini.
3.6.5. Toitures.....	Erreur ! Signet non défini.
3.7. Ecrans antibruit	Erreur ! Signet non défini.
4. Principes de l'isolation acoustique des bruits solidiens _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1. Isolation acoustique des bruits de choc	Erreur ! Signet non défini.
4.1.1. Revêtement de sol	Erreur ! Signet non défini.
4.1.2. Sol flottant.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2. Isolation acoustique des bruits d'équipement.....	Erreur ! Signet non défini.
5. Principes de la correction acoustique _____	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1. Influence des matériaux absorbants	Erreur ! Signet non défini.
5.2. Matériaux poreux et fibreux	Erreur ! Signet non défini.
5.3. Résonateurs.....	Erreur ! Signet non défini.

5.4. Membranes	Erreur ! Signet non défini.
5.5. Critères de la qualité acoustique d'une salle.....	Erreur ! Signet non défini.
5.5.1. Répartition de l'énergie sonore dans la salle	Erreur ! Signet non défini.
5.5.2. Temps de réverbération préconisé.....	Erreur ! Signet non défini.
5.6. Exemples de traitement acoustique des salles	Erreur ! Signet non défini.
5.6.1. Petites salles	Erreur ! Signet non défini.
5.6.2. Grandes salles.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III

Confort acoustique dans les locaux scolaires

Introduction	Erreur ! Signet non défini.
1. Le bruit dans les établissements scolaires	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Sources de bruit extérieures aux bâtiments	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Sources de bruit intérieures aux bâtiments	Erreur ! Signet non défini.
2. Spécificités acoustiques des différents espaces du bâtiment scolaire ____	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Salle de classe	Erreur ! Signet non défini.
2.1.1. Intelligibilité de la parole et bruit de fond	Erreur ! Signet non défini.
2.1.2. Intelligibilité et temps de réverbération.....	Erreur ! Signet non défini.
2.2. Cantine.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Espaces de circulation	Erreur ! Signet non défini.
2.4. Amphithéâtre	Erreur ! Signet non défini.
2.5. Salle de musique	Erreur ! Signet non défini.
2.6. Bibliothèque.....	Erreur ! Signet non défini.
2.7. Gymnase scolaire	Erreur ! Signet non défini.
3. Réglementation du confort acoustique dans les écoles	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Bruit ambiant intérieur	Erreur ! Signet non défini.
2.3. Temps de réverbération	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Isolement acoustique vis-à-vis de l'environnement extérieur et entre locaux..	Erreur ! Signet non défini.
4. Résultats de recherche sur l'évaluation du confort acoustique dans les salles de classe	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV

Matériel et Méthodes

Introduction	Erreur ! Signet non défini.
1. Infrastructure et effectif scolaire de la Wilaya de Constantine ____	Erreur ! Signet non défini.
2. Choix du terrain d'Etude (le lycée)	Erreur ! Signet non défini.

3. Critères de choix des différents lycées	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4. Présentation des lycées étudiés	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1. Lycée Soumia	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1.1. Situation	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1.2. Environnement sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1.3. Descriptif de la construction	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1.4. Répartition des salles de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.1.5. Description de la salle de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2. Lycée El-Houria	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2.1. Situation	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2.2. Environnement sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2.3. Descriptif de la construction	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2.4. Répartition des salles de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.2.5. Description de la salle de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3. Lycée Bouhali Saïd	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3.1. Situation	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3.2. Environnement sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3.3. Descriptif de la construction	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3.4. Répartition des salles de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
4.3.5. Description de la salle de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5. Méthodologie d'évaluation du confort sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1. Méthode de l'analyse subjective du confort sonore (le questionnaire)	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1.1. Objectifs du questionnaire	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1.2. Conception du questionnaire	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.1.3. Remplissage du questionnaire	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2. Méthode de l'analyse physique du confort sonore	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.1. Matériel de mesures	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.2. Paramètres acoustiques mesurés	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.3. Positionnement de l'appareil de mesure	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.4. Durée de la mesure	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.2.5. Paramètres acoustiques calculés	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3. Cadre réglementaire de référence	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.1. Bruit ambiant à l'extérieur des salles de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.2. Bruit ambiant à l'intérieur des salles de cours	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
5.3.3. Temps de réverbération	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
Conclusion	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

Chapitre V

Résultats et Discussion

Introduction *Erreur ! Signet non défini.*

1. Analyse et interprétation des questionnaires *Erreur ! Signet non défini.*

- 1.1. Structure de la population interrogée *Erreur ! Signet non défini.*
 - 1.1.1. Les élèves *Erreur ! Signet non défini.*
 - 1.1.2. Les enseignants *Erreur ! Signet non défini.*

- 1.2. Evaluation de la sensibilité au bruit **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.3. Evaluation de la qualité sonore dans le lycée **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.3.1. Evaluation de la qualité sonore des différents espaces du lycée **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.3.2. Evaluation de la qualité sonore des salles de classe **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.4. Evaluation du niveau de gêne due au bruit durant les heures de cours..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.5. Identification des différentes sources de bruit et leurs niveaux de gêne .. **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.5.1. Les bruits extérieurs **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.5.2. Les bruits intérieurs **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.6. Plages horaires où le bruit dérange le plus **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.7. Effets du bruit sur les activités scolaires **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.8. Actions pour diminuer le niveau du bruit..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.9. Appréciation de la diminution du bruit à la fermeture des ouvertures..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.10. Paramètres contribuant à l'amélioration du confort sonore dans les salles de classe **Erreur ! Signet non défini.**
- 1.11. Synthèse des résultats du questionnaire **Erreur ! Signet non défini.**
- 2. Analyse et interprétation des mesures** *Erreur ! Signet non défini.*
- 2.1. Résultats de mesures des niveaux sonores extérieurs **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.2. Niveaux sonores intérieurs: Résultats de la première série de mesures.... **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.2.1. Salles de cours du lycée Soumia **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.2.2. Salles de cours du lycée El Houria **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.2.3. Salles de cours du lycée Bouhali **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.2.4. Comparaison des niveaux sonores intérieurs des différentes salles ... **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.3. Niveaux sonores intérieurs: Résultats de la deuxième série de mesures... **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.3.1. Salles de cours du lycée Soumia **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.3.2. Salles de cours du lycée El Houria **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.3.3. Salles de cours du lycée Bouhali **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.3.4. Comparaison des niveaux sonores intérieurs des différentes salles ... **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.4. Comparaison des résultats des deux séries de mesures..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 2.5. Résultats des niveaux de bruits ambiants à l'intérieur de la salle occupée **Erreur ! Signet non défini.**
- 3. Durée de réverbération des salles de cours** *Erreur ! Signet non défini.*
- 3.2. Durée de réverbération de la salle de cours Soumia **Erreur ! Signet non défini.**
- 3.2. Durée de réverbération de la salle de cours El-Houria..... **Erreur ! Signet non défini.**
- 3.3. Durée de réverbération de la salle de cours Bouhali..... **Erreur ! Signet non défini.**

Conclusion	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
Conclusion générale	161
Recommandations	165
Bibliographie	167
Annexes	173
Résumés	192

Liste des figures

Figure I- 1. Spectre d'un son pur et d'un son complexe	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 2. Spectres d'un bruit	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 3. Analyse spectrale d'un bruit par bandes d'octave.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 4. Source sonore ponctuelle	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 5. Source sonore linéaire	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 6. Chemins de propagation du son dans une salle.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 7. Réflexion d'une onde acoustique	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 8. Trajet de réflexion du son dans un espace clos.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 9. Réflexion des sons de différentes longueurs d'onde.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 10. Focalisation du son.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 11. Lois expérimentales de masse et de fréquence.	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 12. Courbes expérimentales de variation de l'indice d'affaiblissement acoustique R	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 13. Différence entre isolement D et affaiblissement R	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 14. Différence entre $L_{nT,w}$ et $L_{n,w}$	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 15. Echelle de fréquences audibles	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 16. Champ auditif.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 17. Courbes d'isotonie	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 18. Maison sur la cascade	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 20. Représentation des niveaux fractiles et du niveau équivalent	Erreur ! Signet non défini.
Figure I- 21. Effet du bruit de fond sur la conversation en fonction de la distance de l'auditeur par rapport au locuteur	Erreur ! Signet non défini.
<hr/>	
Figure II- 1. Absorption, transmission et réflexion de l'onde acoustique.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 2. Isolation et correction acoustique	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 3. Modes de transmission des bruits aériens intérieurs et extérieurs. ..	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 4. Principe de masse.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 5. Représentation schématique d'une double paroi.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 6. Principe de la double paroi.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 7. Comparaison des indices d'affaiblissement acoustique de parois simple, double et multiple	Erreur ! Signet non défini.

Figure II- 8. Influence des profils de rues	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 9. Exemples de situations de bâtiments vis-à-vis des nuisances sonores....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 10. Influence de la conception des balcons dans la propagation des bruits	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 11. Fonctionnement d'un écran antibruit	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 12. Détail d'une dalle flottante.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 13. Influence de l'absorption.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 14. Matériaux poreux	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 15. Résonateur de Helmholtz	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 16. Composition d'une membrane	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 17. Courbes isoacoustiques	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 18. Durée de réverbération préconisée aux fréquences médiums.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 19. Traitement des parois latérales.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 20. Traitement des fonds de salle.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 21. Risque de focalisation lié aux	Erreur ! Signet non défini.
Figure II- 22. Dimensionnement des balcons pour.....	Erreur ! Signet non défini.
<hr/>	
Figure III- 1. Sources de bruit dans les établissements scolaires	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 2. Contours d'intelligibilité en fonction du bruit de fond.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 3. Favoriser les premières réflexions	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 4. Répartition des surfaces absorbantes	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 5. Traitement acoustique du plafond et fond de la salle	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 6. Exemple d'un traitement acoustique de la salle.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 7. Traitement acoustique du plafond d'une cantine scolaire en matériau absorbant	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 8. Traitement acoustique du plafond en baffles acoustiques ..	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 9. Exemples de matériaux absorbants posés en plafond.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 10. Exemple de matériaux absorbants posés sur les murs	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 11. Disposition de réflecteurs et matériaux absorbants dans un amphithéâtre	Erreur ! Signet non défini.
Figure III- 12. Durée de réverbération maximale et minimale en fonction du volume du gymnase	Erreur ! Signet non défini.
<hr/>	
Figure IV- 1. Situation des lycées étudiés.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 2. Vue aérienne du lycée Soumia.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 4. Environnement immédiat du lycée Soumia (Rue Bensghir).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 5. Vue de l'extérieur des salles de cours- Lycée Soumia- (Rue Larbi Ben Mhidi)	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 6. Les différents espaces du lycée Soumia- Vue de l'intérieur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 7. Répartition des salles de cours Lycée Soumia.	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 8. Vue en plan de la salle de cours du lycée Soumia	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 9. Salle de cours sur coursive – Lycée Soumia.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 10. Salle de cours sur couloir – lycée Soumia	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 11. Vue aérienne du lycée El Houria.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV- 13. Rue mitoyenne au lycée El-Houria (Rue du 8 Mars)	Erreur ! Signet non défini.

Figure IV- 14. Les différents blocs, Vues de l'intérieur du lycée El-Houria..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 16. Vue en plan de la salle de cours du Lycée El Houri**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 17. Photos de la salle de cours du lycée El Houria**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 18. Vue aérienne du lycée Bouhali Saïd.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 19. Environnement sonore du lycée Bouhali Saïd**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 20. Environnement immédiat du lycée Bouhali.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 21. Les salles de cours et galerie intérieure- lycée Bouhali Saïd **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 22. Espaces extérieurs- Lycée Bouhali.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 23. Vue en plan des salles de cours Lycée Bouhali Saïd**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 24. Vue en plan de la salle de cours du lycée Bouhali Saïd ...**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 25. Photos de la salle de cours du lycée Bouhali Saïd.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV- 26. Matériel de mesure utilisé**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 1. Pourcentage de questionnaires rendus**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 2. Nombre d'années de fonction des enseignants questionnés **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 3. Tranche d'âge des enseignants questionnés**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 4. Sensibilité par rapport au bruit de l'ensemble des questionnés du lycée Soumia
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 5. Sensibilité par rapport au bruit des l'ensemble des questionnés du lycée El Houria
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 6. Sensibilité par rapport au bruit de l'ensemble des questionnés du lycée Bouhali
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 7. Qualité sonore des espaces du lycée Soumia selon les questionnés. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 8. Qualité sonore des espaces du lycée El Houria selon les questionnés.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 9. Qualité sonore des espaces du lycée Bouhali Saïd selon les questionnés**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 10. Evaluation de la qualité sonore de la salle de classe par l'ensemble des questionnés
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 11. Niveau de perturbation du bruit durant les cours.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 12. Sources de bruit extérieures et gêne au lycée Soumia**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 13. Sources de bruit extérieures et gêne au lycée El Houria....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 14. Sources de bruit extérieures et gêne au lycée Bouhali.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 15. Sources de bruit intérieures et gêne au lycée Soumia.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 16. Sources de bruit intérieures et gêne au lycée El Houria....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 17. Sources de bruit intérieures et gêne au lycée Bouhali**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 18. Sources de bruits les plus nuisibles pendant les cours selon l'ensemble des
questionnés**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 19. Plages horaires où le bruit dérange le plus**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 20. Effet du bruit sur les activités scolaires selon les questionnés du lycée Soumia
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 21. Effet du bruit sur les activités scolaires selon les questionnés du lycée El Houria
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 22. Effet du bruit sur les activités scolaires selon les questionnés du lycée Bouhali
.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 23. Actions pour diminuer le niveau de bruit.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 24. Diminution du niveau de bruit à la fermeture des ouvertures **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 25. Paramètres contribuant à la diminution du bruit dans les classes du lycée Soumia.
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 26. Paramètres contribuant à la diminution du bruit dans les classes du lycée El Houria.
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 27. Paramètres contribuant à la diminution du bruit dans les classes du lycée Bouhali
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 28. Comparaison des niveaux sonores moyens extérieurs des lycées avec la valeur limite du décret exécutif n° 93-184. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 29. Configuration des salles testées du lycée Soumia **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 30. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 01 inoccupée.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 31. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 04 inoccupée... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 32. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 14 inoccupée... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 33. Comparaison des niveaux sonores intérieurs des différentes salles - Lycée SOUMIA.
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 34. Configuration des salles de cours testées au lycée El Houria **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 35. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 02 inoccupée... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 36. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 08 inoccupée ... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 37. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 21 inoccupée.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 38. Comparaison des niveaux sonores intérieurs des différentes salles - Lycée EL HOURIA
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 39. Configuration des salles testées au lycée Bouhali **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 42. Comparaison des niveaux sonores intérieurs des différentes salles - Lycée BOUHALI.
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 40. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 03 inoccupée.. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 41. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 17 inoccupée.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 43. Comparaison des niveaux de bruit à l'intérieur des différentes salles (1ère série de mesures) **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 44. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 01 (sur coursive) inoccupée en dehors des heures de cours- Lycée SOUMIA. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 45. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 04 (sur coursive) inoccupée en dehors des heures de cours- Lycée SOUMIA. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 46. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 14 (sur couloir) inoccupée en dehors des heures de cours- Lycée SOUMIA. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 47. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle inoccupée en dehors des heures de cours - Lycée EL HOURIA **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 48. Comparaison des niveaux de bruit à l'intérieur de la salle El-Houria inoccupée
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 49. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 03 inoccupée en dehors des heures de cours- Lycée BOUHALI. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 50. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle 17 inoccupée en dehors des heures de cours- Lycée BOUHALI. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 51. Comparaison des niveaux du bruit de fond des différentes salles de cours (2ème série de mesure). (Source: Auteur, 2011). **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 52. Comparaison des résultats des deux séries de mesures (Source: Auteur, 2011) **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 53. Comportement acoustique du couloir adjacent aux salles de cours au lycée El Houria **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 54. Propagation des bruits aériens dans les salles des lycées Soumia et Bouhali .. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 55. Comportement acoustique de la rue canyon (lycée Soumia). **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 56. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle occupée. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 57. Variation des niveaux sonores à l'intérieur de la salle pendant l'intercours. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 58. Evolution des niveaux sonores intérieurs- salle inoccupée, salle occupée et intercours **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 59. Durée de réverbération par bande d'octave - salles de cours SOUMIA **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 60. Durée de réverbération par bandes d'octave- Salle de cours EL HOURIA **Erreur ! Signet non défini.**

Figure V- 61. Durée de réverbération par bandes d'octave- Salle de cours BOUHALI **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des tableaux

Tableau I- 1. Valeurs des fréquences critiques des matériaux du bâtiment **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau I- 2. Evaluation de l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré pour des parois de masse surfacique m_s exposées à un bruit route ou un bruit rose. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau I- 3. Tableau récapitulatif des différents indices **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II- 1. Exemples d'indices d'affaiblissement acoustique pondérés de murs extérieurs. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II- 2. Indices d'affaiblissement acoustiques pondérés de différents types de vitrages **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II- 3. Indice d'affaiblissement acoustique pondéré $R_{A,tr}$ des couvertures en petits éléments **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II- 4. Indice ΔL_w de divers revêtements de sol. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 1. Recommandations en termes de bruit ambiant intérieur pour divers pays. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 2. Niveaux du bruit ambiant dans les salles de classe **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 3. Durée de réverbération réglementaire dans les locaux scolaires . **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 4. Niveaux d'isolation de la façade requis pour les locaux scolaires **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 5. Valeurs requises d'affaiblissement acoustique entre locaux dans différents pays européens. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III- 6. $D_{nT,A}$ minimal des écoles maternelles	Erreur ! Signet non défini.
Tableau III- 7. $D_{nT,A}$ minimal des établissements d'enseignement autres que les écoles maternelles	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV- 1. Effectif scolaire. Wilaya et ville de Constantine.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV- 2. Tableau synoptique – Identification des cas d'étude	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV- 3. Identification des salles testées.....	110
Tableau IV- 4. Identification des salles testées (suite).....	111
Tableau V- 1. Récapitulatif des questionnaires distribués et rendus	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V- 2. Moyenne des valeurs du niveau de bruit à l'extérieur des lycées .	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V- 3. Récapitulatif des niveaux sonores à l'intérieur des salles inoccupées (fenêtres et portes fermées)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V- 4. Récapitulatif des niveaux du bruit de fond des salles testées (fenêtres fermées)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau V- 5. Récapitulatif des niveaux du bruit fond des salles testées (fenêtres ouvertes)	Erreur ! Signet non défini.

Introduction générale

"Le bruit assassine les pensées..."

NIETZCHE. F.W (1844-1900)

Parmi tous nos organes sensitifs, l'Oreille est emblématique de bien des aspects du développement durable. Laissons de côté l'oreille du mauvais élève, tirée par l'instituteur sévère mais juste, encore que la sanction et l'évaluation soient des instruments bien identifiés du développement durable. L'oreille, c'est surtout l'écoute, la considération pour autrui, un des piliers de la « bonne gouvernance »¹.

Dans un vieil adage on dit « *Les murs ont des oreilles* », ce n'est pas la qualité première qu'on leur demande. Ce serait plutôt de nous protéger du bruit, cette intrusion du monde extérieur dans notre univers intime.

La problématique du bruit est un phénomène complexe qu'il n'est pas facile de circonscrire. Toutefois, il est nécessaire, aujourd'hui plus qu'hier, d'assurer aux habitants et usagers un environnement sonore sain qui favorise la qualité de vie et la quiétude. Pour cela et dans une perspective de développement durable, l'Europe s'est donnée comme mission première de modifier le paysage sonore des collectivités. En France par exemple, 40% de la population juge le bruit comme la nuisance la plus gênante².

Il est vrai que, lors de la conception architecturale ou urbaine, les préoccupations acoustiques sont toujours reléguées au second plan par rapport aux visuelles pourtant on sait qu'un sourd s'ennuie vite devant le spectacle de la mer, alors qu'un aveugle ne se lasse jamais du bruit des vagues et du vent. Les sons s'imposent à nous, comme les odeurs, et nous ne pouvons y échapper comme on le fait pour la vue, en fermant les yeux. L'ouïe est toujours en éveil, un paysage permanent, agréable ou déplaisant, avec des codes culturels et une dose de subjectivité.

Ces dernières décennies, ont vu un développement sans précédent des moyens de transport ferroviaires, aériens ou routiers ; on ne compte plus le nombre de voitures dans les rues ; mais aussi l'émergence de différents appareils ménagers ou autres tels que les amplificateurs de musique (MP3, baladeur ...etc). Le bruit se manifeste à toutes les échelles, de la chambre perturbée par le bruit de la télévision tardive du voisin aux décibels produits par l'avion au décollage passant par les manifestations des écoliers à la sortie des classes.

¹ BIDOU. D, L'oreille et le développement durable, 2006. (consulté le 08/10/09), [En ligne], <http://www.bruit.fr/boite-a-outils-des-acteurs-du-bruit>.

² INSEE, 2002. In.Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), *Qualité environnementale des bâtiments*, (page consultée le 08/03/08), [En ligne], <http://www2.ademe.fr>.

L'augmentation du bruit environnemental, tant dans les villes que dans les zones rurales, entraîne une dégradation de la qualité de vie des citoyens.

L'impact social des nuisances causées par le bruit est lourd, du fait de leurs conséquences sur la santé, l'éducation et la qualité des relations au sein d'un groupe. Aujourd'hui, il est prouvé que le bruit induit deux effets sur la santé: des effets physiologiques (lésions auditives, pertes auditives, des pathologies cardio-vasculaires, perturbation du sommeil); et des effets psychologiques (anxiétés, dépressions, modifications du comportement).

L'OMS définit la santé comme « *un état de bien-être physique, mental et social complet et non la seule absence de maladie ou d'infirmité* »³. Elle indique qu'environ 120 millions de personnes souffrent de problèmes auditifs dans le monde⁴.

Au-delà de ses effets néfastes dans l'environnement sur la santé des hommes, le bruit porte atteinte à la bonne qualité de vie des habitants. Même si les bruits urbains sont généralement en deçà des seuils de danger pour l'ouïe; ils constituent un facteur de gêne important.

De ce fait, la réduction et le contrôle du bruit deviennent des enjeux primordiaux, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. La gestion de l'environnement sonore urbain a fait l'objet de nombreux travaux de recherche malgré la complexité du sujet, lié au caractère subjectif et contextuel du ressenti de la nuisance sonore⁵.

Parmi les quatorze cibles de la démarche HQE, deux concernent plus particulièrement la problématique du bruit. Il s'agit selon l'angle d'approche :

- du bâtiment en tant que source de bruit pour son environnement ;
- du bâtiment en tant qu'espace à protéger des nuisances sonores générées par son environnement ;

La cible n°3 « *chantier à faibles nuisances* » et la cible n°9 « *confort acoustique* » soulignent une exigence nouvelle.

Les villes, lieu d'urbanité et d'échanges, fiertés des architectes, sont malheureusement les plus grands prédateurs de l'écosystème.

Les problèmes des villes algériennes, surpeuplement, clochardisation et industrialisation à outrance, ont été débattus et on est sorti, plus ou moins, avec des solutions concrètes dans divers domaines : prolifération des déchets urbains, urbanisation, transports, réhabilitation et sauvegarde des vieilles villes. Mais, on a rarement évoqué les nuisances sonores dans les villes.

³ Encyclopédie Wikipédia, [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>.

⁴ Environmental Health Information, *Résumé d'orientation des Directives de l'OMS relatives au bruit dans l'environnement*, janvier 2003, [En ligne], <http://ufcna.com/OMS-directives>

⁵ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie(ADEME), *Réussir un projet d'urbanisme durable*, Edition Moniteur, Paris 2006

La ville s'impose par ses expressions auditives variées : activités culturelles et économiques qui expriment sa vivacité. Cependant, cette vivacité et attractivité sont de plus en plus perçues comme des bruits gênants. Avec l'industrialisation et l'avènement de l'automobile, les espaces urbains sont véritablement devenus des non-lieux acoustiques⁶, des endroits où ni l'espace aménagé, ni l'espace temporel, ni la culture locale, ne peuvent être perçus par l'ouïe. Dans les rues et places urbaines, il devient presque impossible de s'orienter à l'aide d'informations sonores.

Depuis la directive européenne sur le bruit urbain en 2007, les villes doivent produire des cartes de bruit pour donner une vision globale et harmonisée de l'exposition au bruit dans l'environnement des habitants des grandes agglomérations européennes ainsi que ceux vivant aux abords des grands axes de transport terrestre et grands aéroports.

En Algérie, le problème concernant les nuisances sonores a été pris en charge par les pouvoirs publics dès 1983 en promulguant la loi N°83-03 du 05 Février 1983, relative à la protection de l'environnement.

La réglementation algérienne, concernant l'acoustique, vise à sensibiliser les personnes à la lutte contre le bruit, d'interdire toute utilisation et emploi de dispositifs émettant du bruit, et qui sont susceptibles de troubler le repos et la tranquillité des habitants, ainsi que l'interdiction des bruits produits à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation qui peuvent empêcher et gêner la tranquillité du voisinage⁷. Elle vise aussi à fixer les mesures et les dispositifs à respecter pour le bruit causés par les véhicules automobiles et les moyens de transport, qui sont considérés comme la première source de bruit dans l'environnement⁸ ainsi qu'à réglementer l'émission des bruits⁹ et définir les méthodes d'isolation phonique des constructions¹⁰.

La qualité de l'environnement sonore est aujourd'hui reconnue comme un atout non négligeable à différentes échelles d'intervention. Parmi les personnes interrogées sur les motifs d'insatisfaction de leur logement dans la ville de Constantine, 45% citent le bruit et 42% parlent de l'isolation acoustique comme principal critère de choix de leur future habitation¹¹.

⁶ Augé Marc, « *Au son des villes* », Goethe-Institut Montréal – Arts et Architecture, 2007, (page consultée le 10/03/08). [En ligne], Site : www.goethe.de.

⁷ Arrêté du 25 février 1964 relatif à la lutte contre le bruit excessif

⁸ Arrêté du 4 avril 1972 relatif à la mesure du bruit produit par les véhicules automobiles et aux conditions imposées aux dispositifs dits "silencieux"

⁹ Décret exécutif n° 93- 184 du 27 juillet 1993, JORA n°50 du 28/07/1993 p.10. [En ligne], www.joradp.dz

¹⁰ CNERIB, Document technique réglementaire DTR C3.1.1, *Isolation acoustique des parois aux bruits aériens, Règles de calcul*, Alger 2004

¹¹ Benzagouta- Debache. S, *la conception sonore des bâtiments d'habitations: Cas du logement collectif*, Thèse de Doctorat d'état en Architecture, 2004, p.98

Même si le confort acoustique n'est pas toujours pris en compte dans le domaine de la construction et des aménagements dans notre pays, il est de plus en plus recherché par les algériens qui sont soucieux de leur qualité de vie. Pour la première fois en Algérie, un colloque qui traite du bruit et ses méfaits a été organisé le 29 Mars 2008, son objectif étant de sensibiliser les pouvoirs publics, les entreprises et les citoyens afin d'agir pour réglementer les nuisances sonores. « Dans un cadre de développement durable, nous devons agir sur les pollutions de l'eau et de l'atmosphère, mais aussi sur le bruit. Il y va de la santé de tous les citoyens algériens. Le bruit est aussi une pollution »¹². Les organisateurs du colloque revendiquent l'utilisation de fenêtres à double vitrage et des sols isolants.

Problématique

L'acoustique des lieux d'enseignement est une discipline très spécifique qui a été largement ignorée au cours des dernières décennies. Les nouvelles constructions ou les rénovations ne prennent pas en compte les principes acoustiques courants qui privilégient une intelligibilité optimisée et un isolement par rapport aux bruits de l'environnement extérieur. Ceux qui ont le plus souffert de cette situation, sont les malentendants, les enfants et les enseignants.

En étudiant les effets de la pollution sonore sur les élèves, de nombreux chercheurs attestent que les performances les plus affectées par le bruit, sont celles exigeant un traitement cognitif élevé, comme: l'attention, la résolution des problèmes, la lecture et la mémorisation¹³.

Les effets d'une exposition chronique au bruit sur les enfants sont plus accablants: problèmes comportementaux, désintéressement et perturbation du langage¹⁴.

Des études confirment la corrélation entre l'exposition aux bruits de transport et l'hyperactivité des enfants¹⁵. L'exposition chronique au bruit altère le fonctionnement cognitif et compromet les performances scolaires des enfants.¹⁶

¹² Benkadi Kamel, *Le bruit en Algérie, les insupportables nuisances sonores*, El Watan Algérie, 12 Mars 2008.

¹³ Shield. B et al. *The effects of noise on the attainments and cognitive development of primary school children*, Final report for Department of Health, 2002.

¹⁴ Nelson, P.B; Soli, S.D; Seltz, A. *Acoustical Barriers to Learning*, Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America, 2002. (page consultée le 12.05.11) [En ligne], [http:// www. centerforgreenschools.org /docs/ acoustical-barriers-to-learning.pdf](http://www.centerforgreenschools.org/docs/acoustical-barriers-to-learning.pdf)

¹⁵ Stansfeld, S.A et al, *Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health*, Journal of Environmental Psychology n° 29, 2009, p 203–207 .

¹⁶ Shield. B et Dockrell. J, *The effect of noise on children at school: A review*, Journal Building Acoustics n°10, 2003, p.97-106. [En ligne] <http://www.architecture.com>.

Pour des raisons diverses, mais essentiellement définies par des soucis d'économie, l'espace scolaire est souvent conçu selon un modèle standard stéréotypé. Les salles de classe sont réalisées avec des dimensions fixées selon des normes qui s'appuient essentiellement sur le nombre des occupants et la surface octroyée à chacun. La salle de classe est rectangulaire, limitée par quatre murs : « le mur d'ancrage du tableau et de démonstration de la chaire détient un rôle prééminent vite repérable. Les trois autres côtés se partagent les rôles subalternes aux yeux du protocole scolaire : l'un par les fenêtres et l'éclairage naturel, l'autre pour le passage avec la porte, les trois ensembles pour contenir des bureaux d'élèves souvent resserrés....Un modèle qui induit une représentation de l'école figée... »¹⁷.

Pourtant, le monde scolaire vit actuellement un bouleversement dans les méthodes d'enseignement qui impliquerait automatiquement des sonorités différentes au sein des établissements scolaires.

L'enseignement centré sur l'élève et les nouvelles méthodes d'enseignement (travail de groupe) produisent des scénarios de communication totalement différents, dans la salle de classe, en comparaison de ceux produits par l'enseignement traditionnel.

L'enseignement moderne se fonde davantage sur l'étude partagée et permet délibérément à plusieurs personnes de parler en même temps. De ce fait, le signal sonore d'un groupe de travail devient gênant (interfèrent) pour un autre groupe.

Dans une enquête¹⁸ sur la perception des différents paramètres de confort dans la salle de classe auprès de plus de 1000 élèves du secondaire, la qualité acoustique apparaît comme le facteur qui influence le plus les performances à l'école.

« Aujourd'hui, il est urgent que tous les acteurs impliqués dans la construction et la rénovation des écoles prennent conscience qu'une acoustique optimisée dans les lieux dédiés à l'enseignement permet d'accroître l'intelligibilité et d'améliorer la réussite scolaire de tous les élèves »¹⁹

« Il semble évident à tous qu'une école bien conçue et correctement construite obéît aux deux impératifs suivants : Développement harmonieux de l'être et facilitation de l'action éducative »²⁰

¹⁷ Mouchon Jean, *L'espace de la classe en question*, Technique et Architecture n° 344, novembre 1982

¹⁸ Astolfi. A et Pellerey. F, *Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms*. J. Acoust. Soc. Am. n° 123, 2008, p.163-173. (page consultée le 08/05/11). [En ligne] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18177148>

¹⁹ Scooch San Souci, *Acoustique des salles de classe accueillant les élèves malentendants et normoentendants*, atelier CAPS, ORSAY-2, décembre 2003. (consulté le 19/04/11) [En ligne] :

²⁰ Quilghini Janne, *Exigences pédagogiques et réponses architecturales*, Technique et Architecture n°344, novembre 1982

Les problèmes de bruits dans les établissements scolaires à Constantine n'ont jamais été aussi importants. Ils proviennent de la politique actuelle²¹ qui proclame la construction d'écoles pour répondre à un besoin urgent en infrastructures scolaires sans tenir compte des exigences de confort. L'utilisation croissante de surfaces dures (le verre, l'acier et le plâtre) qui réfléchissent le son et rendent les salles très bruyantes et la tendance générale qui vise la conception d'espaces flexibles et ouverts sans tenir compte des contraintes sonores de l'environnement extérieur.

Les questions qui se posent sont : Est-ce que nos locaux scolaires offrent les conditions de confort acoustique nécessaires au bon déroulement des activités d'apprentissage ? Peut-on s'y exercer, communiquer, réfléchir, apprendre, se documenter, s'exprimer et créer dans des conditions favorables ?

La salle de cours, élément structurant dans la conception des écoles, est un espace autour duquel s'articulent les fonctions d'enseignement et où le confort sonore a des conséquences sur leurs qualités d'usage.

Les bruits perçus dans les classes sont généralement la somme de sources sonores extérieures et intérieures comme le montrent les résultats de plusieurs chercheurs²². Les bruits extérieurs dominants sont le trafic routier. Les bruits intérieurs émanant des couloirs, des espaces adjacents (classes mitoyennes) de la cour de récréation, sont des perturbateurs efficaces pendant les cours.

Un facteur perturbant qui diminue la concentration et la capacité de mémorisation des élèves, ce qui réduit leurs performances d'audition et d'élocution

Alors, dans quelle mesure l'environnement extérieur de nos établissements d'enseignement peut-il influencer le confort acoustique intérieur des salles de cours ?

Tout espace aménagé inclut un confort ou un inconfort acoustique déterminé de deux manières: en fonction de la conception architecturale (conceptions différentes des salles de cours) et en fonction des critères des usagers des lieux (enseignants et élèves) avec une culture et un vécu sonore particulier. Dans quelle mesure la conception architecturale des écoles peut-elle influencer le confort acoustique des salles de cours? Comment les usagers de ces lieux (élèves et enseignants) évaluent-ils ce confort? Et quel est l'impact du bruit sur leur perception et leurs activités?

²¹ Programme Sectoriel de Relance Economique (2000-2003) et le Programme Complémentaire (2004-2005).

²² Nelson, P.B; Soli, S.D; Seltz, A. *Acoustical Barriers to Learning*, Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America, 2002. (page consultée le 12.05.11) [En ligne], [http:// www.centerforgreenschools.org /docs/ acoustical-barriers-to-learning.pdf](http://www.centerforgreenschools.org/docs/acoustical-barriers-to-learning.pdf)

Ainsi, notre recherche a pour but d'évaluer le confort sonore dans les salles de classe et de comparer la qualité acoustique de différents modèles architecturaux situés dans différents environnements sonores, et présentant différentes conceptions et répartitions des salles de cours.

Les hypothèses de travail étant que :

- La conception architecturale des locaux scolaires joue un rôle prépondérant dans la création d'un environnement calme dans les salles de cours.
- Le confort sonore des salles est influencé, en premier lieu par les bruits extérieurs, qui sont les plus gênants pendant les cours.
- Les bruits émanant des espaces adjacents à la salle de classe contribuent à l'augmentation des niveaux sonores intérieurs.
- La somme de ces bruits affecte les activités scolaires.
- La perception subjective des élèves et enseignants confirme les paramètres mesurables.

Méthodologie

La méthodologie d'approche est basée tout d'abord sur l'observation in situ de plusieurs situations sonores; de cette dernière découle la sélection des prototypes qui vont servir comme support du travail expérimental (questionnaires et mesures in situ).

Le travail expérimental s'appuie sur deux volets. Le premier concerne l'évaluation perceptive des ambiances sonores et le deuxième se base sur des mesures acoustiques permettant d'expertiser la qualité acoustique des salles de classe.

➤ Evaluation perceptive, sous forme de questionnaires, destinés aux élèves et enseignants, pour évaluer la gêne due au bruit et l'impact des nuisances sonores sur l'apprentissage et capacités des lycéens et enseignants.

➤ Evaluation objective par les mesures in situ du bruit de fond à l'intérieur et l'extérieur des salles de cours, en complément du calcul de la durée de réverbération. Ceci, afin d'évaluer la performance acoustique des différentes conceptions et l'impact du bruit extérieur sur le confort sonore intérieur des classes.

Pour cela, les indicateurs et indices sonores utilisés sont le niveau de pression acoustique dépassé pendant 90% du temps de mesurage LA90, le niveau sonore maximal L_{Amax} le niveau minimal L_{Amin} et le temps de réverbération TR.

Structure du mémoire

Afin d'atteindre notre objectif de recherche et d'apporter les éléments de réponse à la problématique posée, nous avons structuré ce rapport de recherche comme suit :

Une première partie qui comporte trois chapitres, est basée sur une recherche bibliographique et un état de l'art sur les différents paramètres du confort sonore et son évaluation.

Le premier chapitre porte sur les notions de bases de l'acoustique architecturale, le bruit et ses indicateurs ainsi que ses effets sur l'intelligibilité, les indices de performance acoustique du bâtiment et une synthèse détaillée de la réglementation algérienne de la lutte contre le bruit.

Le deuxième chapitre aborde les stratégies du confort acoustique, l'isolation sonore du bâtiment et la correction acoustique.

Le troisième chapitre, intitulé 'le confort sonore dans les locaux scolaires', traite des spécificités acoustiques des différents espaces du bâtiment scolaire et des aspects réglementaires du confort sonore dans les écoles.

Dans une seconde partie qui porte sur l'étude expérimentale, nous avons présenté les établissements scolaires et salles de classe étudiés, ainsi que la méthodologie d'évaluation du confort sonore, dans un premier chapitre intitulé 'Matériels et méthodes'.

Nous avons, par la suite, exploité les résultats issus de l'enquête de perception et la campagne de mesures, dans le chapitre 'Résultats et discussion'.

Les résultats du questionnaire, distribué aux élèves et enseignants, ont permis de mieux comprendre et de localiser les gênes occasionnées par les nuisances sonores au sein des locaux scolaires.

L'interprétation des mesures du bruit ambiant effectuées à l'intérieur et à l'extérieur des différentes salles de cours, ont permis l'évaluation objective du confort sonore.

La conclusion générale de ce travail synthétise les résultats obtenus et présente les recommandations de la recherche.

Introduction

Toute tentative pour appréhender les phénomènes acoustiques repose sur la maîtrise des connaissances de base rendues possibles grâce aux efforts et recherches de nombreux théoriciens à travers des siècles (tels que Pythagore, Vitruve, Galilée, Lord Raleigh, Helmholtz ou Wallace Sabine). L'acoustique, étant un domaine de la physique qui étudie les sons, il est nécessaire de comprendre comment le son se propage et se transmet pour pouvoir appréhender cette discipline.

Ce chapitre rassemble les notions de base en acoustique du bâtiment telles que les phénomènes liés à la propagation des sons, les phénomènes physiologiques de la perception sonore et la notion de gêne due au bruit ainsi que les indices de performances acoustiques de la construction. En complément, un résumé des textes réglementaires algériens sur la protection contre les nuisances sonores.

1. Composition des sons et du bruit

Le bruit est une sensation auditive considérée comme désagréable ou gênante. Il est caractérisé par sa fréquence (en hertz), son niveau (en décibels, dB ou dB(A)), son spectre et sa durée.

Le son est un mélange de plusieurs ondes sonores (voir caractéristiques de l'onde acoustique en annexe 1). Un son est dit pur quand il est composé d'ondes sinusoïdales périodiques ayant la même fréquence. Les sons purs naturels sont très rares, ils sont essentiellement d'origine électronique (par exemple, tonalité d'un téléphone).

Un son complexe, constitué de différents sons purs, est composé d'ondes périodiques non sinusoïdales. Il peut être décomposé en une somme d'ondes sinusoïdales par une analyse de Fourier¹.

La décomposition d'un son complexe permet ainsi d'extraire une succession de sons sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples d'une même fréquence f appelée fondamentale, les autres fréquences ($2f$, $3f$, $4f$, etc...) étant désignées par harmoniques.

On représente graphiquement le spectre du son en traçant en abscisses les fréquences et en ordonnées l'énergie des harmoniques.

¹ D'après le théorème de Fourier : « Toute fonction périodique non sinusoïdale et continue dans un intervalle de 0 à 2π , peut être décomposée en une somme de fonctions harmoniques de la variable temps dont les fréquences sont les multiples exacts de la fréquence fondamentale la plus basse. »

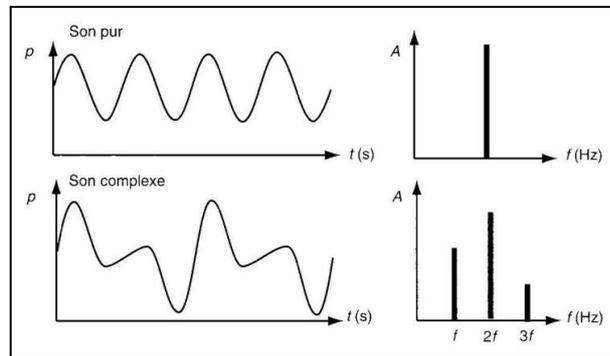


Figure I- 1. Spectre d'un son pur et d'un son complexe (variation de l'amplitude de la pression acoustique en fonction du temps et en fonction des fréquences)

(Source: Mazzuoli-Schrivier Louise, 2007)

Le nombre de fréquences dans un bruit étant très large (contrairement au spectre d'un son périodique qui se compose d'une série définie de fréquences), on mesure le niveau sonore dans des bandes de fréquences très étroites. L'analyse spectrale fréquentielle d'un bruit consiste à représenter les variations des niveaux d'intensité ou de pression acoustique en fonction des fréquences sous forme soit d'histogrammes, soit d'une courbe.

Pour caractériser les bruits, deux notions sont distinguées : la densité spectrale² et le niveau par bande d'octave³.

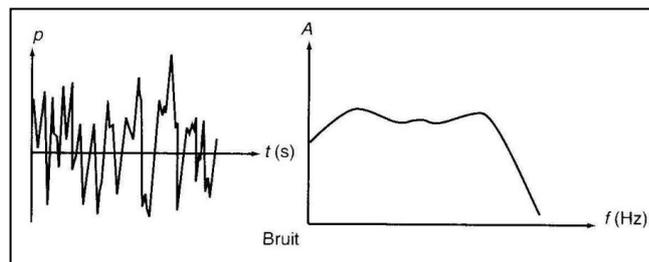


Figure I- 2. Spectres d'un bruit (variation de l'amplitude de la pression acoustique p en fonction du temps t et variation du niveau acoustique A en fonction des fréquences f)

(Source: Mazzuoli-Schrivier Louise, 2007)

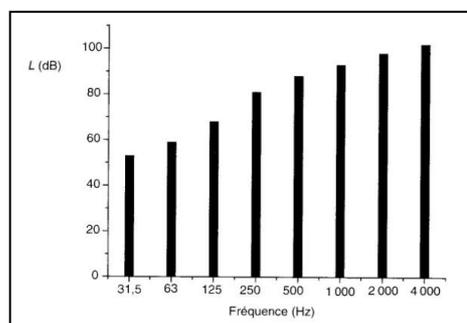


Figure I- 3. Analyse spectrale d'un bruit par bandes d'octave

(Source: Mazzuoli-Schrivier Louise, 2007)

² La densité spectrale est la courbe représentant le niveau dans chaque bande de fréquence.

³ On peut aussi diviser le spectre en bandes larges de fréquences spécifiques. Les bandes utilisées généralement sont appelées *bandes d'octave*. Une bande d'octave est l'intervalle de spectre compris entre deux fréquences f_1 et f_2 telles que f_2 soit le double de f_1

2. Niveau de pression acoustique

La pression acoustique p s'exprime en pascals (N.m^{-2}), elle 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} :

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

La pression acoustique correspondant au son le plus faible que l'oreille humaine peut percevoir est de 2×10^{-5} Pa à 1000 Hz. Ce seuil représente la pression de référence. La pression acoustique maximum que l'on peut supporter, sans dommage pour l'oreille, est de 20 Pa.

Le niveau de pression acoustique L_p s'exprime en décibel (dB). On l'évalue par le logarithme décimal de la fraction de la pression acoustique efficace p sur la pression acoustique de référence p_0 .

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (\text{I.2})$$

3. Propagation du son dans un espace libre

On distingue deux types de sources sonores selon leur émissivité et propagation du son : Les sources sonores dites ponctuelles comme une éolienne, un avion ou un clocher, et les sources sonores linéaires comme le trafic routier.

Dans le cas d'une source sonore ponctuelle, le niveau sonore décroît de 6 dB chaque fois que la distance séparant le point de mesure de la source sonore est doublée. Par contre, pour une source sonore linéaire rectiligne, le niveau sonore décroît de 3 dB par doublement de la distance séparant le récepteur de la source.

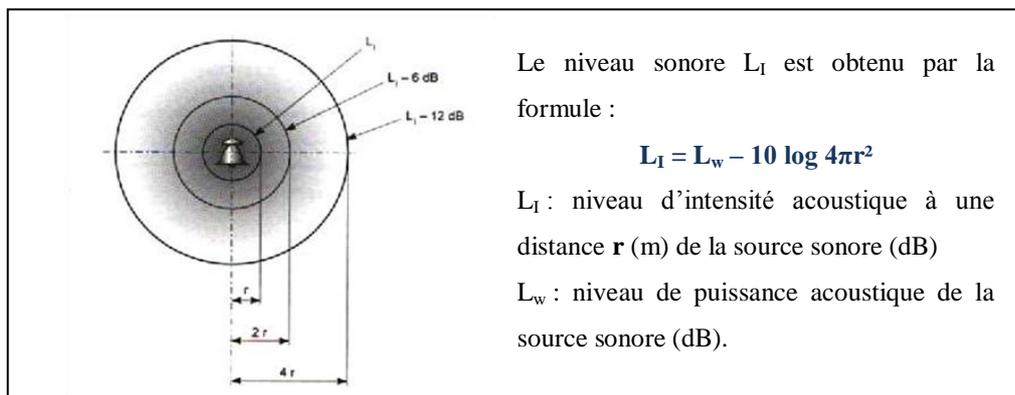
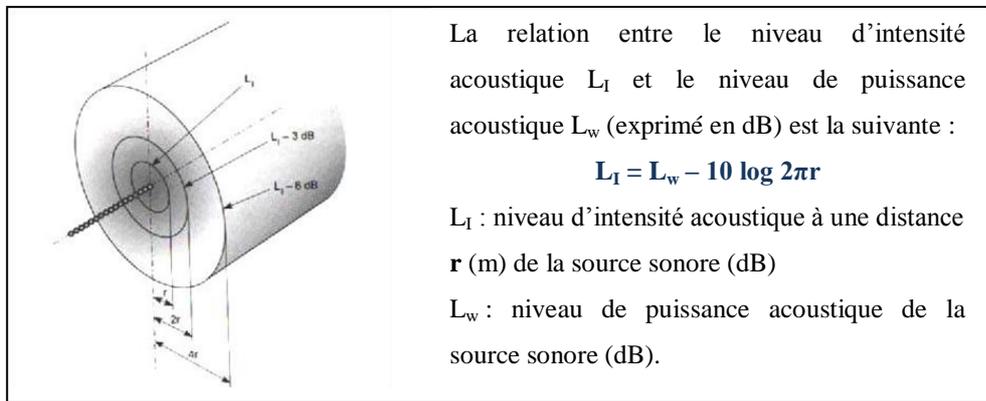


Figure I- 4. Source sonore ponctuelle
 (Source : Hamayon Loïc, 2008. réadaptée par l'auteur)

**Figure I- 5. Source sonore linéaire**

(Source : Hamayon Loïc, 2008. réadaptée par l'auteur)

A l'atténuation du son, due à la distance, s'ajoute l'atténuation atmosphérique. Elle est d'autant plus décelable que la fréquence de la source est élevée. L'expérience montre que pour une fréquence donnée, l'atténuation est maximale pour un taux d'humidité faible (15 à 20%) et une température comprise entre 0 et 15°C⁴. Notamment, des différences allant jusqu'à 6 dB(A) à 400 m de la source sonore et jusqu'à 10 dB(A) à 1 000 m peuvent être relevées entre un jour sans vent et un jour de vent portant.

La propagation des bruits en milieu urbain est tributaire des aménagements, des écrans et reliefs de façade. La nature et la composition des sols séparant la source émettrice et le récepteur jouent un rôle important dans l'atténuation des bruits. Cette atténuation est d'autant plus importante que l'onde sonore est rasante et que la fréquence est élevée. Par contre, l'effet des arbres n'est pas très significatif dans l'amortissement de la propagation des bruits. Sauf s'ils sont plantés derrière un écran anti- bruit (avec la partie feuillue au dessus de ce dernier), le phénomène de redirection de l'énergie acoustique dans les zones d'ombre est diminué.

Dans le cas d'une forêt située entre la source et le récepteur, l'effet principal est d'ordre climatique: la forêt tend à annuler sous sa canopée les effets de variation de température et de vitesse du vent, donc les variations de la vitesse du son. Pour une forêt de 100m de large par une nuit claire, le gain obtenu par rapport au cas d'un site sans arbres peut atteindre 5 dB pour les bruits routiers (Selon Defrance. J, Barrière. N et al, 2002)⁵.

En pratique, l'énergie rayonnée par la source sonore n'est généralement pas la même dans toutes les directions. Les caractéristiques physiques et la nature de la source font que l'énergie est canalisée dans des directions privilégiées, cette propriété est appelée directivité⁶.

⁴ CHAGUE Michel, *L'acoustique de l'habitat*, Edition du Moniteur, Paris, 2001. p.64

⁵ AFSSE, *Impacts sanitaires du bruit - Etat des lieux, indicateurs bruit-santé*, novembre 2004.

⁶ Le facteur de directivité Q d'une source sonore est le rapport de l'intensité acoustique, à l'intensité qui serait produite au même point de l'espace par une source ponctuelle de même puissance.

4. Propagation du son dans un espace clos

Les sons émis à l'intérieur d'un espace fermé subissent différents phénomènes acoustiques, qui dépendent de la nature des surfaces et obstacles dans cet espace, de son volume et aussi des lois de la physique (nature des ondes sonores, fréquences...).

Pour mieux schématiser ces différents phénomènes, nous avons choisi l'illustration suivante qui représente les chemins de propagation du son émis depuis la scène d'un auditorium.

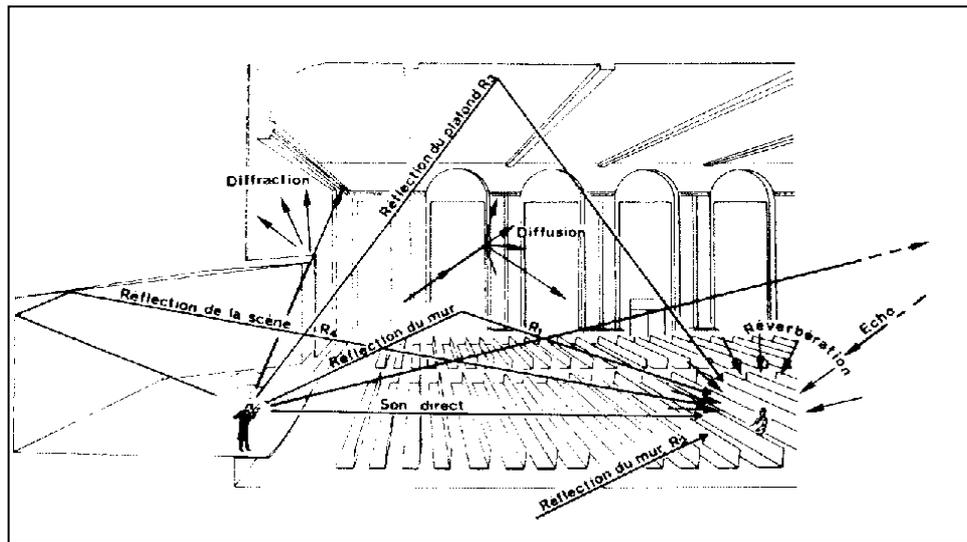


Figure I- 6. Chemins de propagation du son dans une salle
(Source : Fillippini Mikael, 2003)

4.1. Réflexion et absorption du son

Une onde acoustique est déviée de son trajet lorsqu'elle rencontre un obstacle rigide et de grande dimension par rapport à sa longueur d'onde : le phénomène est appelé « réflexion ». L'onde incidente frappe l'obstacle selon un angle φ_i , l'onde réfléchie repart selon un angle φ_r égal à φ_i .

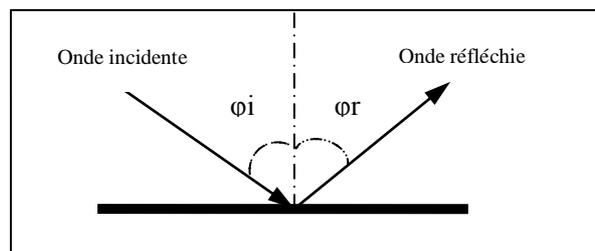
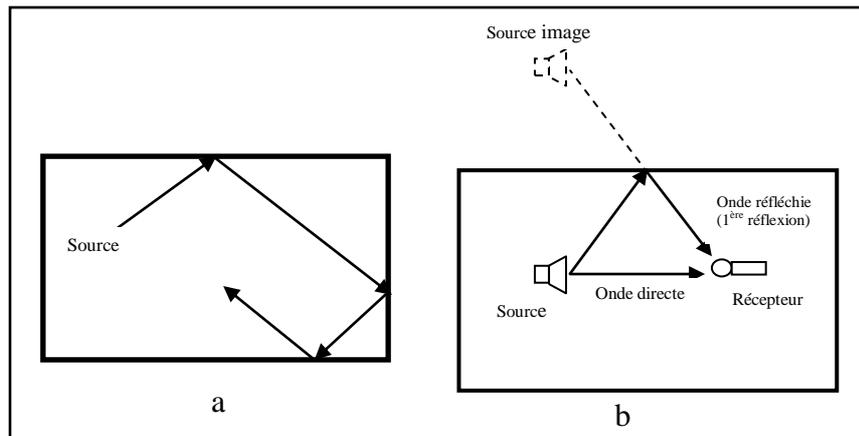


Figure I- 7. Réflexion d'une onde acoustique
(Source : Chagué Michel, 2001)

Le trajet d'une onde sonore est donc prévisible malgré la présence d'obstacle. La méthode utilise les lois de l'optique : l'acoustique est dite « géométrique ».

L'acoustique géométrique permet de déterminer le trajet des différentes réflexions. En fait, tout se passe comme si l'onde réfléchiée était générée par une source virtuelle image, placée de façon symétrique par rapport à la paroi (Figure I- 8).

L'énergie de l'onde réfléchiée dépend de la capacité d'absorption du matériau qui recouvre la surface de l'obstacle. L'*absorption* acoustique dépend en fait du coefficient d'absorption α du matériau.



- a) Réflexions d'une onde sonore sur les parois d'un local
- b) Trajet de réflexion de l'onde sonore, principe de la source image

Figure I- 8. Trajet de réflexion du son dans un espace clos
(Source : Chagué Michel, 2001. Réadaptée par l'auteur)

4.2. Réverbération

La source sonore étant placée à l'intérieur d'un espace clos, l'onde subit une succession de réflexions sur les parois. A chaque réflexion, l'énergie acoustique initiale décroît d'une quantité définie par la capacité d'absorption des différents matériaux qui tapissent les parois de l'espace fermé.

De ce fait, le son émis parvient au récepteur tout d'abord directement, puis après avoir été réfléchi une ou plusieurs fois sur les parois. Si le son, parvenant au récepteur après réflexion, est distinct du son lui parvenant directement, il y a écho. Si le son, parvenant au récepteur après réflexion, n'est pas distinct du son lui parvenant directement, le son semble prolongé, il y a réverbération. La réverbération est donc la persistance d'un son dans un espace clos (ou semi-clos) après interruption brusque de la source sonore.

Champ direct et champ réverbéré

Lorsqu'une onde sonore est émise en continu, par une source à l'intérieur d'un local, elle se réfléchit sur les murs et les surface solides. Au-delà d'une distance de la source appelée *distance critique*, les sons réfléchis sont prépondérants. Un nombre infini de réflexions uniformément réparties dans toutes les directions est alors produit. L'ensemble de ces ondes constitue le champ réverbéré caractérisé par un même niveau de pression sonore en chaque point.

De ce fait, le champ direct occupe l'espace situé à une faible distance de la source, tandis que le champ réverbéré occupe la zone du local où le niveau sonore est quasiment constant.

4.3. Diffraction et réfraction

L'onde sonore est diffractée, lorsque sa longueur d'onde est supérieure à la longueur de l'obstacle. Les sons graves qui ont une longueur d'onde supérieure à celle des sons aigus sont principalement diffractés⁷.

La réfraction est le changement de direction de l'onde quand la vitesse du son n'est pas constante pour tous les points du front d'onde. Le point d'onde se trouve incurvé et dévié du côté où la vitesse est la plus petite. Cela peut être observé si la température du milieu n'est pas uniforme⁸.

La diffusion du son est la répartition des ondes sonores provoquée par tous les changements de direction de celles-ci résultant simultanément des phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffraction.

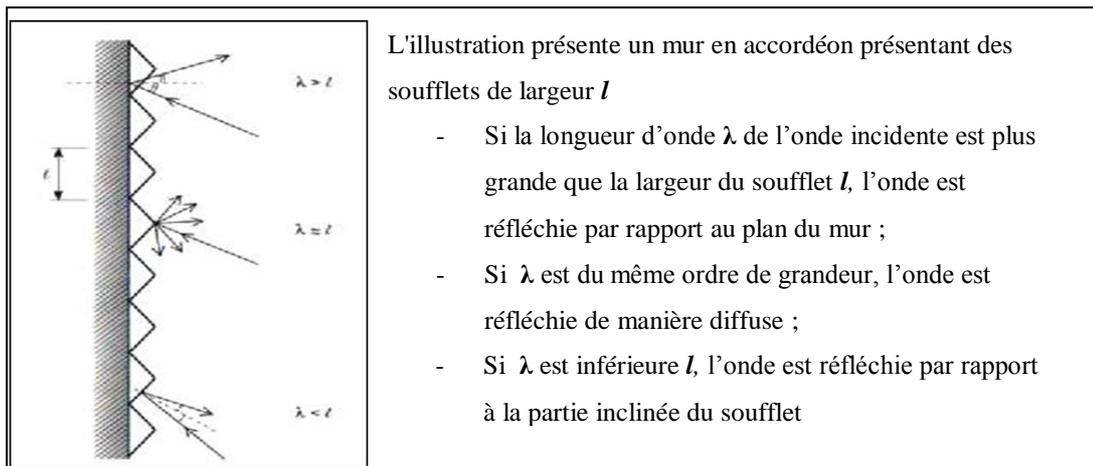


Figure I- 9. Réflexion des sons de différentes longueurs d'onde

(Source : Hamayon Loïc, 2008. réadaptée par l'auteur)

⁷ Le phénomène de diffraction peut également se produire lorsque l'onde sonore rencontre une ouverture de dimension très inférieure à la longueur d'onde de l'onde sonore. Tout se passe alors comme si chaque point de l'ouverture se comportait comme une source acoustique secondaire.

⁸ C'est le cas dans une salle de concert, l'air est plus chaud au niveau du public et le son monte vers le plafond.

4.4. Focalisation du son

La focalisation des sons se produit quand les parois courbes et réfléchissantes concentrent les ondes sonores en un point (appelé foyer) éloigné de la source et symétrique par rapport à celle-ci. En ce point, on observe une augmentation de l'intensité du son qui permet entre autres d'entendre des sons de faible amplitude inaudibles dans le reste de la salle (Figure I- 10).

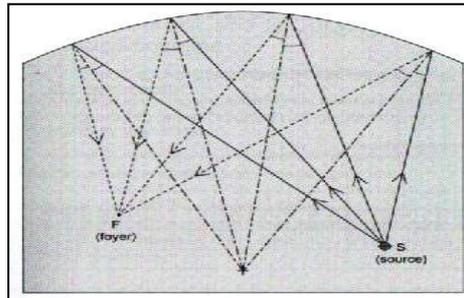


Figure I- 10. Focalisation du son
(Source : Hamayon Loïc, 2008)

4.5. Echos

La réflexion acoustique est à l'origine du phénomène d'écho. L'écho simple est caractérisé par un son pouvant être entendu deux fois. Le son émis revient après réflexion sur un obstacle, si le temps qui s'écoule entre l'émission et le retour est supérieur ou égal à 50 ms, l'écho est perceptible par l'oreille⁹. L'écho flottant (Flutter echo) est une succession très rapide et régulière de sons provenant de la même source placée entre deux surfaces parallèles et réfléchissantes, les autres surfaces étant absorbantes (tels que les couloirs).

4.6. Ondes stationnaires

Les ondes dites stationnaires se forment quand deux ondes de même fréquence et de même amplitude se déplacent sur le même axe de propagation mais en sens inverse¹⁰.

Les ondes sonores se réfléchissant sur deux parois parallèles donnent naissance à des ondes stationnaires quand la distance entre les deux parois est égale à la demi-longueur d'onde du son incident ou à un multiple de cette demi-longueur d'onde¹¹.

⁹ Dans une salle, on cherche à éliminer l'écho. On teste les parois en calculant le temps pour un aller et retour du son après réflexion. Par exemple, si un chanteur se produit dans une salle de 20 mètres de longueur, y aura-t-il risque d'écho créé par la paroi du fond de la salle ? Le temps entre l'émission et la réception est de: $t = 2d/c = 40/340 = 0.117$ s. L'écho est donc perceptible par l'auditeur et la surface doit être traitée.

¹⁰ Hamayon. L, *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments*, le moniteur, Paris, 2008. p.74.

¹¹ $d = n(\lambda/2)$, avec d la distance entre les deux parois (m), λ la longueur d'onde du son incident (m) et n un nombre entier positif (1, 2, 3, 4, etc). On a: $f = c/\lambda$, avec f fréquence d'un son, c sa célérité et λ sa longueur d'onde. On obtient les fréquences de résonance f_r (en Hz), auxquelles les ondes stationnaires se reproduisent (pour une célérité du son dans l'air de 340 m/s): $f_r = 170n/d$

4.7. Ondes en opposition de phase

Deux ondes sont en opposition de phase quand, au même instant, l'une atteint son amplitude maximum et l'autre son amplitude minimum. L'amplitude de l'onde résultante est théoriquement nulle.

Quand on veut réduire un bruit, une des techniques utilisées est le captage de ce bruit par un microphone, il est ensuite réémis, après traitement électronique, en opposition de phase.

5. Indices de performance acoustique

Les indices¹² traduisant les performances acoustique des matériaux de construction ou des dispositifs architecturaux sont: le coefficient d'absorption α , l'aire d'absorption équivalente A , la durée de réverbération Tr , l'affaiblissement acoustique R pour les bruits aériens, isolement acoustique D , efficacité au bruit de choc ΔL et le niveau de pression acoustique du bruit de choc L ¹³.

5.1. Coefficient d'absorption α

L'absorption d'une paroi, et notamment de son matériau de surface, est caractérisée par le coefficient d'absorption α . Il indique l'efficacité de ce matériau à absorber le son.

Le coefficient α est obtenu par le rapport de l'énergie acoustique absorbée à l'énergie acoustique incidente :

$$\alpha = \frac{E_A}{E_I} \quad (I.3)$$

α est compris entre 0 (matériau totalement réfléchissant) et 1 (matériau parfaitement absorbant). Il varie avec la fréquence (il est faible pour les graves et plus élevé pour les aigus), la nature du matériau, l'état de surface et l'angle d'incidence de l'onde sonore.

Le coefficient d'absorption α des matériaux est mesuré en laboratoire. Il est donné par bande de fréquence (octave ou tiers d'octave) sous forme de tableau ou de graphique (voir annexe).

¹² L'*indice* s'applique à une mesure, une description du phénomène physique du bruit, qui prend en compte certains paramètres (fréquences, puissance...); l'indice est purement une expression de forme physique ;
- L'*indicateur* s'intéresse à la relation entre niveaux de bruit (exprimés par un indice) et impacts sanitaires par le biais d'une relation dose-réponse.

¹³ Les indices R , D , ΔL , L , il sont exprimés en dB (A) dans la norme française, ils sont calculés par rapport à un bruit rose ou un bruit route. Cependant, depuis l'an 2000, la normalisation européenne a introduit des indices « uniques » pondérés exprimés en dB. Ils sont symbolisés par l'indice inférieur w (de weight en anglais). Plus les valeurs de ces indicateurs sont élevées plus grandes sont les performances acoustiques du bâtiment.

La norme européenne a introduit l'indice d'évaluation de l'absorption α_w (ou l'indice d'absorption acoustique pondéré). Il permet de caractériser, en une seule valeur (indépendante de la fréquence), l'aptitude d'un matériau à absorber les sons. Cet indice varie entre 0 et 1.

L'évaluation de l'indice α_w est effectuée à partir des valeurs du coefficient α obtenues en laboratoire pour chaque bande de tiers d'octave, comparées avec la courbe de référence définie dans la norme EN ISO 11-654¹⁴. La valeur de l'indice α_w correspond à la valeur à 500 Hz¹⁵.

5.2. Aire d'absorption équivalente A

L'aire d'absorption équivalente A est la valeur de la surface fictive d'une paroi (ou d'un matériau) totalement absorbante ayant la même absorption acoustique que la paroi (ou le matériau) considérée¹⁶. Soit :

$$A = S\alpha \text{ ou } A = S\alpha_w \quad (\text{I.4})$$

A : air d'absorption équivalente en m² ; S : surface de la paroi en m² ; α :coefficient d'absorption ; α_w : indice d'absorption acoustique pondéré

Si la paroi est composée de plusieurs éléments de surfaces $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ ayant des matériaux différents, donc des coefficients d'absorption différents $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$

L'aire d'absorption équivalente totale est la somme des aires d'absorption des différentes surfaces constituant la paroi ; on peut donc écrire :

$$A_{totale} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n = \sum_{n=1}^n \alpha_n S_n \quad (\text{I.5})$$

¹⁴ Pour avoir la méthode détaillée du calcul des indices uniques selon la réglementation européenne, on peut se référer au livre de Chagué Michel « L'acoustique de l'habitat - principes fondamentaux, application de la réglementation française et européenne », Le Moniteur, 2001.

¹⁵ Selon la norme, l'indice α_w peut être accompagné d'un ou plusieurs indicateurs de forme noté **L**, **M** et **H**, lesquels donnent une indication sur la plage de fréquence où le matériau est particulièrement absorbant (où les valeurs d'absorption excèdent celles de la courbe de référence). **L** pour les fréquences basses (250 Hz), **M** pour les fréquences moyennes (500 et 1000 Hz) et **H** pour les aigues (2000 et 4000 Hz).

¹⁶ Par exemple, une paroi de 40 m² composée d'un matériau dont le coefficient d'absorption $\alpha = 0,25$, est équivalente à une paroi de 10 m² composée d'un matériau parfaitement absorbant (un matériau dont le coefficient $\alpha = 1$). Dans ce cas, 10 m² correspond à l'« aire d'absorption équivalente » de la paroi de 40 m² ayant un coefficient d'absorption α de 0,25.

5.3. Durée de Réverbération

La durée de réverbération T_R d'un local est le temps que met le son pour que son niveau d'intensité diminue de 60 dB *après interruption de la source sonore*, ce qui correspond à une intensité de $1/10^6$ de l'intensité initiale de la source sonore. Elle est exprimée en secondes. Elle dépend du volume de la salle et des qualités absorbantes des surfaces.

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

$$T_R = 0,16 \frac{V}{A} \quad (I.6)$$

Où : T_R : Temps de réverbération en secondes (s), V : le volume du local en mètre cube (m³),

A : l'aire d'absorption équivalente en mètre carré (m²).

La formule de Sabine est basée sur deux hypothèses selon lesquelles : l'énergie est uniformément répartie (champ diffus homogène) et l'absorption est continue et homogène.

D'autres formules (formules de Eyring, Millington et Pujolle) ont été proposées mais dans la pratique, la formule de Sabine est unanimement appliquée.

Intensité et pression acoustique du champ réverbéré

En un point d'un local, il y a superposition de deux niveaux sonores, celui dû au champ direct et celui dû au champ réverbéré.

L'intensité acoustique du champ réverbéré I_{rev} étant indépendante de la position du récepteur et de la directivité de la source, elle est obtenue par la formule suivante :

$$I_{rev} = \frac{P_w}{A} \quad (I.7)$$

Avec P_w la puissance de la source et A l'aire d'absorption équivalente.

Le niveau d'intensité réverbérée $L_{I,rev}$ en dB est alors :

$$L_{I,rev} = 10 \log \frac{P_w}{A \cdot 10^{-12}} \quad (I.8)$$

La relation entre l'intensité acoustique et la pression acoustique s'écrit :

$$I_{rev} = \frac{p_{rev}^2}{4 \cdot \rho \cdot c} = \frac{p_{rev}^2}{4 \times 400} \quad (I.9)$$

Avec p_{rev} la pression acoustique du champ réverbéré, ρ la masse volumique de l'air en kg/m³ et c la célérité du son en m/s.

Le niveau de pression réverbérée est donc :

$$L_{P,rev} = L_{Pw} - 10 \log A + 6 \quad (I.10)$$

Avec $L_{P,rev}$ le niveau de pression réverbérée (dB), L_{Pw} le niveau de puissance acoustique de la source (dB) et A l'aire d'absorption équivalente (m^2).

5.4. Indice d'affaiblissement acoustique aux bruits aériens

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. Il est exprimé en dB, est obtenu par la formule suivante :

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (I.11)$$

Où : τ : facteur de transmission de la paroi $\tau = \frac{E_T}{E_I}$,

E_T : énergie transmise par unité de surface (w/m^2) ; E_I : énergie incidente par unité de surface (w/m^2).

Plus R est élevé, plus la paroi est isolante

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 élevé¹⁷.

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 élevé¹⁸. 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 est de 100 kg/m^2

¹⁷ A une fréquence donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique R augmente d'environ 4 dB lorsque la masse surfacique de la paroi est doublée. Ex: A 500 Hz, une paroi simple de 100 kg/m^2 à un indice R de 40 dB. Pour la même fréquence, R est de 36 dB pour une paroi de 50 kg/m^2 et de 44 dB pour une paroi de 200 kg/m^2 .

¹⁸ Pour une paroi de masse donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique R augmente de 4 dB lorsque la fréquence du son incident est doublée. Ex: Une paroi simple de 100 kg/m^2 ayant un indice R de 40 dB à 500 Hz, a un indice de 44 dB à 1000 Hz et 48 dB à 2000 Hz. (L'indice augmente de 4 dB par octave).

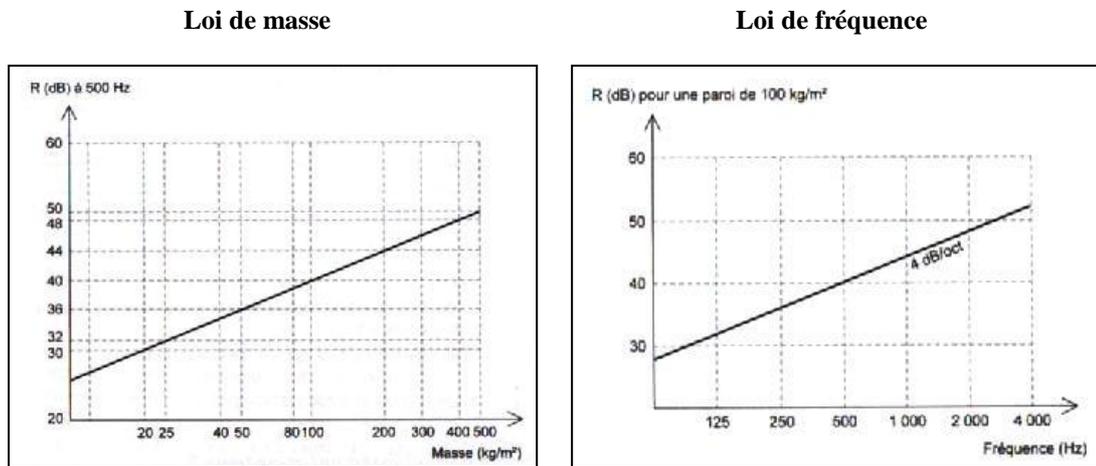


Figure I- 11. Lois expérimentales de masse et de fréquence.
(Source : Loïc Hamayon, 2008)

Quand l'onde sonore frappe la paroi sous une incidence oblique avec une fréquence correspondant à un mode propre de vibration de la paroi, appelée *fréquence critique* f_c , il se produit une chute de l'indice d'affaiblissement acoustique¹⁹ (due à la propagation d'une onde de flexion le long de la paroi).

Le tableau suivant montre la fréquence critique de quelques matériaux usuels:

Tableau I- 1. Valeurs des fréquences critiques des matériaux du bâtiment (Source : Hamayon, 2008)

<i>Matériaux</i>	<i>Masse volumique (kg/ m³)</i>	<i>f_c pour 1 cm d'épaisseur(Hz)</i>
Acier	7800	1000
Aluminium	2700	1300
Béton	2300	1800
Bois (sapin)	600	6000 à 18000
Plâtre	1000	4000
Polystyrène expansé	14	14000

Remarque : La fréquence critique est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi. Pour déterminer la fréquence critique d'une paroi homogène, il faut diviser la fréquence donnée dans le tableau par l'épaisseur de la paroi (en cm).

¹⁹ L'amplitude de la décroissance de R dépend de la rigidité du matériau. Elle peut varier de 3 à 10dB :
- Matériaux rigides comme l'acier, l'aluminium, le verre et la brique : la chute est d'environ 10 dB ;
- Matériaux semi-rigides : Béton, plâtre, bois : 6 à 8 dB ;
- Matériaux mous comme le liège, le caoutchouc, le plomb : 3 à 4 dB.

Calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi simple

Les formules empiriques du tableau suivant nous permettent d'évaluer l'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi de masse surfacique m_s exposée soit à un bruit route, soit à un bruit rose. Les abaques (figure I.12) peuvent être aussi utilisés.

Tableau I- 2. Evaluation de l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré pour des parois de masse surfacique m_s exposées à un bruit route ou un bruit rose (Source : Loïc Hamayon, 2006)

<i>Bruit rose</i>	<i>Bruit route</i>
$50 \text{ kg/m}^2 \leq m_s < 150 \text{ kg/m}^2$	$50 \text{ kg/m}^2 \leq m_s < 150 \text{ kg/m}^2$
$(R_w+C) = (17 \log m_s) + 3 \text{ dB}$	$(R_w+C_{tr}) = (13 \log m_s) + 9 \text{ dB}$
$150 \text{ kg/m}^2 \leq m_s \leq 700 \text{ kg/m}^2$	$150 \text{ kg/m}^2 \leq m_s \leq 670 \text{ kg/m}^2$
$(R_w+C) = (40 \log m_s) - 47 \text{ dB}$	$(R_w+C_{tr}) = (40 \log m_s) - 50 \text{ dB}$
$m_s > 700 \text{ kg/m}^2, (R_w+C) = 67 \text{ dB}$	$m_s > 670 \text{ kg/m}^2, (R_w+C_{tr}) = 63 \text{ dB}$

Pour $m_s < 50 \text{ kg/m}^2$, l'indice R_w est déterminée par des essais en laboratoire.

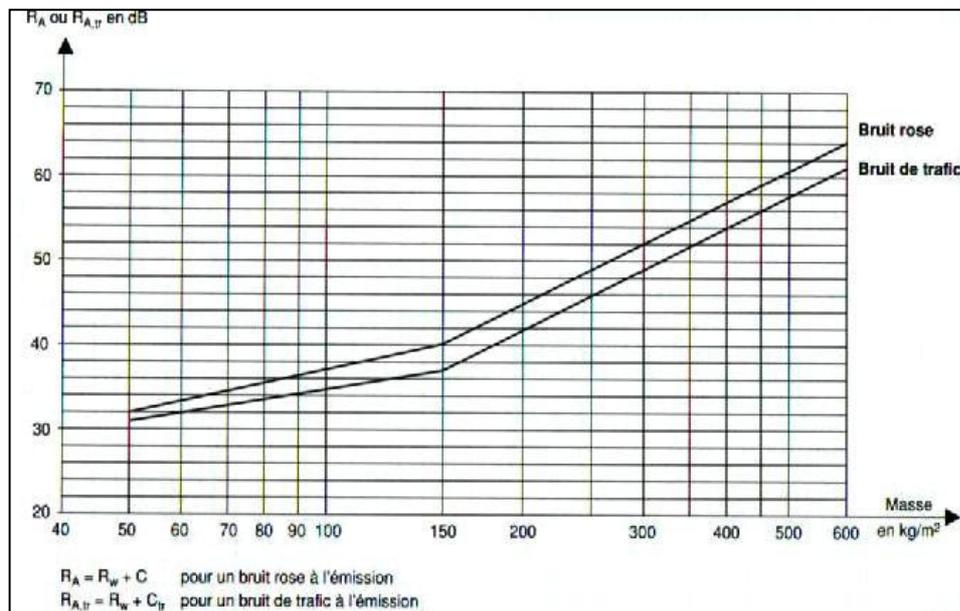


Figure I- 12. Courbes expérimentales de variation de l'indice d'affaiblissement acoustique R en fonction de la masse surfacique de la paroi

(Source : Loïc Hamayon, 2006)

La méthode de calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi composée de plusieurs éléments (mur, porte, fenêtre) est en annexe 2.

Indices d'affaiblissement acoustique pondérés R_w , R_A et $R_{A,tr}$

Dans la norme européenne, l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré d'une paroi est caractérisé par une valeur unique²⁰ R_w (dB). L'indice R_w est déterminé en comparant les valeurs mesurées par tiers d'octave (16 bandes de tiers d'octave entre 100 et 3150 Hz) à une courbe de référence donnée par la norme²¹.

L'indice R_w est accompagné de deux termes d'adaptation, C et C_{tr} , le premier par rapport à un bruit rose, le second par rapport à un bruit de trafic, soit respectivement $(R_w+C)=R_A$ et $(R_w+C_{tr})=R_{A,tr}$

Ces termes d'adaptation peuvent être déterminés dans plusieurs intervalles par tiers d'octave entre 50 et 4000 Hz. On note dans les rapports d'essais en laboratoire, entre parenthèses à côté de R_w les termes d'adaptation avec en indices la bande de fréquence considérée.

Exemple : $R_w (C_{100-4000}; C_{tr, 100-4000}) = 40 (-2; -5)$, signifie que $(R_w + C) = 40 - 2 = 38$ dB et que $(R_w + C_{tr}) = 40 - 5 = 35$ dB

5.5. 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 :

$$D_b = L_1 - L_2 \quad (I.12)$$

Ou
$$D_b = R + 10 \log \frac{A}{S_p} \quad (I.13)$$

Avec R : indice d'affaiblissement acoustique de la paroi séparative (dB); 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 séparative²²; des transmissions latérales par les parois liées à la paroi séparative, surtout si les parois latérales sont légères et rigides (cloisons de carreaux de plâtre, de blocs de béton creux, ou de brique creuses) liées à une paroi séparative lourde ; du volume du local de réception²³; de l'aire d'absorption équivalente du local de réception (phénomènes de réverbération qui amplifient le niveau de pression acoustique du local de réception).

²⁰ **Valeur unique** ou **indice unique**: concept introduit depuis 2000 par la normalisation européenne dans un souci de simplifier l'élaboration des cahiers de charges, les procédures de contrôle et de calcul. L'indice unique qualifie la performance acoustique des matériaux et des bâtiments.

²¹ La norme EN ISO 717 pour les valeurs uniques, donne des courbes de références pour obtenir les indices uniques à la fréquence centrale (500 Hz) après translation des courbes de mesures sur les courbes de références.

²² l'isolement est amélioré de 2 à 3 dB si la surface commune à deux locaux est divisée en deux.

²³ l'isolement croît de 2 à 3 dB chaque fois que volume du local de réception est doublé.

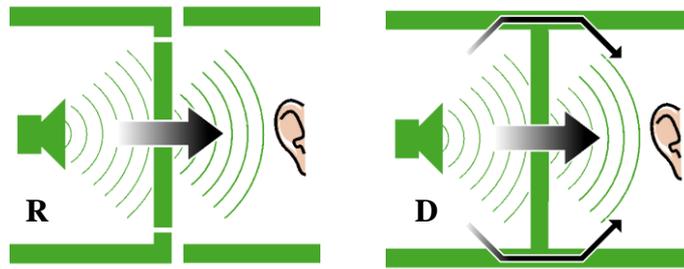


Figure I- 13. Différence entre isolement D et affaiblissement R
(Source: Lafarge, 2010)

Le local de réception pouvant être aménagé ou vide, une correction de la valeur du niveau de pression acoustique du local de réception est ajoutée afin de s'affranchir de la réverbération et de prendre en compte que l'effet de transmissions (directes, latérales ou parasites). On a ainsi défini pour les mesure *in situ* deux indices exprimé en dB, un indice d'isolement normalisé D_n et un indice d'isolement standardisé D_{nT} en comparant les caractéristiques du local de réception à celle d'un local de référence.

Isolement acoustique normalisé D_n :

Le terme correctif est défini par comparaison de l'aire d'absorption équivalente A du local de réception avec l'aire d'absorption acoustique A_0 de référence fixée à 10 m^2 :

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{10} \quad (\text{I.14})$$

Isolement acoustique standardisé D_{nT}

Le facteur correctif est défini par rapport au temps de réverbération T_0 de référence fixé à $0,5 \text{ s}$ pour les établissements d'enseignement et les bâtiments d'habitation :

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{0,5} \quad (\text{I.15})$$

Isolement acoustique standardisé pondéré $D_{nT,w}$, $D_{nT,A}$, $D_{nT,A,tr}$

Dans la normalisation française, l'isolement d'un local est évalué par l'isolement acoustique D_{nT} exprimé en dB(A) soit par rapport à un bruit rose ou par rapport à un bruit route ; les indice pondérés sont symbolisées respectivement par $D_{nT,A}$ (Isolement entre deux locaux) et $D_{nT,A,tr}$ (isolement vis-à-vis de l'espace extérieur)

Le passage de ces indices à l'indice unique $D_{nT,w}$ exprimé en dB imposé par la normalisation européenne est obtenu par l'utilisation de deux terme correctifs (C et C_{tr}) :

$$D_{nT,A} = D_{nT,w} + C \quad (\text{pour un bruit rose}) \quad (\text{I.16})$$

$$D_{nT,A,tr} = D_{nT,w} + C_{tr} \quad (\text{pour un bruit route}) \quad (\text{I.17})$$

Les valeurs mesurées sont comparées aux valeurs d'une courbe de référence dans la gamme 100 à 3150 Hz, la valeur unique étant déterminée à 500 Hz

5.6. Indice de réduction du niveau de bruit de choc ΔL

L'indice de réduction du niveau de bruit de choc ΔL ²⁴ permet d'évaluer l'efficacité d'isolation d'un revêtement ou d'un système flottant. Il est mesuré en laboratoire²⁵. La réduction du niveau de bruit de choc ΔL correspond à la différence arithmétique des niveaux de pression acoustique des bruits de choc normalisé²⁶ régnant dans le local avant et après pose d'un revêtement de sol ou d'un sol flottant. Plus ΔL est élevé, meilleure est la performance du revêtement.

5.7. Niveau de pression acoustique du bruit de choc

Comme pour l'isolement acoustique D , on définit un niveau de pression du bruit de choc normalisé L_n et un niveau de pression du bruit de choc standardisé L_{nT} . Ils sont obtenus par comparaison avec un local de référence en considérant soit les aires d'absorption équivalente en m^2 soit les temps de réverbération du local où se font les mesures et du local de référence :

$$L_n = L_p - 10 \log \frac{A}{A_0} = L_p - 10 \log \frac{A}{10} \quad (I.18)$$

$$L_{nT} = L_p + 10 \log \frac{T}{T_0} = L_p + 10 \log \frac{T}{0,5} \quad (I.19)$$

La norme européenne définit l'indice unique $L'_{nT,w}$ qui est le niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé²⁷ exprimé en dB. Plus $L'_{nT,w}$ est petit, meilleure est la performance vis-à-vis des bruits de choc.

$L'_{nT,w}$ dépend de l'efficacité du revêtement de sol ou de la dalle flottante (caractérisée par l'indice de réduction du niveau de bruit de choc pondéré ΔL_w); la qualité du plancher support (qui dépend de l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré (R_w+C)). Plus ce dernier est élevé, meilleure est la performance acoustique vis-à-vis des bruits de choc); le volume du local recevant le bruit (plus il est grand meilleure est la performance vis-à-vis des bruits de choc); les transmissions latérales par les cloisons et les doublages limitant le local de réception; et la position du local de réception par rapport au local d'émission.

²⁴ L'indice unique correspondant est ΔL_w exprimé en dB (norme européenne). Il est obtenu à 500 Hz par comparaison de la courbe des valeurs mesurées entre 100 et 3150 Hz avec la courbe de référence.

²⁵ le revêtement à tester est posé sur un plancher de référence (une dalle pleine en béton d'une épaisseur de 14 cm et de masse volumique de 350 kg/m³) et sa performance est testée par une machine à chocs normalisé.

²⁶ Les niveaux de pression sont relevés par bande d'octave ou de tiers d'octave à plusieurs emplacements afin d'obtenir la réduction moyenne du niveau de bruit de choc.

²⁷ Il est obtenu à 500 Hz par comparaison d'une courbe de référence avec la courbe des valeurs de L_{nT} mesurées dans les bandes d'octave entre 125 et 2000 Hz.

Le niveau de pression pondéré du bruit de choc normalisé $L_{n,w}$, il permet de caractériser par une seule valeur l'isolement des planchers contre les bruit de choc. Il est exprimé en dB et mesuré dans une chambre d'essai en éliminant toutes les transmissions latérales (figure I-14).

$L_{n,w}$ varie en fonction de la masse surfacique du plancher (épaisseur du plancher) dans le cas d'une dalle pleine en béton armé ; et l'indice d'affaiblissement acoustique (Rw+C) pour le plancher à corps creux.

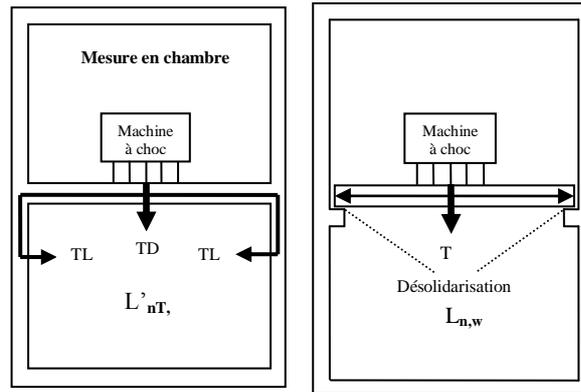


Figure I- 14. Différence entre $L'_{nT,w}$ et $L_{n,w}$ (Source : Hamayon, 2008)

Tableau I- 3. Tableau récapitulatif des différents indices

(source: Louise Schriver-Mazzuoli, 2007)

Mesures en laboratoire - Performance des produits		
	Anciens indices	Nouveaux indices (valeur unique)
Indice d'affaiblissement acoustique	R_A en dB(A) _{rose} $R_{A, tr}$ en dB(A) _{route}	R_w (C, C _{tr}) en dB
Niveau de pression du bruit de choc	L_{nAT} en dB(A)	$L_{n,w}$ (normalisé) en dB
Réduction de niveau du bruit de choc	ΔL en dB(A)	ΔL_w en dB
Coefficient d'absorption acoustique		α_w
Mesure in situ - Performance du bâtiment		
Isolement acoustique standardisé	$D_{nT, A}$ en dB(A) (bruit rose) $D_{nT, A, tr}$ en dB(A) (bruit route)	$D_{n, w}$ (C) en dB $D_{n, w}$ (C _{tr}) en dB
Niveau de pression acoustique du bruit de choc	L_{nAT} en dB(A)	$L'_{AT, w}$ en dB normalisé $L'_{n, w}$ en dB standardisé
Aire d'absorption équivalente	A en m ²	A en m ² = $\alpha_w \cdot S$

Les méthodes de mesure in situ des différents indices de performance sont en annexe 3

6. Perception auditive, bruit et gêne sonore

L'oreille humaine perçoit l'onde sonore, qui est caractérisée par des grandeurs physiques: amplitude, fréquence et spectres, à travers des sensations physiologiques: intensité, hauteur tonale et timbre (voir annexe 4 système et processus d'audition).

Les sons audibles par l'homme sont générés par des fréquences comprises entre 20 et 20000 Hz ²⁸.

La hauteur d'un son dépend de la fréquence: on distingue les sons graves correspondant aux basses fréquences, les sons médiums et les sons aigus correspondant aux hautes fréquences.

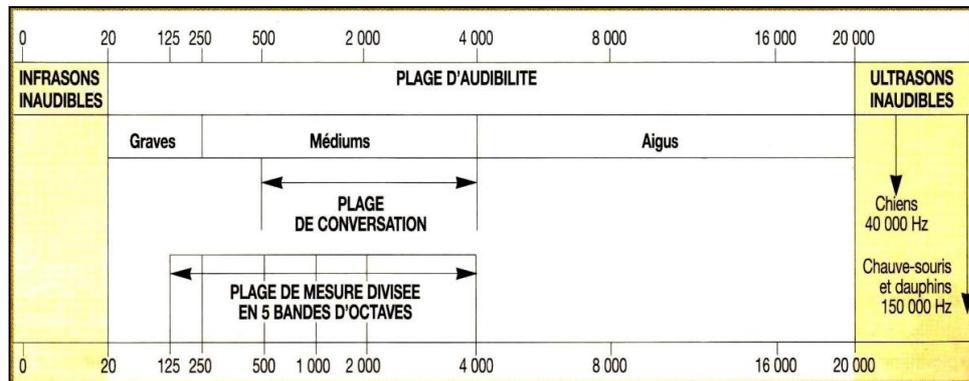


Figure I- 15. Echelle de fréquences audibles

(Source : Les cahiers techniques du bâtiment, n°168, jan fév. 1996)

Dans le domaine du bâtiment, seule est prise en compte une plage réduite de fréquences, décomposées en six bandes d'octave²⁹ centrées sur les valeurs suivantes : 125 – 250 – 500 – 1000 – 2000 – 4000 Hz³⁰.

La fréquence des sons émis intéresse le secteur du bâtiment pour deux raisons essentielles : la qualité isolante des parois et la sensibilité de l'oreille humaine qui ne sont pas les mêmes pour toutes les fréquences.

²⁸ La limite supérieure des fréquences audibles est différente chez les animaux : 150 000 Hz pour les dauphins, 80 000 Hz pour les chiens, 40 000 Hz pour les chats, 4 000 Hz pour les poissons rouges. Les ultrasons de fréquence supérieure à 20 000 Hz et les infrasons de fréquence inférieure à 20 Hz ne sont pas audibles par l'homme. Cependant, les infrasons peuvent affecter notre santé.

²⁹ L'octave est l'intervalle compris entre deux fréquences dont l'une est le double de l'autre.

³⁰ Cette plage est également décomposée en dix-huit bandes de tiers d'octave allant de 100 à 5000 Hz, et même en seize bandes de tiers d'octave allant de 100 à 3150 Hz pour les textes européens.

6.1. Champ auditif

Le champ auditif de l'oreille humaine est représenté par le graphe de Wegel (fig.I-16). Il est limité par deux courbes: La courbe inférieure correspond au seuil d'audibilité³¹ et la courbe supérieure au seuil de douleur³². La sensibilité de l'oreille humaine n'est pas la même à toutes les fréquences. On perçoit mieux les sons aigus que les sons graves³³.

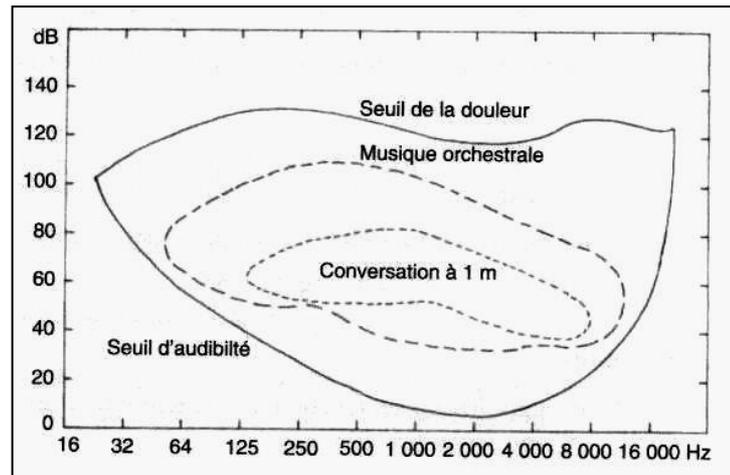


Figure I- 16. Champ auditif (graphique de Wegel)

(Source : Schriver-Mazzuoli Louise, 2007)

Cependant, la meilleure sensibilité est observée entre 500 et 5000 Hz. Les sons, émis par la voix humaine, se situent entre 125 et 8000 Hz lors d'une conversation. A 1 mètre, la voix est perçue à partir de 50 dB pour les sons graves et à partir de 40 dB pour les sons les plus aigus. Dans les mots, les voyelles ne contribuent que de 5% dans la constitution du mot bien qu'elles soient plus audibles que les consonnes de fréquences plus élevées.

6.2. Courbes d'isophonie

La sonie est l'intensité sonore perçue par l'oreille. A ne pas confondre avec l'intensité physique du son mesurée en décibels³⁴, la sonie est un paramètre psychoacoustique qui varie avec le niveau sonore, la fréquence, la nature et la durée des sons.

³¹ Le **seuil d'audibilité** : la limite inférieure de la perception sonore ; ce seuil le niveau minimal de pression efficace (pression efficace= pression de référence= $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) produisant une sensation auditive à une fréquence donnée. 0 décibels est le seuil d'audibilité à 1000 Hz

³² Le **seuil de douleur** : représente le niveau de pression efficace au-delà duquel la sensation produite est celle de la douleur. Le seuil de douleur se situe aux alentours de 120 dB.

³³ Un son de fréquence 1000 Hz et de niveau d'intensité 40 dB paraît moins fort qu'un son de fréquence 300 Hz et de niveau d'intensité 49 dB.

³⁴ Afin de réaliser une mesure représentative du niveau physiologique à l'aide du sonomètre, il est nécessaire d'introduire une correction qui reproduit sensiblement les courbes d'égale sensation de l'oreille. Les courbes représentant les corrections apportées par les filtres, en fonction des fréquences, sont appelées courbes de pondération. La principale étant la courbe de pondération A, le niveau mesuré s'exprime alors en dB(A).

Fletcher et Munson³⁵ ont tracé des courbes d'isonomie (Figure I.17), c'est-à-dire des courbes d'égale sensation sonore à toutes les fréquences.

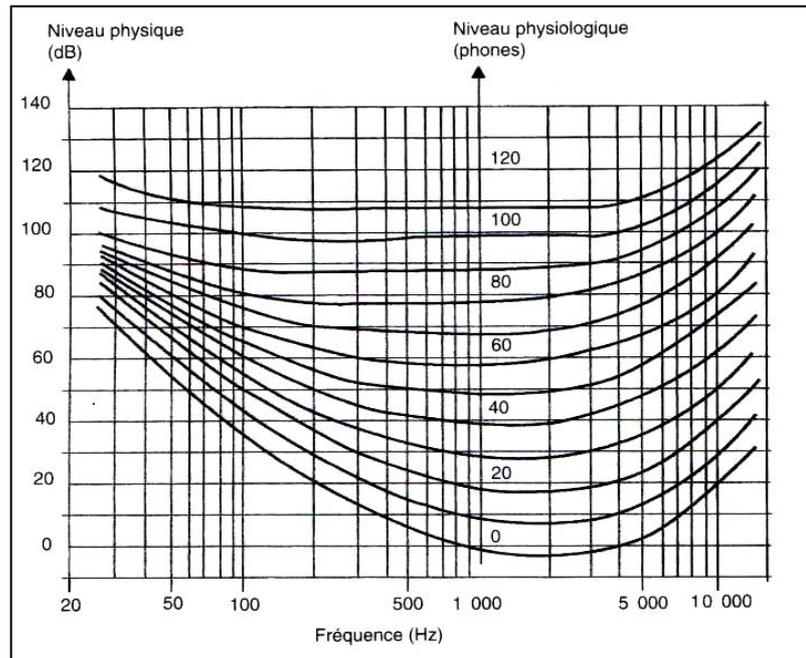


Figure I- 17. Courbes d'isonomie
 (Source : Schriver-Mazzuoli Louise, 2007)

Les niveaux d'isonomie sont exprimés en phones. Les phones correspondent à la pression acoustique d'un son pur à 1000 Hz. Il n'y a donc qu'à cette fréquence que le nombre de phones est égal à la pression acoustique émise en décibels. Par exemple, si on considère la courbe d'isonomie de 60 phones (60 dB à 1000 Hz), on lit, sur l'ordonnée du graphique, qu'à une fréquence de 100 Hz, l'intensité acoustique devant être émise pour obtenir la même sensation auditive qu'à 1000 Hz doit être de 70 dB.

6.3. Notion de gêne sonore

Le bruit peut avoir des effets traumatiques sur l'audition, des effets non traumatiques sur l'ensemble de l'organisme (troubles du sommeil, de la sphère végétative, du système endocrinien et immunitaire, troubles cardiaques et mentaux) (voir détail en annexe 5), des effets subjectifs (gêne due au bruit, effets du bruit sur les attitudes et les comportements, effets sur les performances, effets sur l'intelligibilité de la parole).

Les effets du bruit dépendent de son intensité, sa durée, sa fréquence ainsi que de sa nature. (annexe 6)

³⁵ Fletcher et Munson, deux chercheurs ont étudié, en 1930, la relation entre la sonie et la puissance sonore.

L'expérience portait sur des personnes âgées entre 18 et 25 ans, en émettant un son pur à 1000 Hz de pression connue, on modifie la fréquence en gardant la même durée d'émission et on cherche la pression acoustique à appliquer pour que ces personnes ressentent la même sensation qu'à 1000 Hz

La gêne sonore est un effet psychologique associé au bruit³⁶, dépendant de la perception subjective du bruit et sa tolérance qui varient d'un individu à l'autre. La relation entre la gêne et l'intensité physique du bruit est variable suivant de nombreux facteurs :

- Facteurs sociaux : style et niveau de vie, profession, niveau d'éducation ;
- Facteurs individuels : état de santé, âge, sexe, sensibilité au bruit ;
- Facteurs de situation : nature du bruit, temps d'exposition, impact sur l'activité, bruit subit ou volontaire....

En dehors des effets traumatiques du bruit sur l'audition, la gêne sonore est subjective dépendant des caractéristiques de la personne qui subit les bruits. Ces derniers sont d'autant plus gênants quand ils sont incontrôlables, répétitifs, provoqués par autrui, subis pendant des activités de concentration ou moments de repos.

Pour mieux expliquer le paradoxe à l'égard du ressenti face au bruit, nous donnons l'exemple de deux sources de bruit pouvant avoir la même intensité et pourtant seront subies différemment; le passage d'un train ou d'un avion alors que deux personnes conversent, les oblige à élever la voix. La même conversation, à proximité d'une cascade, demandera un effort de la voix identique. Dans le premier cas le bruit est fluctuant, intermittent et psychologiquement ressenti comme une gêne; dans le second, il est stable, continu mais accepté comme naturel.

Si quantitativement le niveau de pression exercé sur l'oreille est le même, qualitativement la perception de la gêne est différente.



Figure I- 18. Maison sur la cascade
(Source: www.wikipédia.org)



Figure I- 19. Fontaines de Carouge (Genève)
(Source : <http://lucebrera.canalblog.com>)

Les bruits naturels ne sont pas toujours acceptés, nous donnons l'exemple de la maison sur la cascade de F.L.Wright (fig.I-18), qui est appréciée par certains et refusée par d'autres. Les fontaines de Carouge (Genève) par G.Brera (fig.I-19), qui sont pour les habitants des immeubles voisins une

³⁶ Le bruit étant différencié du son généralement par « une sensation auditive désagréable ou gênante », il désigne une *nuisance sonore*.

bonne solution pour atténuer le bruit du trafic, cependant quelques habitants trouvent le bruit de l'eau qui tombe insupportable³⁷.

La gêne auditive dépend d'une part des paramètres physiques du bruit (niveau d'intensité, spectre de bruit, durée et nature du bruit, émergence par rapport au bruit ambiant), d'autre part des paramètres physiologiques et psychosociologiques.

6.4. Indicateurs de la gêne sonore

Le décibel reste, à ce jour, l'unité de mesure exprimant un niveau énergétique la plus utilisée pour la mesure du bruit, comme phénomène physique simple. À partir de cette grandeur, sont calculés des indicateurs³⁸ plus complexes qui modélisent la gêne ressentie (laquelle varie en fonction de l'heure, la nature de la source).

On distingue deux grandes catégories de descripteurs (ou indicateurs) de bruit :

- Les descripteurs énergétiques intégrés : ils prennent en compte le cumul des bruits sur une période donnée (ex. : LAeq, Lden, Lnight, Lday, Levening) et peuvent donc caractériser une exposition de long terme.
- Les descripteurs événementiels (ex. : SEL et Lmax) : ils caractérisent un événement sonore et prennent en compte la caractéristique d'émergence forte de certains bruits (tels ceux émis au passage des avions). Le Lmax est le plus utilisé sur le plan international. Il peut être exprimé en deux unités dB(A) ou PNdB³⁹.

Nous développerons deux descripteurs énergétiques car ce sont les plus présents dans la réglementation relative aux écoles.

6.4.1. Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A

Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, désigné par $L_{Aeq,T}$, 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 .

³⁷ Stryjenski Jean, *La propagation du son vue par un architecte*, Revue Urbanisme n°206, février/mars 1985

³⁸ Un indicateur de bruit n'est pas une simple mesure physique du bruit mais résulte d'une expression mathématique permettant de représenter une situation variant dans le temps et l'espace. Il doit permettre de modéliser la gêne ressentie, de faire des comparaisons de l'exposition au bruit en différents lieux et moments.

³⁹ Le PNdB prend en compte le fait que certaines fréquences émises par les bruits d'avions sont considérées comme plus gênantes ; il applique ainsi une pondération en fréquence un peu différente du dB(A) qui est lui-même pondéré en fonction de la sensibilité de l'oreille.

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

Est le niveau de pression acoustique pondéré A dépassé pendant N% de l'intervalle de temps considéré. Par exemple, L_{A90} est le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A dépassé pendant 90% de l'intervalle de mesure. 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.

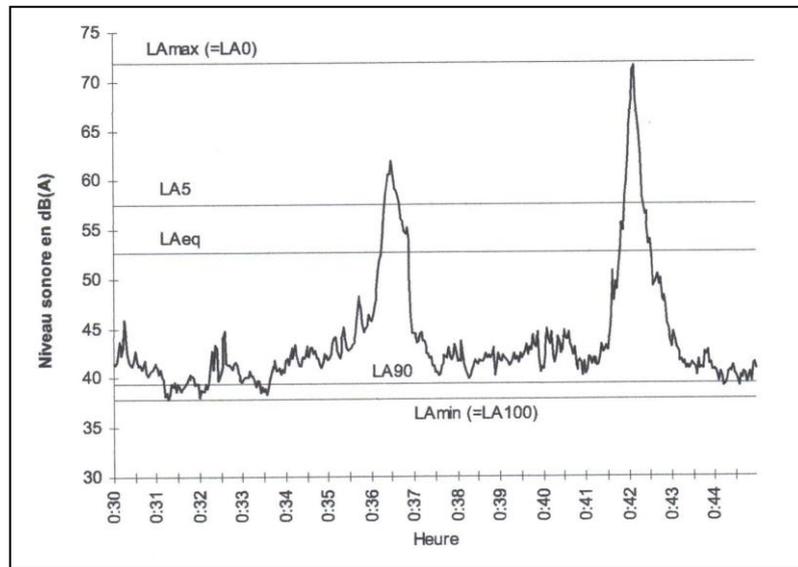


Figure I- 20. Représentation des niveaux fractiles et du niveau équivalent (LA_{max} , LA_{min} , LA_{90} , LA_5 et LA_{eq})

(Source: <http://documentation.bruxellesenvironnement.be>)

Les indicateurs de bruit, associés à des valeurs-limites⁴⁰, sont utilisés principalement dans les actions réglementaires nationales (zonage acoustique, création d'infrastructures de transport, construction de bâtiments, insonorisation de logements...).

⁴⁰ Les valeurs-limites sont le plus souvent établies sur la base des résultats des travaux de recherche portant sur la gêne psychologique. Elles résultent cependant des compromis qu'effectuent les autorités gouvernementales entre les objectifs de santé publique et le coût des mesures à prendre pour réduire les expositions. Leur existence légale ne signifie pas qu'elles sont respectées.

6.5. Effet de masque et intelligibilité

Le bruit nuit à la qualité des communications orales car il est susceptible de provoquer un *effet de masque*, phénomène qui se produit lorsque deux sons d'intensité différente sont émis. A ce moment, le bruit le plus fort peut masquer partiellement ou totalement le second. L'effet de masque est d'autant plus grand que les fréquences sont voisines et les sons graves masquent mieux les sons aigus que l'inverse. Or, les bruits extérieurs de trafic, correspondant à des sonorités graves, masquent largement la voix humaine et peuvent causer ainsi une gêne importante⁴¹.

Pour une bonne intelligibilité, il faut que le bruit de fond à l'intérieur d'un local (lié à une mauvaise qualité acoustique ou à des sources extérieures diverses telles que les bruits de trafic) soit au moins inférieur de 10 dB(A) à celui du discours (sachant que la conversation normale est de l'ordre de 55 à 60 dB (A)).

La figure I-21 montre l'effet du bruit de fond sur la conversation en fonction de la distance de l'auditeur par rapport au locuteur. Avec un bruit de fond de 35 dB, on peut entendre à 4 m en parlant à voix normale alors qu'avec un bruit de fond de 55 dB, on n'entend bien qu'à 0.50 m.

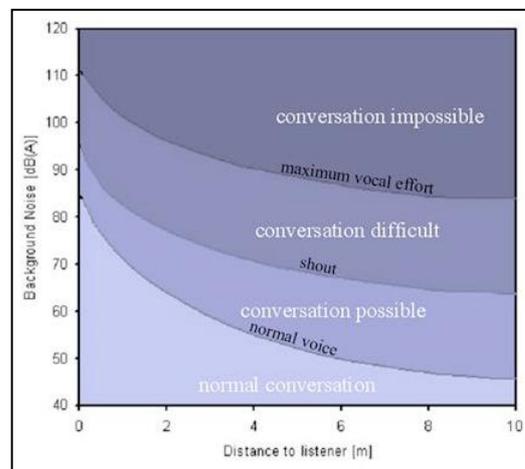


Figure I- 21. Effet du bruit de fond sur la conversation en fonction de la distance de l'auditeur par rapport au locuteur (Source : AFFSE, 2004)

⁴¹ L'effet de masque n'est pas toujours nuisible, il peut être utilisé pour masquer des bruits gênants, comme les bruits de circulation, en faisant appel à des bruits à large bande, généralement considérés agréables, tels le ruissellement de l'eau. Dans le traitement des locaux, on utilise l'effet de masque pour assurer la confidentialité d'un cabinet médical, par exemple, en diffusant une musique d'ambiance.

7. Réglementation algérienne pour la lutte contre le bruit

7.1. Les lois

- Loi n° 83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement.

Dans son chapitre 5 relatif à la protection contre les nuisances du bruit, l'article 119 rend responsable toute personne physique ou morale lorsqu'il y a émission de bruit susceptible de causer une gêne à autrui en les obligeant dans son article 120 à mettre en œuvre toutes les dispositions utiles pour les supprimer. L'article 121 stipule que des décrets prendront en charge les prescriptions visées aux articles 119 et 120.

- Loi n° 01-20 du 12 décembre 2001, relative à l'aménagement et au développement durable du territoire.
- Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003⁴² portant sur la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, formule dans son titre 4- chapitre II des prescriptions de protection contre les nuisances sonores dans les articles 72 et 75.

7.2. Les arrêtés

- Arrêté du 25 février 1964, relatif à la lutte contre le bruit excessif, vise à sensibiliser les personnes à la lutte contre le bruit sur les lieux publics (voie publique) et sur les lieux de travail, d'interdire toute utilisation et emploi de dispositifs émettant du bruit, qui sont susceptibles de troubler le repos et la tranquillité des habitants, ainsi que l'interdiction des bruits produits à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation qui peuvent empêcher et gêner la tranquillité du voisinage.
- Arrêté du 13 avril 1972, relatif à la mesure du bruit produit par les véhicules automobiles et aux conditions imposées aux dispositifs dits silencieux, fixe les mesures et les dispositifs à respecter pour le bruit causés par les véhicules automobiles et les moyens de transport, qui sont considérés comme la première source de bruit dans l'environnement.
- Arrêté du 17 octobre 2004⁴³ portant approbation du cahier des charges fixant les normes de surface et de confort applicables aux logements destinés à la location-vente. La réglementation phonique exige que le niveau sonore ne doit pas dépasser 38 dB(A) pour les pièces habitables et 45 dB(A) pour les pièces de service pour des niveaux de bruit d'émission ne dépassant pas :
 - 86 dB(A) pour les locaux d'habitation ;
 - 76 dB(A) pour les circulations communes ;

⁴² Journal Officiel de République Algérienne JORA n°43 du 20/07/2003

⁴³ Id, n°13 du 16/02/2005. p.20. [En ligne], www.joradp.dz

- 91 dB(A) pour les locaux à usage autres que ceux cités précédemment.

Pour les bruits d'environnement extérieurs aux bâtiments à usage d'habitation et conformément au décret exécutif n°93-184 du 27 juillet 1993 on prendra 76 dB(A) pour la période diurne et 51 dB(A) pour la période nocturne.

- Arrêté du 12 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 13 avril 1972, relatif au bruit des véhicules automobiles.

7.3. Les décrets exécutifs

- Décret exécutif n° 91-175 du 28 mai 1991⁴⁴ définissant les règles générales d'aménagement d'urbanisme et de construction. L'article 4 de ce décret stipule que lorsque les constructions sont susceptibles en raison de leur localisation d'être exposées à des nuisances graves dues notamment au bruit, le permis de construire peut être refusé ou n'être accordé, que sous réserve des prescriptions spéciales édictées par les lois et règlements en vigueur.

- Décret exécutif n° 93- 184 du 27 juillet 1993⁴⁵ réglementant l'émission des bruits en application de l'article 121 de la loi n°83-03 du 5 février 1983, susvisée.

- Art. 2: Les niveaux sonores maximums admis dans les zones d'habitation et dans les voies et lieux publics ou privés sont de 70 décibels (70 dB) en période diurne (6 heures à 22 heures) et de 45 décibels (45 dB) en période nocturne (22 heures à 6 heures).

- Art. 3: Les niveaux sonores maximums admis au voisinage immédiat des établissements hospitaliers ou d'enseignement et dans les aires de repos et de détente ainsi que dans leur enceinte sont de 45 décibels (dB) en période diurne (6 heures à 22 heures) et de 40 décibels (dB) en période nocturne (22 h à 6 h).

- Art. 4: Sont considérés comme une atteinte à la quiétude du voisinage, une gêne excessive, une nuisance à la santé et une compromission de la tranquillité de la population, toutes les émissions sonores supérieures aux valeurs limites indiquées aux articles 2 et 3 ci-dessus.

- Art. 7: Les infrastructures sont construites, réalisées et exploitées en tenant compte des bruits aériens émis par leurs activités.

- Art. 8: Les constructions à usage d'habitation ou à usage professionnel sont conçues et réalisées en tenant compte de la qualité acoustique des murs et planchers.

⁴⁴ Journal Officiel de la République Algérienne n°26 du 01/06/1991 p.289. [En ligne], www.joradp.dz

⁴⁵ Id, n°50 du 28/07/1993 p.10. [En ligne], www.joradp.dz

7.4. Le document technique réglementaire DTR C 3.1.1

En plus des lois et décrets suscités, le document technique réglementaire, DTR C 3.1.1 intitulé « Isolation acoustique des parois aux bruits aériens, règles de calcul »⁴⁶, définit les méthodes de détermination de l'indice d'affaiblissement acoustique des parois de construction et le calcul de l'isolement brut des parois vis-à-vis des bruits aériens.

La méthode de calcul définie dans ce document s'applique à l'ensemble des bâtiments et à tous les types de parois

Ce document technique réglementaire, approuvé par la commission technique permanente pour le contrôle technique de la construction (CTP), s'insère dans le cadre d'une politique nationale qui vise à lutter contre toute forme de nuisance et plus particulièrement les nuisances sonores.

L'arrêté du 27 mars 2004, portant approbation du DTR C 3.1.1, a été publié dans le journal officiel de la République Algérienne Démocratique n° 23 du 14 Avril 2004.

Conclusion

Les bruits émis par différentes sources sonores sont très variés en fréquence, intensité, composition et durée. C'est pourquoi des indicateurs de bruit, décrits dans des normes, ont été définis pour évaluer les différentes situations.

La gêne sonore est un effet psychologique associé au bruit, dépendant de la perception subjective du bruit et sa tolérance qui varient d'un individu à l'autre.

Cependant, des phénomènes sonores variés s'imposent à nous au quotidien, et mis à part leurs gênes occasionnées, ces derniers sont omniprésents dans notre environnement, lieu de vie, de travail et de loisir. Leur impact sur la santé et sur la performance de l'individu est considérable. Il est donc important de se protéger de ces nuisances en adoptant des stratégies, pour le confort acoustique des espaces aménagés, objet du prochain chapitre.

⁴⁶ CNERIB, DTR C.3.1.1. *Isolation acoustique des parois aux bruits aériens - Règles de calcul*, Alger, 2004

Introduction

Les acousticiens distinguent deux types de bruit selon leurs modes de transmission dans le bâtiment: Les bruits aériens qui se transmettent par l'air ambiant, se subdivisent en bruits provenant de l'extérieur du bâtiment (bruit de transport) et ceux provenant des locaux voisins (bruits aériens intérieurs, les conversations, la télévision...). Les bruits solidiens se transmettent par la structure du bâtiment, tels que les bruits d'impacts (déplacement des personnes, des meubles, la chute d'objets...) et les bruits des équipements (ascenseurs, la robinetterie, la VMC, etc)

L'isolation acoustique des bâtiments contre les différents types de bruits est l'ensemble de dispositifs pour réduire ou stopper la transmission des bruits vers les locaux sensibles. Elle dépend des matériaux utilisés, des techniques de mise en œuvre, de l'architecture et de l'environnement du bâtiment. A ne pas confondre avec la correction acoustique qui consiste à traiter l'absorption et la réflexion des sons à l'intérieur des espaces afin d'atténuer le phénomène de réverbération.

1. L'onde sonore et la paroi

Quand une onde sonore rencontre un obstacle rigide comme le mur intérieur d'un local, paroi séparative entre deux locaux ou la façade d'un bâtiment, elle met en vibration la structure de celui-ci. L'obstacle devient alors à son tour source d'une vibration sonore qui sera à la fois partiellement transmise, partiellement absorbée et aussi partiellement réfléchi.

Le schéma suivant montre le comportement d'une paroi soumise à une énergie acoustique E_I .

$$E_I = E_A + E_T + E_R \quad (\text{II.1})$$

Avec: E_I : énergie acoustique incidente, E_A : énergie absorbée, E_T : énergie transmise, E_R : énergie réfléchi.

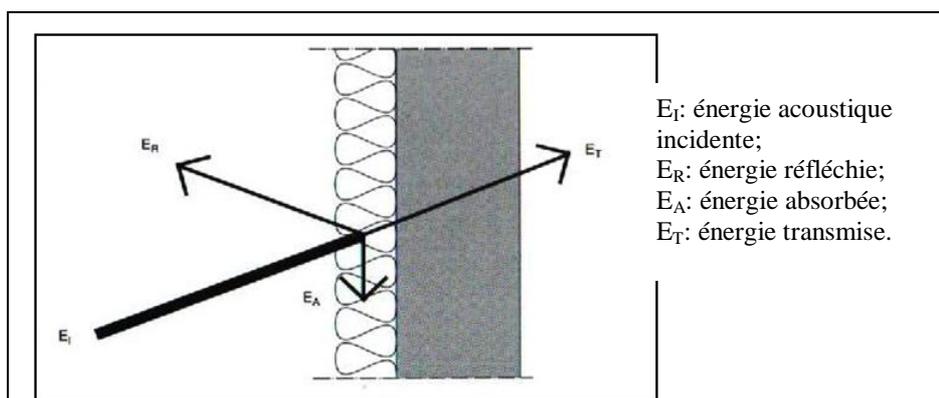


Figure II- 1. Absorption, transmission et réflexion de l'onde acoustique (Source : Hamayon Loïc, 2006)

On appelle: $\alpha = E_A/E_I$, coefficient d'absorption; $\tau = E_T/E_I$, coefficient de transmission; $\rho = E_R/E_I$, coefficient de réflexion. Avec $\alpha + \tau + \rho = 1$

2. Conditions du confort acoustique

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

- Maîtriser la réverbération, de sorte que les sons utiles et désirés puissent se propager correctement, avec suffisamment d'intensité et sans déformation pour être facilement perçus. On parle alors, de correction acoustique.

- 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.). C'est-à-dire une bonne isolation acoustique.

Cependant, il ne faut 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 II-2).

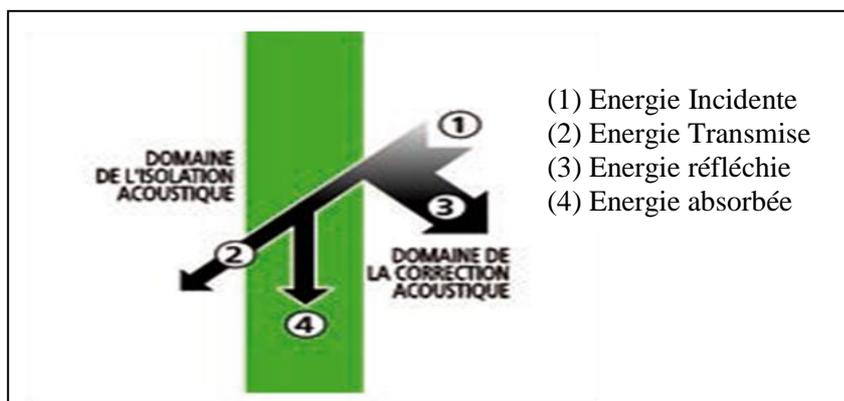


Figure II- 2. Isolation et correction acoustique
 (source: Lafarge, 2010)

3. Principes de l'isolation acoustique des bruits aériens

3.1. Modes de transmission des bruits aériens

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.

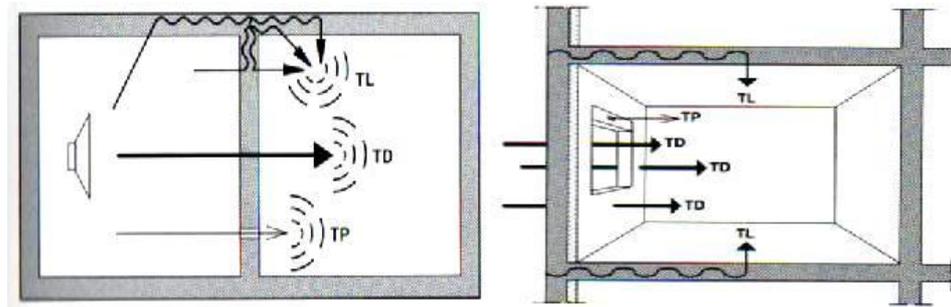


Figure II- 3. Modes de transmission des bruits aériens intérieurs et extérieurs.
(Source : Hamayon Loïc, 2006)

3.2. Principe de masse

Un premier principe en matière d'isolation est celui de la « loi de masse » : plus un mur est lourd, plus il isole. Nous avons expliqué dans le chapitre précédant, que doubler la masse surfacique d'une paroi simple apporte en pratique une amélioration de l'indice d'affaiblissement de l'ordre de 4 dB, or 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 générale, un indice d'affaiblissement acoustique supérieur à celui d'une paroi simple de même masse surfacique.

La figure II-4 présente les variations de l'indice d'affaiblissement de deux parois simples (épaisseur [e] courbe noire, épaisseur [2e] courbe bleu) en fonction de la fréquence du bruit.

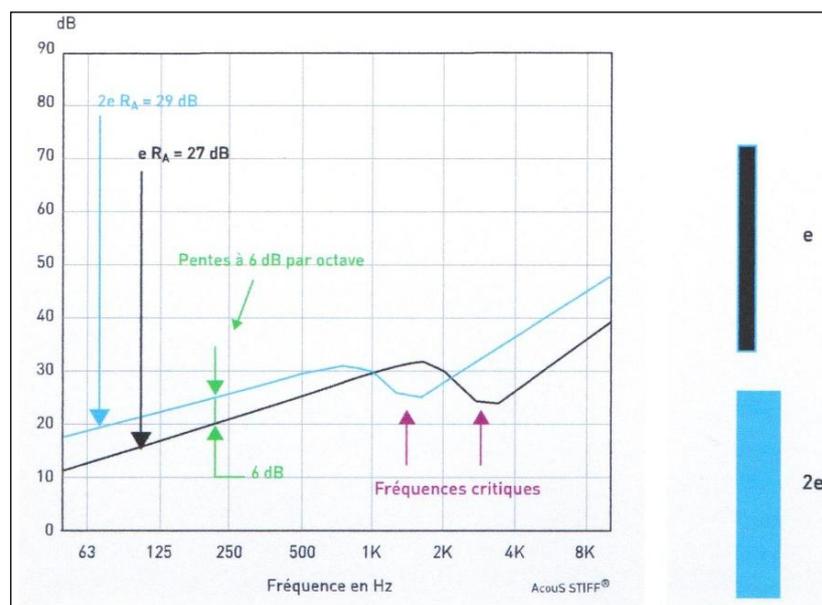


Figure II- 4. Principe de masse
(Source : <http://www.bpbplaco.com>)

3.3. Principe de double paroi

Le second principe est celui de la double paroi (système masse-ressort-masse), celle-ci est constituée de deux parois simples séparées par une lame d'air remplie ou 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).

L'indice 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'absorbant acoustique entre les deux parements,
- La fréquence critique des parements,
- La nature des liaisons (ponctuelle, linéiques, surfaciques, rigides, souples, etc.)

Quand les deux parements sont identiques, leurs fréquences critiques ont les mêmes valeurs et la chute de l'indice R de la paroi est très accentuée. Il est donc préférable d'utiliser des parements d'épaisseurs différentes¹.

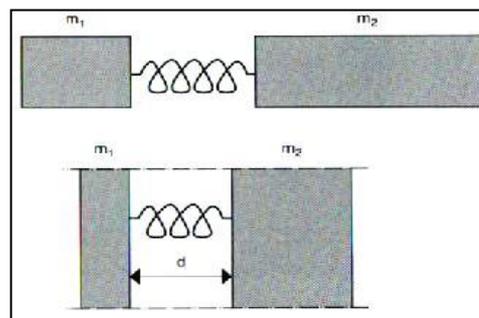


Figure II- 5. Représentation schématique d'une double paroi

(Source : Hamayon, 2006)

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 :

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

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

¹ Le double vitrage 4(6)4 avec une fréquence de résonance située dans les fréquences médiums (les plus perceptibles par l'oreille humaine) est moins performante qu'une paroi simple à masse égale. Pour améliorer son indice R il faut déplacer la fréquence de résonance vers les fréquences basses en augmentant la distance entre les parements et/ou la masse surfacique des parois.

Afin que l'indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi double soit efficace, la fréquence de résonance doit être la plus basse possible. On augmente alors la distance entre les parements et la masse surfacique des parois.

Les fréquences de résonance de la lame d'air sont obtenues par la formule suivante :

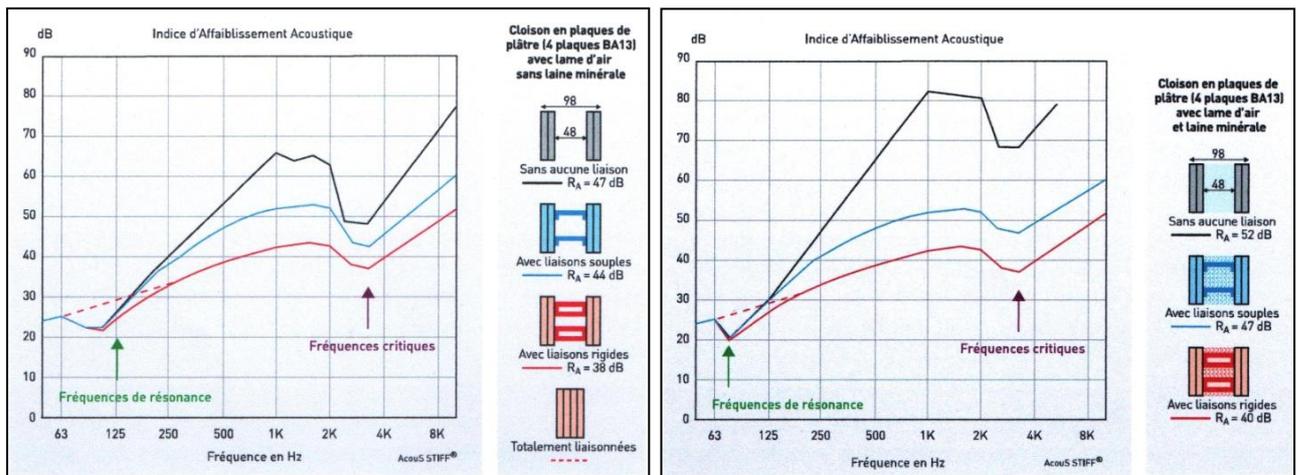
$$f_r = \frac{170n}{d} \quad (II.2)$$

Où : d : distance entre les parements (m) ; n : nombre entier positif (1, 2, 3, 4....).

Pour éviter les réflexions multiple à l'intérieur de la lame d'air et la formation des ondes stationnaires qui diminuent la performance acoustique de la paroi double, il faut placer un absorbant acoustique de type laine minérale entre les deux parements.

Les graphes (figure II-6) montrent les variations de l'affaiblissement R en fonction de la fréquence pour une double paroi sans isolant et la même double paroi avec laine de verre.

Pour optimiser ce système, il faut maintenir la fréquence de résonance dans les fréquences les plus basses (en dehors de la gamme de fréquence usuelles) et limiter les liaisons entre parements.



A gauche: double paroi sans isolant
A droite: double paroi avec laine de verre

Figure II- 6. Principe de la double paroi
(Source : <http://www.bpbplaco.com>)

Le graphe suivant montre les différents indices d'affaiblissement acoustique de plusieurs type de parois (paroi simple, double et triple).

A épaisseur et masse égale, une paroi triple est moins performante qu'une paroi double optimisée. On remarque aussi, que lorsque le matériau remplissant la lame d'air d'une paroi multiple est trop rigide, la fréquence de résonance de la paroi coïncide avec les fréquences usuelles et de ce fait la paroi multiple est moins performante qu'une paroi simple de même masse.

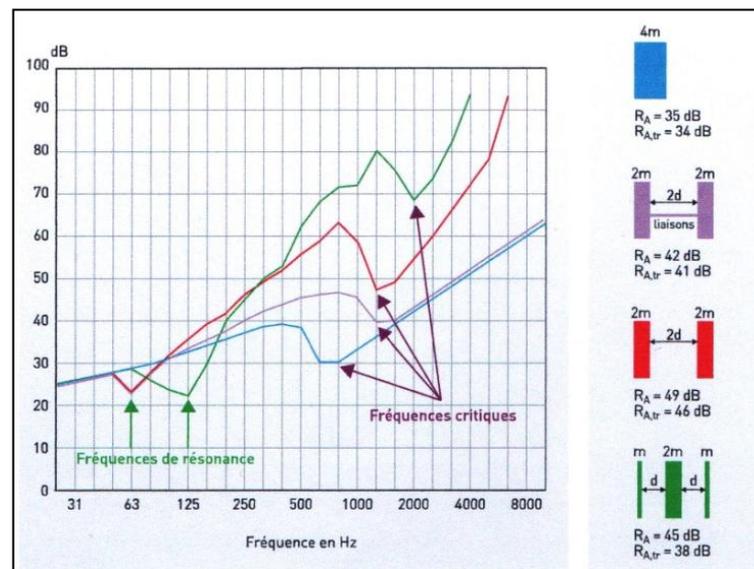


Figure II- 7. Comparaison des indices d'affaiblissement acoustique de parois simple, double et multiple (Source : <http://www.bpbplaco.com>)

L'utilisation d'une paroi double permet donc d'atteindre des isolements très largement supérieurs à ceux d'une paroi simple.

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 élastifié qu'il est possible soit de coller sur la paroi existante pour améliorer sa performance acoustique, soit de les fixer sur les murs ou plafonds grâce à une ossature métallique.

3.4. Principe d'étanchéité

Là où l'air passe, le bruit passe. 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.

3.5. Implantation et conception des bâtiments

Préalablement à l'implantation des bâtiments, il est nécessaire de localiser les sources de bruit fixes ou mobiles, de déterminer leurs natures, moments et durées d'émission. Il faut prendre en considération l'évolution future des niveaux sonores (ex : augmentation du trafic routier), le relief du site et constructions existantes susceptibles de générer du bruit.

La disposition des volumes bâtis modifie la propagation des sons. Ainsi les espaces plus ou moins ouverts permettent de canaliser ou de masquer les bruits (fig.II-9). Les rues amplifient différemment les sons suivant leur largeur et la hauteur des bâtiments qui les bordent (fig.II-8). A largeur égale, une rue bordée par des bâtiments hauts est plus bruyante qu'une rue bordée par des bâtiments bas. A cet égard, l'urbanisme des pays du Maghreb, urbanisme fermé, est exemplaire.

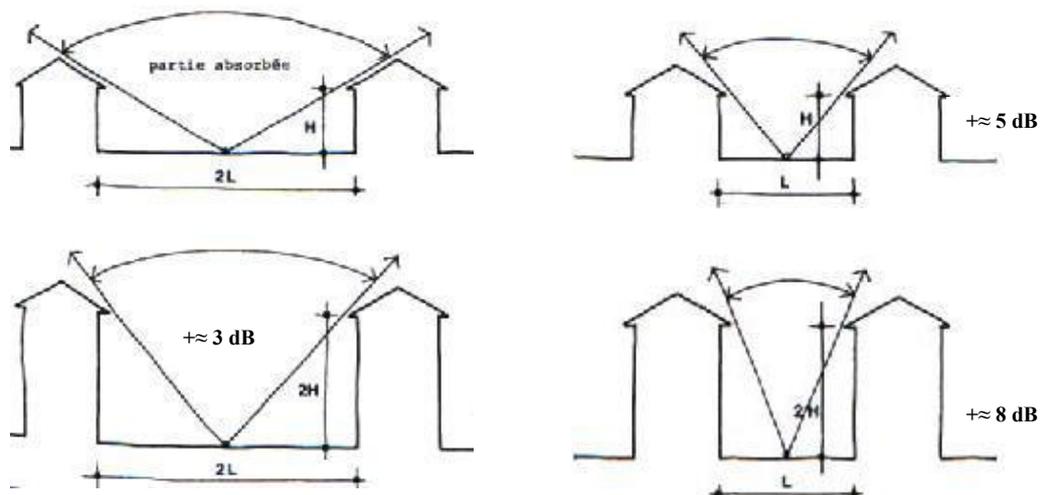
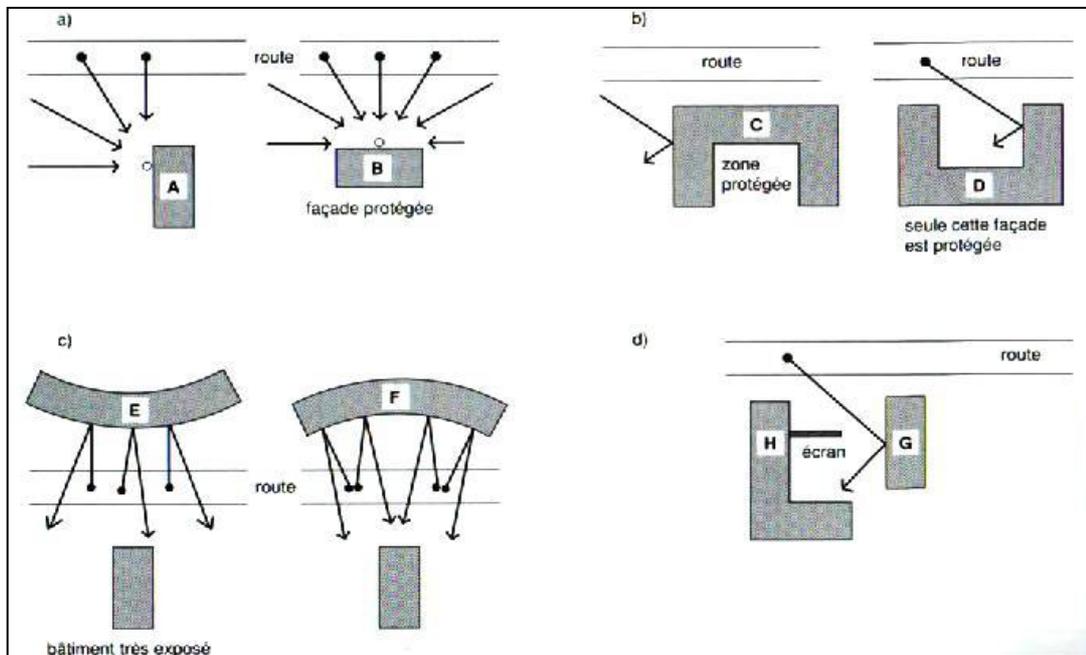


Figure II- 8. Influence des profils de rues

(Source : Hamayon et Michel, 1982)

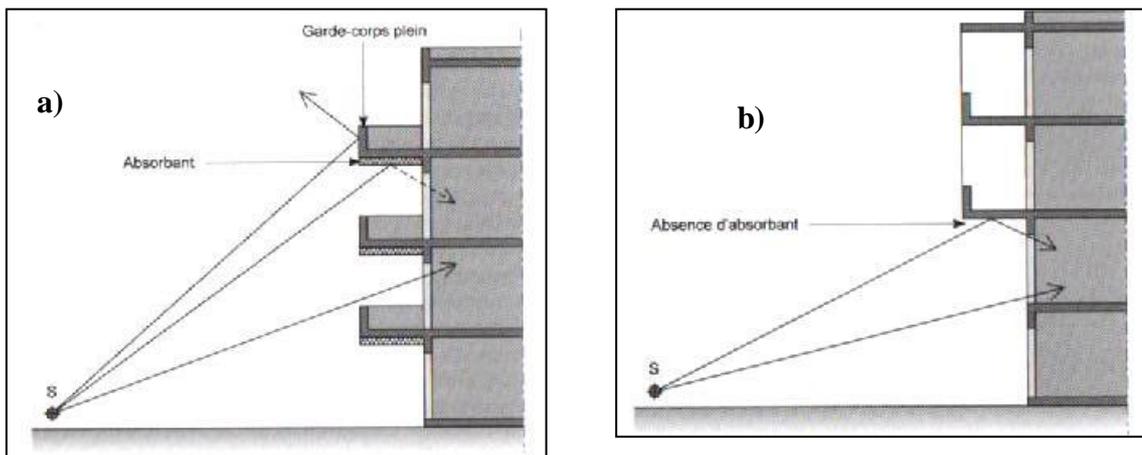
Pour protéger les espaces sensibles (chambre à coucher, salles de classe, jardin intérieur...) des bruits, en tenant compte du fait que les façades réfléchissent les ondes sonores, plusieurs solutions peuvent être envisagées telles que :

- La création de cours intérieures, les constructions entourant la cour constituent des écrans au bruit ;
- La pose de jardinières ou terrasses en retrait;
- La création de passages couverts piétonniers,
- La création de balcons à garde-corps plans, comportant sous la face un revêtement absorbant et vus sous un angle de site du point de la voie bruyante supérieur à 30° (fig.II-10);
- La création d'espace tampon tels que les loggias fermées.



- a) La façade à l’opposé de la rue du bâtiment B est la plus protégée. Les façades du bâtiment A sont moins exposées aux bruits que la façade côté rue du bâtiment B ;
- b) Le bâtiment D est moins protégé que le C ;
- c) La forme convexe (bâtiment E) diffuse le bruit, en revanche, la forme concave du (bâtiment F) les focalise.
- d) Le bâtiment G réfléchit les sons vers le bâtiment H.

Figure II- 9. Exemples de situations de bâtiments vis-à-vis des nuisances sonores



- a) Diminution du bruit à l’intérieur des locaux apportée par les balcons.
- b) Augmentation du bruit causée par le balcon

Figure II- 10. Influence de la conception des balcons dans la propagation des bruits
(Source : Hamayon, 2008)

L'agencement et répartition des locaux sont très importants dans l'atténuation des bruits aériens intérieurs, les mesures suivantes sont recommandées :

- Isoler les pièces principales des circulations communes par des couloirs, des lieux de rangements ;
- Eviter de placer les pièces à vivre près des cages d'escalier ou locaux techniques ;
- Eloigner l'entrée des garages des logements ;
- Créer des espaces tampons entre les pièces.

3.6. Qualité de l'enveloppe du bâtiment

L'isolement acoustique d'un bâtiment par rapport aux bruits extérieurs dépend essentiellement de la qualité des éléments de la façade et de la toiture.

3.6.1. Parois lourdes

Réalisées en maçonnerie ou en béton, ces éléments de façade répondent, du point de vue acoustique, à la loi de masse. Elles 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 (cas des isolants à cellules ouvertes tels la laine minérale et les isolants élastifiés) ou diminue (cas des isolants à cellules fermées tels le polystyrène ou le polyuréthane) sensiblement l'affaiblissement acoustique de la paroi. Pour améliorer l'isolation acoustique des façades lourdes ce ne sont pas ses parties pleines (les murs) qu'il faut traiter mais plutôt ces fenêtres, portes-fenêtres et bouches d'entrées.

Le tableau II-1 présente quelques indices d'affaiblissement acoustique pondérés (R_w+C_{tr}) et (R_w+C) de murs extérieurs en dB.

Tableau II- 1. Exemples d'indices d'affaiblissement acoustique pondérés de murs extérieurs.

(Source :Hamayon, 2008)

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

BBC : bloc de béton creux – *PSE* : polystyrène expansé – *PSEE* : polystyrène expansé élastifié –

LM : laine minérale – *SM* : structure métallique – *PP* : plaque de plâtre.

3.6.2. Parois légères

Les performances acoustiques des parois légères à ossatures en bois² sont celles des parois doubles, elles dépendent de la nature des composants, de leurs dimensions, de l'étanchéité à l'air des jonctions entre les éléments et de la mise en œuvre.

Dans le but d'améliorer leur affaiblissement acoustique, on réalise un complexe de doublage de type laine minérale + plaque de plâtre transformant ainsi la paroi double en paroi triple, mais les résultats ne sont pas toujours satisfaisants. Alors pour améliorer les qualités acoustique des façades légères, il est recommandé de :

- Renforcer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe au niveau de la liaison avec les autres éléments de la construction (maçonnerie, éléments de toiture...);
- Augmenter la masse de la paroi intérieure en appliquant plusieurs plaques de plâtre superposées;
- Désolidariser la paroi intérieure de l'ossature et d'augmenter l'espace entre les parois.

3.6.3. Bardage métallique

La plupart des bâtiments industriels, agricoles et commerciaux sont réalisés avec un bardage métallique double peau.

Un bardage standard est composé de deux parements galvanisé de 75/100 mm séparés de deux couches de laine minérale de 30 et 80 mm. Quand le parement intérieur de ce bardage est perforé (pour la correction acoustique) l'indice d'affaiblissement acoustique (R_w+C_{tr}) de l'ensemble est d'environ 30 dB et de 40 dB quand le parement intérieur est plein.

Les bardages triple peau permettent d'obtenir une bonne isolation acoustique avec un indice (R_w+C_{tr}) de 40 dB, associée à une bonne correction acoustique avec un indice α_w de 0,85.

Pour améliorer les performances acoustiques des bardages, il est conseillé de :

- Prévoir une peau extérieure en matériaux lourds (pierre, plaques de béton...);
- Ecarter les parements pour augmenter l'épaisseur de la laine minérale.

² Elles sont composées d'éléments modulaires réalisés en atelier, associant une structure porteuse en bois, des panneaux raidisseurs en particules de bois agglomérées et un remplissage en laine minérale. Ces modules reçoivent un habillage intérieur en plaque de plâtre le plus souvent monté sur ossature métallique indépendante. L'habillage extérieur peut-être de diverses natures : bardage en bois, panneaux peints ou enduits

3.6.4. Vitrages et menuiserie

Les fenêtres et les baies constituent les éléments de façade les plus critiques d'un point de vue acoustique. Leurs efficacités dépendent:

- de l'étanchéité à l'air ;
- de la qualité du vitrage ;
- de la menuiserie et du type d'ouvrant.

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.

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 choisira 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 générale, de mauvaises qualités acoustique et thermique si leurs épaisseurs sont faibles (tableau II-2). Les pays industrialisés ont recours de plus en plus aux doubles vitrages et doubles vitrage à feuilleté acoustique pour améliorer les performances acoustiques des façades.

Pourtant, il a été prouvé qu'à masse totale égale, l'indice d'affaiblissement d'un vitrage simple est plus élevé que celui d'un double vitrage avec les vitrages symétriques de même épaisseur (voir tableau II-2). De plus, avec une lame d'air de quelques millimètres, la fréquence de résonance du double vitrage se situe dans la gamme des fréquences audibles.

Les meilleures performances acoustiques sont obtenues avec un double vitrage de type asymétrique³.

Les vitrages feuilleté acoustique⁴ permettent d'atténuer l'effet de fréquences critiques et obtiennent un $R_{A, tr}$ supérieur à 35 dB. Les vitrages feuilletés acoustiques montés en double vitrage permettent un gain de l'affaiblissement acoustique de 10 dB par rapport à des doubles vitrages d'épaisseurs similaires (tableau II-2).

Le tableau II-2 présente les indices d'affaiblissement acoustique pondérés de quelques vitrages simples, doubles vitrages et doubles vitrages à feuilleté acoustique.

³ Le double vitrage asymétrique est composé de vitrages d'épaisseurs différentes, par exemple, un double vitrage 4(6)10 est composé d'un premier verre d'épaisseur 4 mm, d'une lame d'air de 6 mm et d'un second vitrage de 10 mm, il permet d'obtenir un indice $R_{A, tr}$ de 32 dB.

⁴ Les vitrages feuilletés acoustiques sont composés de deux ou plusieurs feuilles de verre, assemblés par un ou plusieurs films de polyvinyle ou couches de résine de synthèse.

Tableau II- 2. Indices d'affaiblissement acoustiques pondérés de différents types de vitrages

Type de vitrage	Epaisseur (mm)	Poids Kg/m ²	Classe Cékal*	R _w (dB)	R _{A,tr} (dB)
Simple vitrage	4	10	-	30	27
	5	12,5	-	30	28
	6	15	-	31	29
	8	20	-	32	30
	10	25	-	33	31
	12	30	-	34	32
Double vitrage de type symétrique	4(6)4**	20	I	30	27
	4(8)4	20	I	30	27
	4(12)4	20	I	30	27
	5(12)5	25	II	32	28
	6(12)6	30	II	33	30
	8(10)8	40	III	34	31
Double vitrage de type asymétrique	4(6)6	25	II	34	30
	4(6)8	30	III	35	31
	4(6)10	35	III	35	32
Double vitrage à feuilleté acoustique	44.1A (12)8	40,5	V	40	35
	44.1A(12)10	45,5	VI	41	37
	44.1A(20)55.1A	48	VI	47	40

*la certification Cékal (organisme certificateur des vitrages isolants) garantit la qualité des vitrages isolants et le suivi de la production. Elle repose sur 06 classes de performances.

Classes de performances acoustiques	I	II	III	IV	V	VI
Indice R _{A,tr} (R _w +C _{tr}) minimal (dB)	25	28	30	33	35	37

**Un double vitrage noté 4(6)4, les premier et troisième chiffres indiquent l'épaisseur des vitrages, le deuxième chiffre entre parenthèses indique l'épaisseur de la lame d'air, en mm.

Un vitrage acoustique noté 44.1A(12)8 correspond à deux vitres de 4 mm séparées par une feuille de résine de 1 mm, d'une lame d'air de 12 mm et d'une vitre de 8 mm.

L'affaiblissement acoustique d'une fenêtre dépend, également, de la qualité de la menuiserie⁵. Si la nature du matériau composant la menuiserie (bois, aluminium, PVC) n'a pas d'incidence notable sur la qualité acoustique de la fenêtre, l'étanchéité à l'air entre l'ouvrant et le dormant est en revanche fondamentale. De ce fait, les châssis coulissants sont moins performants que les châssis à frappe.

L'indice d'affaiblissement acoustique pondéré $R_{A,tr}$ qui caractérise les performances acoustique de l'ensemble menuiserie-vitrage est déterminé lors d'essais en laboratoire.

3.6.5. Toitures

Les transmissions des bruits extérieurs peuvent se faire par l'intermédiaire des toitures et parois liées à celles-ci. Les toitures sont en particulier exposées au bruit des avions, d'autant plus que leur surface, fonction de la pente, est grande.

Selon les matériaux utilisés, l'indice d'affaiblissement acoustique peut varier de 15 à 30 dB. Les toitures sous combles perdus ayant un plancher distant d'au moins 1 m recouvert de laine minérale sur des plaques de plâtre et les toitures sur combles aménagés posées sur de la laine minérale et des plaques de plâtre permettent d'obtenir un indice d'affaiblissement acoustique supérieur à 40 dB. Le tableau suivant donne quelques valeurs de l'indice $R_{A,tr}$ (dB) pour les toitures les plus employées.

Tableau II- 3. Indice d'affaiblissement acoustique pondéré $R_{A,tr}$ (dB) des couvertures en petits éléments. (Source : Hamayon, 2008)

<i>Eléments de couverture</i>	<i>Tuiles à emboitement</i>	<i>Ardoise sur voliges</i>	<i>Bardeaux bitumés sur panneaux de particules</i>
Toiture seule	16	23	29
Toiture pour combles perdus (laine minérale de 200 mm sur plancher en BA13 avec une distance moyenne plancher/couverture > 1m)	38 à 47	43 à 52	49 à 55
Toiture pour combles aménageables (laine minérale de 200 mm sous toiture et 1 BA 13)	37 à 38	40 à 43	47 à 52

Les toitures terrasses composées d'une dalle support en béton armé sur un isolant thermique et un revêtement d'étanchéité, ont des indices d'affaiblissement acoustique pondérés $(R_w + C_{tr}) = R_{A,tr}$ très importants, en général supérieurs à 50 dB.

⁵ En France, la certification ACOTHERM est attribuée aux menuiseries assurant de bonnes performances acoustiques et thermiques. Les performances acoustiques sont classées en 04 catégories : AC1 pour $R_{A,tr} \geq 28$ dB, AC2 pour $R_{A,tr} \geq 33$ dB, AC3 pour $R_{A,tr} \geq 36$ dB, AC4 pour $R_{A,tr} \geq 40$ dB.

Les couvertures en tôle métallique nervurée qui sont employées, le plus souvent, dans les locaux industriels, secteur tertiaire et les locaux d'enseignement (gymnases, atelier) ; peuvent avoir des indices $R_{A,ir}$ de 23 à plus de 40 dB.

3.7. Ecrans antibruit

Dans la mesure du possible, il faut éloigner les bâtiments de la source émettrice du bruit. L'efficacité de l'éloignement dépend de la nature de la source de bruit (ponctuelle ou linéaire). Etant donné que l'atténuation est de l'ordre de 6 dB par doublement de la distance à la source (voir propagation du son en champ libre Chapitre I), l'éloignement à lui seul n'est pas suffisant pour protéger des bruits extérieurs. De ce fait, on a le plus souvent recouru à la construction de murs antibruit⁶ en amont, lors de la conception (intégré à la composition du bâtiment) ou comme solution curative. Ce dernier peut réduire l'intensité du bruit de 10 à 15 dB⁷.

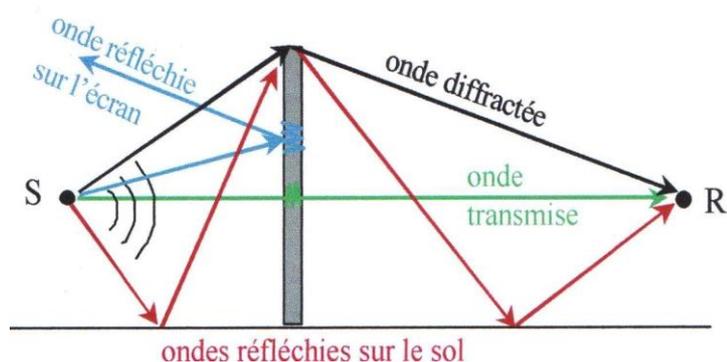


Figure II- 11. Fonctionnement d'un écran antibruit (à gauche)

(Source: AFSSE, 2004)

L'efficacité globale d'un écran est conditionnée par son efficacité en diffraction, fonction de la hauteur et longueur de l'écran ainsi que son implantation (distance à la voie, longueur de voie masquée par l'écran).

L'onde réfléchie par l'écran peut se révéler indésirable et augmenter les niveaux sonores des installations proches. L'utilisation de matériaux adaptés coté route permet de réduire cette énergie réfléchie.

Pour être efficaces, les écrans doivent masquer les sources aussi bien en coupe qu'en plan.

⁶ L'écran antibruit est un obstacle qui modifie la propagation directe du bruit. Il peut prendre la forme d'un mur, d'une butte de terre ou d'un bâtiment (entrepôt, garage,...) pouvant protéger un autre sensible aux bruits. L'écran peut être réalisé avec différents matériaux : bois (pins traités ou essences tropicales), métaux (acier ou aluminium), béton, plastiques opaques ou transparents, briques, verre.

⁷ DEOUS Suzanne et Pierre, *Le Guide de l'Habitat Sain*, Medico Editions, Andorra, 2004, p.73

4. Principes de l'isolation acoustique des bruits solidiens

Les bruits solidiens sont dus au déplacement de la paroi suite à l'application d'une force le plus souvent brusque (un choc). On en distingue :

- Les bruits d'impacts, provenant de chocs directs sur les parois comme les bruits de pas, de déplacement, chutes d'objets ou claquements de portes ;
- Les bruits d'équipement (robinetterie, chaudières, ascenseur...).

4.1. Isolation acoustique des bruits de choc

Comme toute paroi soumise à une onde sonore, le plancher est susceptible de transmettre une partie de l'énergie incidente, son affaiblissement acoustique vis-à-vis des bruits aériens est donc identique à celui des parois séparatrices verticales. Cependant, les planchers sont soumis à divers chocs (chutes d'objets, déplacements...) qu'il faut maîtriser. Les bruits de choc sur les autres parois sont moins fréquents, dus essentiellement aux claquements de portes.

L'énergie acoustique due aux chocs produits sur les planchers se transmet à l'étage inférieur par :

- Transmission directe (TD) à travers les planchers ;
- Transmission latérales (TL) par les parois liées aux planchers.

Il faut préalablement rappeler que si les bruits de choc sont générés dans la structure, et se transmettent par voie solidienne, ils émettent également dans le domaine aérien. Donc, un isolement aux bruits d'impact ne peut se réaliser que sur une structure isolante des bruits aériens.

Pour se protéger des bruits d'impact, le principe de base est la création de coupures élastiques dans la chaîne de transmission du bruit. Pour cela on utilise des matériaux "résilients" c'est à dire des matériaux élastiques qui restent élastiques sous charge statique et dynamique.

4.1.1. Revêtement de sol

Le principe du revêtement de sol recouvrant le plancher support, consiste à absorber l'énergie communiquée au plancher au moment du choc.

Le tableau II-4 présente l'indice de réduction du niveau de choc pondéré de quelques revêtements de sol :

Tableau II- 4. Indice ΔL_w de divers revêtements de sol.

(Source : Hamayon, 2008)

<i>Revêtement</i>	<i>Indice ΔL_w (dB)</i>
Moquette courante sur thibaude ou sur sous-couche alvéolaire	23 à 40
Tapis aiguilleté sans envers en mousse	17 à 21
Tapis ou dalles vinyliques avec envers en mousse	12 à 20
Linoléum sur sous-couche de liège	14
Dalle vinyliques avec envers en liège	8 à 16
Carrelage avec sous-couche résiliente	5 à 20
Linoléum avec envers en toile de jute	3 à 6
Tapis ou dalles vinyliques sans sous-couche	≤ 8

Pour améliorer l'efficacité du revêtement de sol, la pose d'une sous-couche résiliente est recommandée. Les matériaux résilients gardent leur élasticité sous l'effet de charges statiques et dynamiques (mousse de polyéthylène expansé, fibres minérales, polystyrène expansé élastifié..).

Les revêtements souples (liège, tapis..) atténuent les bruits de choc dans les hautes fréquences.

4.1.2. Sol flottant

Le principe consiste à provoquer une coupure dans le parcours de l'onde sonore pour stopper la transmission du bruit de choc. Le plancher comprend une dalle principale solidaire des parois verticales, une sous-couche résiliente et une dalle complémentaire « flottante ». Cette dernière est sans contact avec les parois verticales. La dalle flottante posée sur le matériau résilient, constitue ainsi une coupure élastique.

Le sol flottant peut être :

- Une chape flottante à base de liant hydraulique (mortier de ciment avec ou sans ossature) avec une sous-couche résiliente ;
- Une dalle flottante à base de liant hydraulique (béton armé ou non) avec une sous-couche résiliente ;
- Une chape sèche constituée d'un assemblage de panneaux (contreplaqué, plâtre...) posés sur une couche résiliente de bonne compressibilité ;
- Un parquet flottant sur une sous-couche résiliente qui peut être soit un parquet traditionnel posé sur du sable par l'intermédiaire d'un feutre, soit un parquet mosaïque avec une sous-couche en liège ou en fibres végétales, soit un parquet sur lambourdes flottantes entretoisées avec en dessous un isolant.

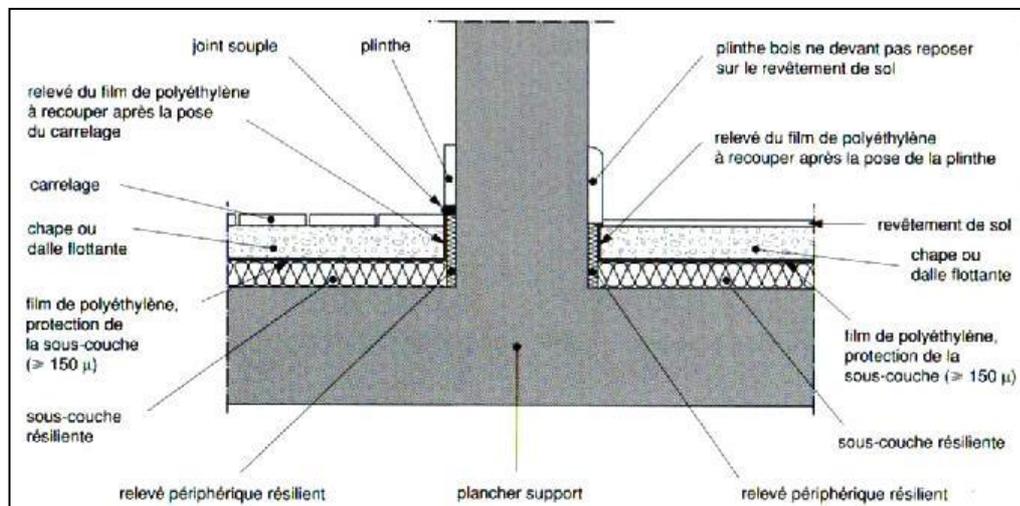


Figure II- 12. Détail d'une dalle flottante.

(Source : Hamayon, 2006)

Cependant, une exécution soignée des sols flottants est une condition essentielle pour obtenir une importante réduction des bruits de chocs. Pour cela, il faut éviter les liaisons rigides avec les murs, poteaux, trémies, gaines et plinthes, éviter de retourner la sous-couche sur le mur vertical, éviter de monter les cloisons légers sur le sol flottant, intégrer la canalisation dans le plancher support et désolidariser les radiateurs.

L'isolation par rapport aux bruits de choc peut être obtenue par :

- Un plafond suspendu étanche avec incorporation d'une laine minérale dans le plénum, à condition que les transmissions latérales soient maîtrisées ;
- Une désolidarisation par la réalisation de joints de dilatation séparant les locaux⁸, ou par un système de « boîte dans la boîte ».

Ces solutions présentent l'avantage, outre d'engendrer une importante diminution des bruits de chocs, d'améliorer l'isolement par rapport aux bruits aériens et bruits d'équipement.

4.2. Isolation acoustique des bruits d'équipement

Les bruits d'équipement individuel et collectif (bruits de plomberie, d'équipement sanitaires, de chauffage, de ventilation, d'équipement électrique, d'ascenseurs, de vide-ordures, de portes de garage) engendrent des bruits aériens et solidiens. D'une manière générale, il faut désolidariser ces équipements de la structure par l'utilisation de joints souples et de plots antivibratiles.

⁸ Dans l'unité d'habitation de Marseille (1952) de Le Corbusier, chaque cellule d'habitation repose sur la structure par des plots en plomb qui amortissent les vibrations.

5. Principes de la correction acoustique

La correction acoustique consiste à traiter l'absorption des sons afin d'atténuer la réverbération. Elle est évaluée en mesurant le coefficient d'absorption α des matériaux, l'aire d'absorption équivalente A et le temps de réverbération du local T_R . La correction acoustique a pour objectif de:

- Favoriser l'écoute, renforcer le niveau sonore en provenance de la source (salle de spectacle, salle d'enseignement...)
- Diminuer le niveau sonore et favoriser l'écoute à faible distance à la fois (piscine, restaurant, salle de sport)

5.1. Influence des matériaux absorbants

La qualité acoustique d'un local dépend essentiellement de sa durée de réverbération. Cette dernière est tributaire du volume du local et des matériaux absorbants qui recouvrent ce dernier. De ce fait, il faut augmenter ou diminuer l'énergie absorbée (les matériaux absorbants) suivant la destination du local (bureau, salle de cours ou de conférence, pièce à vivre..).

Dans un local dont les surfaces sont réfléchissantes (ex : salle de bain, salle réverbérante), le temps de réverbération est relativement long et le champ direct est diminué puisqu'il y a beaucoup d'énergie réfléchie, le message émis à l'intérieur est confus. En revanche dans un local dont les surfaces sont absorbantes, le temps de réverbération est court, le champ direct est augmenté et le message émis est clair.

Les illustrations suivantes montrent l'influence de l'absorption : dans la figure (II-13.a), les parois sont totalement réfléchissantes, le son incident se réfléchit 13 fois avant de perdre 50% de sa valeur, c'est-à-dire 3 dB. Si par contre les parois réfléchissent 80 % du son incident, il suffit de 3 réflexions pour perdre la même quantité d'énergie (fig.II-13.b)

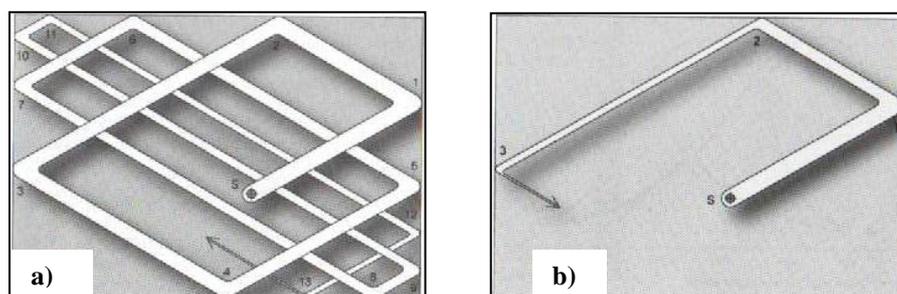


Figure II- 13. Influence de l'absorption

(Source : Hamayon, 2008)

Les matériaux absorbants diminuent la réflexion de l'énergie incidente, donc diminuent la réverbération. Leurs coefficients d'absorption varient avec la fréquence du son incident et leur choix et emplacement sont fonction de l'usage du local. Il existe trois catégories de matériaux absorbants :

5.2. Matériaux poreux et fibreux

En acoustique, les matériaux poreux absorbants sont à porosité⁹ ouverte (figure II.5), comme les produits fibreux (laines de verre, de roche, bois expansé), les revêtements textiles et les produits cellulaire (mousse)¹⁰.

Les sons de fréquences aiguës ($f > 1000$ Hz) sont mieux absorbés par ce type de matériaux. Pour augmenter l'absorption des sons graves, il faut augmenter l'épaisseur du matériau.

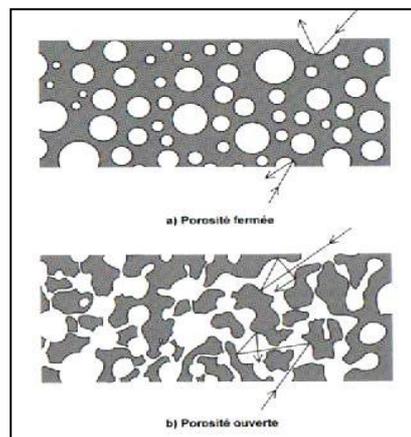


Figure II- 14. Matériaux poreux
(Source : Hamayon, 2008)

5.3. Résonateurs

Les résonateurs¹¹ sont généralement utilisés dans l'absorption des sons graves et médiums, ce sont des cavités sphériques ou cubiques de volume V débouchant à l'air libre par un col de section S et de longueur L .

⁹ La porosité est le rapport du volume des vides d'un matériau au volume total. Elle peut être ouverte ou fermée.

¹⁰ Dans ces matériaux, l'air est mis en mouvement par les ondes sonores, ces dernières perdent de l'énergie par suite de frottements des particules d'air sur le matériau, l'énergie acoustique est dissipée sous forme de chaleur.

¹¹ Les résonateurs (ou vases acoustiques) sont employés depuis l'antiquité, l'architecte romain *Vitruve* (1er siècle av.J-C) y fait référence dans son traité *De architectura*. Réalisés en terre cuite, les vases acoustiques étaient incorporés aux parois latérales des théâtres antiques ou dans les gradins, ils produisaient un renforcement des sons par effet d'écho artificiel. Plus tard, entre le XIe et le XVIIIe siècle, des résonateurs étaient encastrés dans les murs d'églises en Europe. Ils étaient parfois remplis de cendre afin, pense-t-on, de modifier leur volume et d'amortir les vibrations. Des vases semblables étaient incorporés aux voûtes hémisphériques des mosquées et des bains turcs afin d'augmenter l'absorption des sons. *Helmholtz*, était le premier à décrire le fonctionnement du résonateur, d'ailleurs, il porte son nom

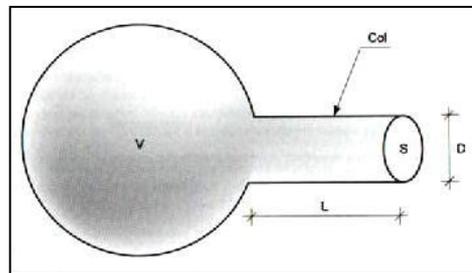


Figure II- 15. Résonateur de Helmholtz (Source : Hamayon, 2008)

La fréquence propre du résonateur est donnée par la formule de Holmholtz (comprenant la correction de Rayleigh, qui a introduit le diamètre du col) :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(L+0,8D)V}} \quad (\text{II.3})$$

Avec : f_0 la fréquence propre du résonateur (Hz), c la célérité du son (m/s), S la section du col (m^2), L la longueur du col (m), D le diamètre du col (m) et V le volume du corps (m^3).

Les résonateurs groupés sont des matériaux perforés tels que : les éléments en bois ou en béton comprenant des fentes, les briques perforées et les plaques perforées (en plâtre, bois, acier ou aluminium).

5.4. Membranes

Utilisés dans l'absorption des sons graves ($f < 300$ Hz), ils sont constitués d'un panneau fin fixé à distance de la paroi par une fixation périphérique étanche (tasseaux).

Lorsque l'onde acoustique frappe le panneau, il se déforme et comprime la lame d'air (emprisonnée entre le panneau et la paroi), qui agit comme un ressort. Comme pour le résonateur, il se crée une vibration. Quand la fréquence de l'onde sonore et la même que la vibration du panneau, il ya résonance.

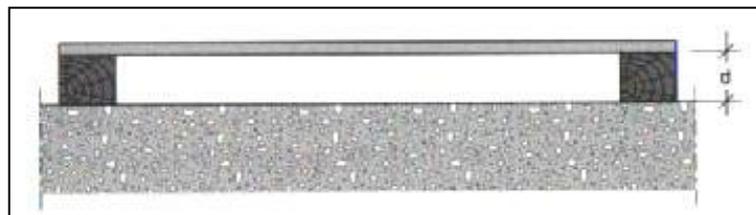


Figure II- 16. Composition d'une membrane (Source : Hamayon, 2008)

La fréquence propre d'un tel système est donnée par la formule suivante :

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{m \times d}} \quad (\text{II.4})$$

Avec : f_0 la fréquence de résonance (Hz), m la masse surfacique du panneau (kg/m^2) et d la distance séparant le panneau de la paroi (cm).

5.5. Critères de la qualité acoustique d'une salle

Du point de vu acoustique, les salles sont divisées en salles destinées à la parole, salles destinées à la musique et salles polyvalentes.

Dans les salles de parole (telles que : amphithéâtres, salles de conférences, salles de réunion, salles de classe, etc...), il faut assurer une bonne compréhension du message verbal, c'est-à-dire une bonne intelligibilité.

Dans les salles de concert, les sons perçus par les auditeurs doivent être clairs, nets et équilibrés.

Dans les salles polyvalentes, les sons perçus doivent avoir tous les critères mentionnés ci-dessus.

Les critères de la qualité acoustique d'une salle sont :

- Une durée de réverbération adaptée à l'usage de la salle ;
- Une bonne répartition du son dans la salle ;
- Favoriser les sons directs et les premières réflexions ;
- Eviter les échos, les échos flottants et les focalisations du son
- Assurer une protection contre les bruits aériens et vibrations de l'extérieur.

5.5.1. Répartition de l'énergie sonore dans la salle

Pour concevoir des salles avec une géométrie particulière favorisant une bonne répartition sonore, les acousticiens ont recours à plusieurs méthodes :

- Méthode de l'acoustique géométrique

Elle est utilisée dès le XVII^e siècle, par Kircher, qui publia en 1650, un livre de 1500 pages sur l'acoustique « Mururgia Universalis » depuis le fameux traité « De architectura » de Vitruve. Kircher utilisa des diagrammes à rayons pour expliquer le principe de réflexion et de focalisation des sons dans une chambre. Dans son court traité publié en 1838, S. Russell utilisa des diagrammes à rayon pour tracer la disposition optimale des sièges d'un auditorium de manière à obtenir à la fois, une bonne audition et une bonne vision¹². L'alignement des sièges devint une courbe dont la profondeur varie selon la proximité de la scène, ou selon l'angle sous lequel l'auditeur voit celle-ci. Connue sous le nom de « courbes isoacoustiques », cette méthode simple est d'un usage courant à l'heure actuelle.

¹² L'auditeur reçoit les sons directement de la source sonore (les sons directs) ou des surfaces réfléchissantes (les sons réfléchis). Pour assurer l'arrivée des sons directs aux auditeurs, on applique le principe de la *vision dégagée*, le rayon de vision de l'auditeur arrière doit être relevé au-dessus du niveau des yeux de l'auditeur avant de 10 à 15 cm.

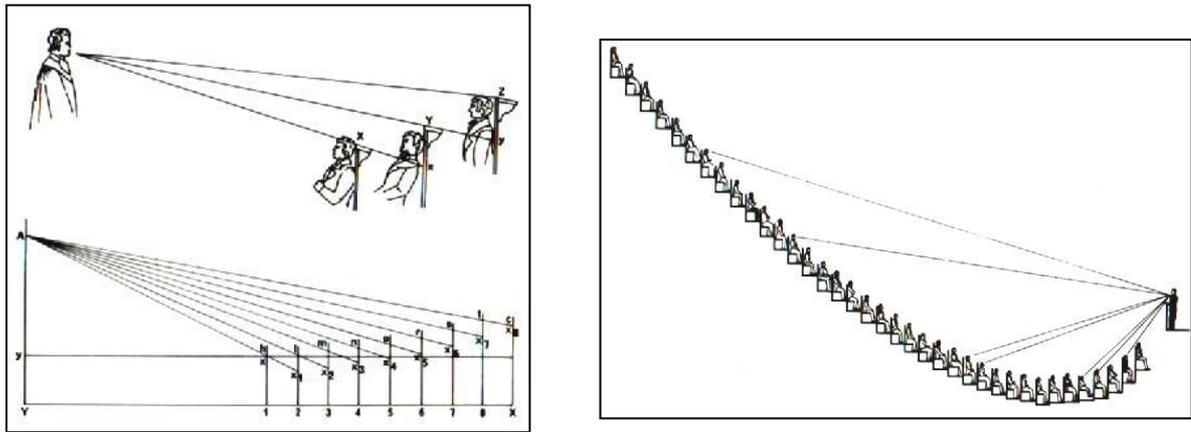


Figure II- 17. Courbes isoacoustiques (principe de vision dégagée)

(Source : Forsyth. M, 1985)

- Méthode de maquette

Réalisée à différentes échelles (1/10 à 1/50), la modélisation de la salle peut être *optique* par un rayon laser partant du fond de la maquette et se réfléchissant sur un miroir directionnel situé sur la scène. Le miroir qui est assimilé à la source sonore, permet de visualiser les trajets, les réflexions et diffusions des rayons en fonction des matériaux et des formes employés. Quant à la modélisation *ultrasonique* dans laquelle les fréquences des sons étudiés sont multipliées selon l'échelle de réduction (le rapport entre la longueur d'onde du son et la dimension du local est conservé), permet de simuler le champ sonore. On fait correspondre l'absorption des matériaux de la maquette à celle des matériaux utilisés dans la salle par des essais en laboratoire (salle réverbérante à échelle réduite).

- Simulation informatique

Elle repose sur le calcul des trajets effectués par un grand nombre de rayons sonore. Cette technique consiste à réaliser, à partir de programmes de conception assistée par ordinateur, une image tridimensionnelle du local. L'absorption et la diffusion des parois étant définies, on simule la source sonore et le récepteur. On obtient ainsi le niveau de pression acoustique à l'emplacement de l'auditeur et d'autres critères de l'acoustique des salles tels que la durée de réverbération.

5.5.2. Temps de réverbération préconisé

Le temps de réverbération doit être adapté aux conditions d'utilisation de la salle : Dans les salles de classe ou de conférence par exemple, on cherche à privilégier l'intelligibilité à l'effet sonore, donc un temps de réverbération plus court que pour un auditorium ou une salle de concert où l'on cherchera à avoir une élévation du temps de réverbération, qui entraînera une prolongation du son.

Cependant, un accroissement trop important du temps de réverbération entraîne :

- un accroissement du niveau sonore;
- une dégradation du message parlé;
- une diminution du pourcentage d'intelligibilité.

D'un autre côté une diminution importante du temps de réverbération peut jouer sur :

- la qualité de la voix ;
- l'équilibre tonal.

D'une manière générale, une élévation ou une diminution excessive du temps de réverbération joue sur l'homogénéité sonore de la salle. En effet, dans un cas comme dans l'autre, le rapport champ direct /champ diffus varie. Afin d'obtenir une meilleure qualité acoustique ce rapport doit être le plus homogène possible. Cela impose donc un temps de réverbération adapté pour que l'écoute ne varie pas selon la place qu'occupe l'auditeur dans la salle.

Il est possible de préconiser des durées de réverbération en fonction de la destination des salles et de leur volume. Les abaques (fig.II-18) donnent quelques exemples aux fréquences médiums.

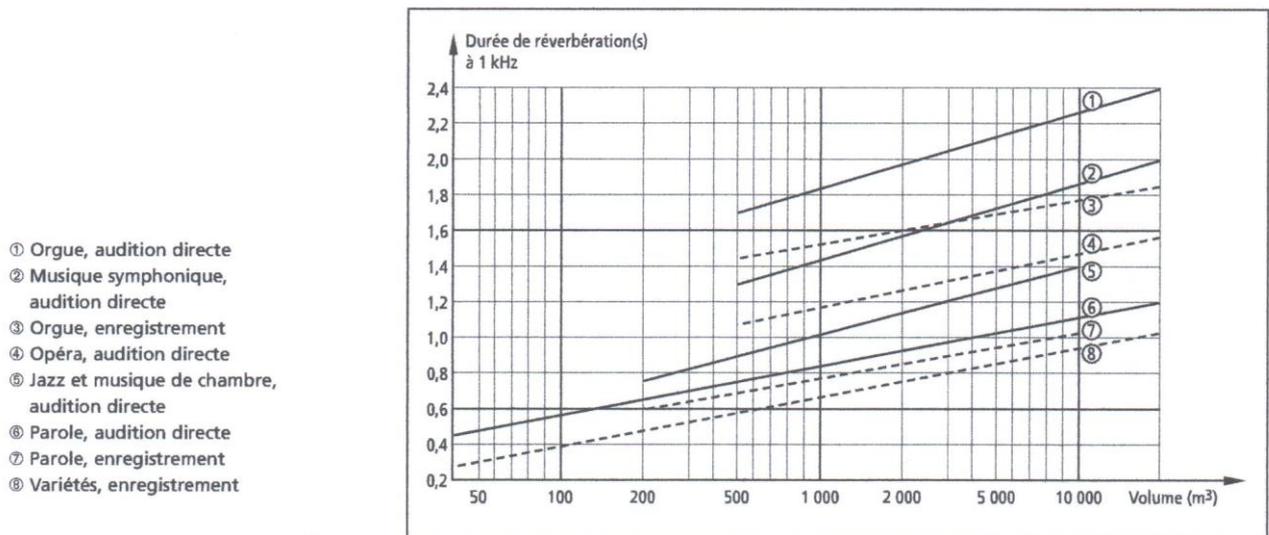


Figure II- 18. Durée de réverbération préconisée aux fréquences médiums

(Source : <http://www.bpbplaco.com>)

La durée de réverbération varie, non seulement, en fonction du volume de la salle, mais aussi selon le taux d'occupation des sièges. En effet, la présence de public modifie le temps de réverbération de la salle. Un auditorium peut présenter une acoustique très différente selon qu'il est comble ou vide, car, en général, les sièges vides réfléchissent les ondes sonores alors que les spectateurs les absorbent.

5.6. Exemples de traitement acoustique des salles

5.6.1. Petites salles

Dans ce genre de salle, un temps de réverbération long engendre une mauvaise intelligibilité de la parole, donc les messages verbaux sont incompris par l'assistance. Pour y remédier, il faut traiter les parois de la salle avec des matériaux absorbants afin de limiter les réflexions des sons.

Les parties de la salle à traiter sont la partie du plafond située vers le fond de la salle, le mur de fond et un mur latéral, nous allons expliquer cela plus en détails dans le chapitre III consacré au confort acoustique dans les écoles.

5.6.2. Grandes salles

La qualité acoustique d'une salle de conférence ou d'un amphithéâtre est déterminée par son volume, sa forme et l'étude des premières réflexions.

La disposition des auditeurs en gradins favorise l'absorption, ce qui permet de limiter les zones traitées au mur de fond. Le plafond situé au-dessus du conférencier doit réfléchir les ondes sonores et les distribuer au milieu et au fond de la salle.

Les murs latéraux ne doivent pas être parallèles s'ils sont réfléchissants (risque de focalisations), ils doivent être traités pour les rendre diffusants. La solution consiste à les habiller de reliefs pour briser leur parallélisme et homogénéiser le champ sonore (fig. II-19).

Quant aux formes, les plus adéquates acoustiquement parlant, elles sont fort variées et il n'est pas possible d'en préconiser certaines. Cependant il y a des erreurs de forme à éviter telles que:

- Les formes concaves, que ce soit en fond de salle ou en plafond pour éviter la focalisation des sons (fig. II-22). Si par contre, une forme concave est imposée en fond de salle par exemple, elle doit être traitée avec des matériaux absorbants et diffusants ;
- Les grandes surfaces réfléchissantes parallèles, les parois parallèles doivent être absorbantes ou diffusantes (fig. II-19) ;
- Les grandes surfaces plates réfléchissantes (fig. II-20),
- Les zones d'ombre acoustique sous les balcons, en veillant à ce que la longueur du balcon soit inférieure ou égale à $1/2$ la distance séparant le sol de la sous-face du balcon (fig. II-21).

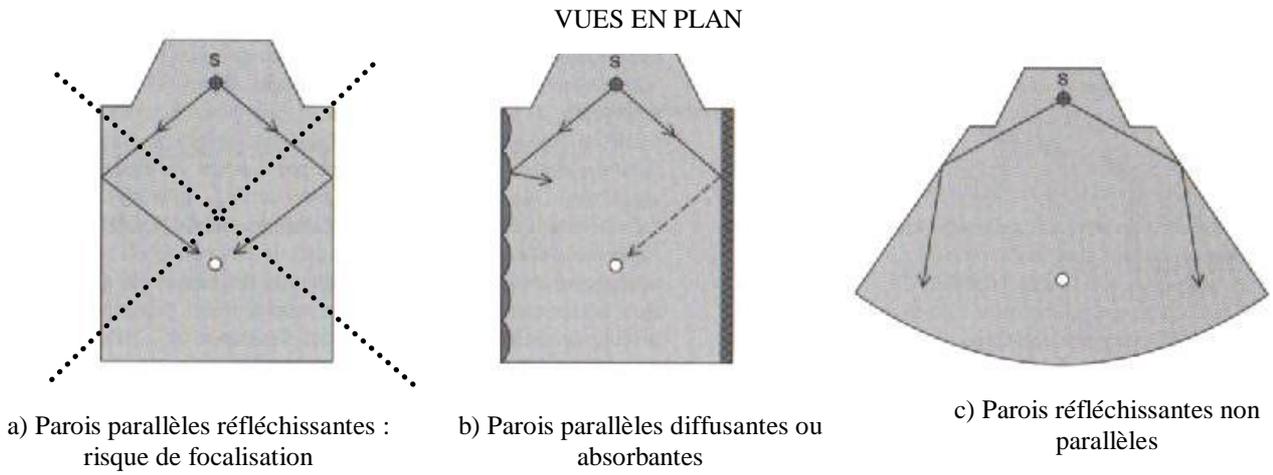


Figure II- 19. Traitement des parois latérales.

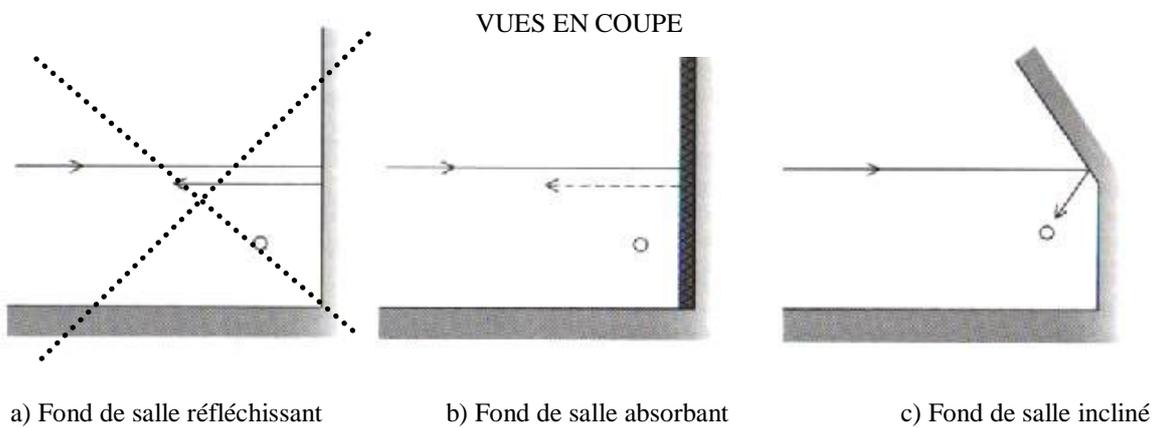


Figure II- 20. Traitement des fonds de salle

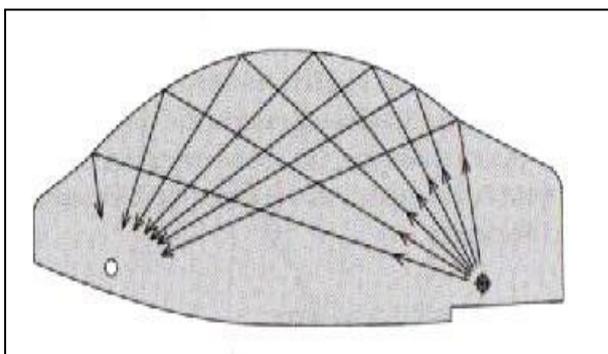


Figure II- 21. Risque de focalisation lié aux formes concaves

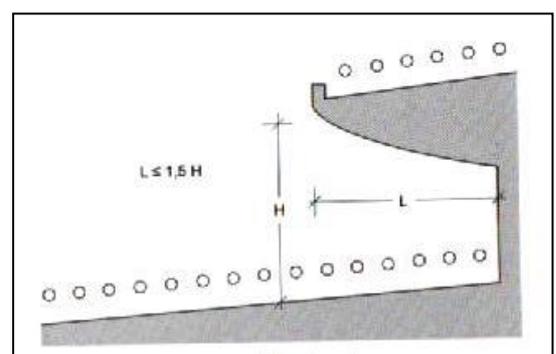


Figure II- 22. Dimensionnement des balcons pour éviter les zones d'ombre acoustique.

(Source: Hamayon, 2006)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué en détail les principes de base de l'isolation acoustique de la construction contre les différents bruits. Ces principes nous pouvons les résumer en cinq points essentiels :

- Créer de la masse, ce principe met en évidence l'intérêt des matériaux massifs dans l'isolation acoustique.
- Réaliser des parois doubles, en utilisant des matériaux hétérogènes, dont les propriétés physiques influent sur la plage de fréquences absorbées. Il faut aussi varier l'épaisseur et la densité volumique des matériaux employés.
- Agir au niveau de l'implantation des constructions, l'agencement des locaux, l'aménagement d'espaces tampons et d'obstacles entre la source de bruit et la construction, influencent la manière dont le bruit atteint les lieux sensibles.
- Etanchéifier les baies et fenêtres, les passages de canalisation, les jointements, etc. qui peuvent réduire les performances acoustiques de la paroi.
- Désolidariser les différents éléments de la construction (cloison-plancher, mur-plancher, canalisation-mur, etc.) afin d'éviter la propagation des vibrations et bruits de chocs, au moyen de sols flottants, plafond suspendus, joints de dilatation et plots antivibratoires.

Nous avons également expliqué les principes de base de la correction acoustique qui consiste à traiter l'absorption des sons afin d'atténuer les phénomènes de réverbération.

Dans le chapitre suivant nous allons développer les différents principes du confort acoustique adaptés aux locaux scolaires.

Introduction

L'instruction s'acquiert en grande partie par la parole et l'audition. La maîtrise de l'acoustique est donc essentielle dans la conception d'une école adaptée à sa fonction première. La conception acoustique du bâtiment doit porter, comme nous l'avons expliqué aux chapitres précédents, sur le choix du site, le plan de masse et les plans intérieurs, les matériaux de construction et de revêtement et les études de traitement des espaces sensibles au bruit.

Les éducateurs, en milieu scolaire, ont la priorité de transmettre des connaissances. Pour cela, ils utilisent différents supports, dont le discours verbal reste le plus privilégié. Une perturbation dans la qualité sonore des locaux scolaires peut réduire l'efficacité de la tâche d'apprentissage. Les établissements d'enseignement sont donc des exemples de bâtiments publics où le confort sonore est primordial. Ce dernier, nécessite d'une part une isolation des locaux afin de maintenir des niveaux de bruits ambiants intérieurs en dessous des valeurs limites. D'autre part, une ambiance acoustique agréable à l'intérieur des locaux, déterminée par le niveau d'absorption des matériaux et une durée de réverbération optimale selon l'usage.

1. Le bruit dans les établissements scolaires

En milieu scolaire, le bruit peut être un élément perturbateur pour la compréhension des cours et la concentration des élèves. Sa présence est due à l'existence de différentes sources sonores à l'extérieur de l'établissement ou à l'intérieur dans les différents espaces.

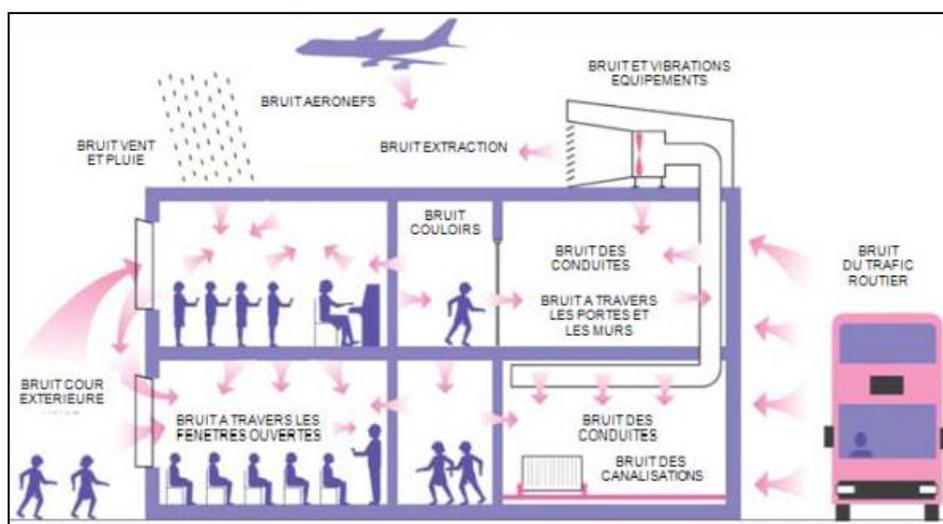


Figure III- 1. Sources de bruit dans les établissements scolaires
(Source : www.ecoutetonlycée.com)

1.1. Sources de bruit extérieures aux bâtiments

- Le trafic routier ou ferroviaire
- Le trafic aérien
- Les activités industrielles et humaines bruyantes.

Leur impact dans les locaux est directement lié à leur nombre, leur proximité et à l'isolation acoustique de la façade du bâtiment.

Une enquête de Shield et Dockrell¹ sur les sources de bruit extérieures des écoles à Londres a révélé que les sources prédominantes étaient les voitures (86% des écoles), les avions (54%), les camions (35%) et les autobus (24%), avec 11% d'écoles exposées au bruit ferroviaire.

Ils ont prouvé que l'exposition chronique au bruit extérieur altère le fonctionnement cognitif². D'une étude, portant sur des écoles à proximité de 03 aéroports: Schiphol à Amsterdam, Barajas de Madrid et Heathrow à Londres³ (2844 élèves de 9 et 10 ans), il ressort une forte corrélation entre le bruit des avions et l'hyperactivité des enfants.

Les résultats de Shield et Dockrell concernant le confort sonore dans 142 écoles primaires de Londres⁴, montrent que les bruits extérieurs (principalement du trafic routier) ont des effets préjudiciables sur les performances des élèves. Celles des enfants du primaire sont plus affectées par les événements sonores particuliers (niveaux max) contrairement aux enfants du pré-scolaire, qui sont affectés par le bruit ambiant.

Il s'avère que les effets du bruit sur les enfants sont le manque d'attention, la perturbation du langage et de la mémoire (sémantique)⁵.

D'une manière générale, les bruits qui affectent le bon déroulement des cours sont les bruits extérieurs générés par les moyens de transport, les bruits intérieurs émanant des couloirs et espaces adjacents et la présence de surfaces dures et réfléchissantes dans les salles⁶.

¹ Shield, B et Dockrell, J. *The effect of noise on children at school: A review*, Journal Building Acoustics n°10, 2003, p.97-116. <http://www.architecture.com>

² Ibid

³ Stansfeld, S.A et al, *Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health*, Journal of Environmental Psychology n° 29, 2009, p 203–207.

⁴ Shield, B et Dockrell, J, *The effects of classroom and environmental noise on children's academic performance*. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem, 2008, (page consultée le 12.05.12). [En ligne], http://www.icben.org/2008/PDFs/Shield_Dockrell.pdf

⁵ Shield, B et Dockrell, *Op. cit.*

⁶ Nelson, P.B et Soli, S.D. Seltz, A. *Acoustical Barriers to Learning*, Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America, 2002. [En ligne], <http://www.centerforgreenschools.org/docs/acoustical-barriers-to-learning.pdf>

1.2. Sources de bruit intérieures aux bâtiments

- Les usagers : élèves et personnel encadrant, qui parlent et se déplacent. Le bruit généré par les usagers croît avec leur nombre.

- Le matériel : comme les équipements techniques, ce sont principalement des équipements de ventilation et de climatisation. Chacun d'eux constitue une source de bruit dont l'intensité varie en fonction de sa puissance, de la qualité de sa conception et de son état d'entretien. Le mobilier, le déplacement d'une chaise ou d'une table engendre plus ou moins de bruit en fonction du type de mobilier, du type de sol, de la façon dont est déplacé l'objet.

Ces sources de bruit intérieures peuvent perturber les activités réalisées dans un local adjacent, comme une salle de classe par exemple, en fonction de l'isolation acoustique entre locaux à l'intérieur du bâtiment.

En plus de ces différentes sources de nuisances sonores, le phénomène de réverbération du local contribue à l'amplification du bruit⁷. Cela dépend principalement des caractéristiques d'absorption acoustique des revêtements disposés sur les parois. Plus les revêtements sont absorbants, plus le phénomène d'amplification du bruit sera faible.

2. Spécificités acoustiques des différents espaces du bâtiment scolaire

Les établissements d'enseignement regroupent différents espaces selon leurs usages et les objectifs de qualité acoustique recherchés. Ainsi, par exemple, l'objectif acoustique dans une salle de classe est d'obtenir une bonne intelligibilité du message parlé, donc un temps de réverbération adapté et une isolation suffisante entre locaux. Cependant, l'objectif dans une cantine est la maîtrise des niveaux sonores et le phénomène de surenchère sonore, appelé «effet cocktail».

2.1. Salle de classe

La salle de classe est le lieu de l'apprentissage où l'enseignant (le locuteur principal) transmet son savoir en s'appuyant très largement sur la communication orale, et les élèves (à la fois locuteurs et auditeurs) écoutent, participent au cours et bavardent entre eux.

La notion de salle de classe est une représentation simplifiée d'activités très différentes réalisées dans le cadre d'apprentissages particuliers: salles de cours, salles de travaux pratiques, salles de langues, salles d'informatique, salle de musique etc...

⁷Knecht, H.A et al. *Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: predictions and measurements*. American Journal of Audiology vol 11, 2002, p 65-71. [En ligne] <http://aja.asha.org/cgi/content/abstract>

Il n'y a pas de règles strictes en ce qui concerne la forme et les dimensions des salles de classe. Elles ont des surfaces variables et sont destinées à accueillir en moyenne une trentaine d'élèves. La hauteur de plafond n'est pas standardisée, il faut toutefois éviter les salles longues et étroites et les salles trop larges. Généralement, on obtient satisfaction avec des salles de 7.50 x 9.00 x 3.60 m³⁸.

Dans la salle de classe, l'élève a besoin d'un environnement propice qui favorise la concentration, la compréhension et l'apprentissage. Cet environnement doit impérativement réunir plusieurs critères à savoir, un éclairage suffisant, une température ambiante, une ventilation confortable et une intelligibilité du discours.

2.1.1. Intelligibilité de la parole et bruit de fond

L'intelligibilité de la parole⁹ est recommandée dans les salles de classe et plus particulièrement dans le cas des messages complexes (apprentissage d'une langue étrangère) ou dans l'apprentissage des jeunes enfants (écoles primaires). Elle dépend des facteurs suivants :

- Bruit de fond dans la salle (bruit interférent) ;
- Qualité acoustique de la salle de classe (Temps de réverbération et forme de la salle)
- Niveau de puissance du discours de l'enseignant et de sa prononciation.

Selon Bradley¹⁰ et Hodgson¹¹, le paramètre le plus important pour l'intelligibilité de la parole est le **rapport signal/bruit**¹². Comme les niveaux de la voix des professeurs varient, ceci signifie qu'il est particulièrement important de réduire le niveau du bruit de fond dans la salle de classe.

Etant donné que la plus grande partie du champ de la parole (émission) se situe dans un champ de fréquences allant de 315Hz à 6000Hz et la compréhension (réception du signal parlé) est principalement due au spectre des fréquences entre 750Hz et 3000 Hz¹³, les bruits de circulation constitués essentiellement de sons graves masquent le langage parlé (les basses fréquences masquent les hautes fréquences). De plus, l'effet de masque est maximum pour des fréquences voisines, c'est pourquoi la voix de l'enseignant peut être fortement altérée par le bavardage d'élèves.

⁸ Knudsen V.O et Harris C.M., *Le projet acoustique en architecture*, Dunod, Paris 1957

⁹ L'intelligibilité est le rapport, exprimé en pourcentage, du nombre de phrases comprises au nombre total de phrases prononcées. Elle peut être mauvaise, acceptable, bonne ou excellente.

¹⁰ Bradley, J.S., Reich, R.D. and Norcross, S.G. *On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility*. Journal of the Acoustical Society of America vol.106, 1999, p.1820-1829.

¹¹ Hodgson, M., *Rating, ranking, and understanding acoustical quality in university classrooms*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 112(2), 2002, p.568-575.

¹² La différence entre le niveau de la voix de l'enseignant (signal utile) et le niveau de bruit de fond de la salle (bruit interférent)

¹³ AFSSE, *Impacts sanitaires du bruit- Etat des lieux- Indicateurs bruit/santé*, novembre 2004. Fichier PDF (consulté le 12/11/08), [En ligne] <http://ufcna.com/Bruit-impact-sante-AFSSE.pdf>.

Dans une analyse des mesures des conditions acoustiques et l'intelligibilité de la parole dans les salles de classe pour les élèves de 12 et 13 ans, Bradley¹⁴ conclut que 30 dB(A) est un niveau de fond approprié, avec des temps de réverbération optima de 0,4 à 0,5 secondes.

Finitzo-Hieber et Tillman (78)¹⁵ recommandent un rapport de signal-bruit de 12 dB(A) pour l'audition normale. Olsen (1988)¹⁶ attribue qu'une valeur plus élevée de S/N 20 à 30 dB(A) est exigée dans l'enseignement des malentendants.

Plus récemment, Bistafa et Bradley¹⁷ recommandent un rapport signal/bruit supérieur à 15 dB(A) dans la salle de classe, 25 dB(A) étant le rapport idéal. Avec des valeurs de temps de réverbération de 0.4 à 0.5 secondes.

La figure III.2 illustre les contours d'intelligibilité pour une pièce de 300 m² en fonction du bruit de fond et le temps de réverbération selon différents objectifs de conception. Dans une salle de classe par exemple, on se réfère à la courbe "besoins particuliers". Pour une intelligibilité de 100%, le bruit de fond ne doit pas excéder 35 dB(A) et un temps de réverbération 0.5 secondes.

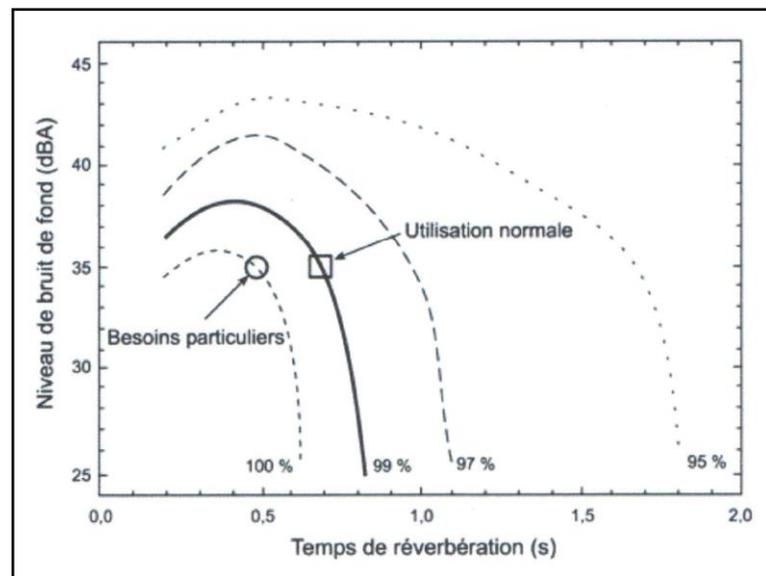


Figure III- 2. Contours d'intelligibilité en fonction du bruit de fond
(Source: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>)

¹⁴ Bradley, J.S. *Speech intelligibility studies in classrooms*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol.80(3), 1986, p.846-854.

¹⁵ Shield, B et Dockrell, J, *The effect of noise on children at school: A review*, *Journal Building Acoustics* n°10, 2003, p.97-106. [En ligne], <http://www.architecture.com/Files/>

¹⁶ Ibid.

¹⁷ Bistafa, S.R. and Bradley, J.S. *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*. *Journal of the Acoustical Society of America* n°107, 2000, p. 861-875.

Si l'isolation acoustique des parois vis-à-vis de l'extérieur ou vis-à-vis des bruits intérieurs (circulation dans les couloirs, etc....) n'est pas suffisante, les sources extérieures à la salle de classe apportent alors une contribution au niveau sonore dans la salle de classe et peuvent perturber l'apprentissage.

2.1.2. Intelligibilité et temps de réverbération

Il a été prouvé que l'intelligibilité de la parole s'améliore avec la diminution du temps de réverbération¹⁸. Ce dernier, quand il est trop long, amplifie les bruits de bavardage dans la salle de classe et les bruits de l'extérieur. De ce fait, le rapport signal/bruit diminue et le message de l'enseignant devient moins intelligible.

La maîtrise du champ réverbéré dans l'architecture de la salle de cours consiste principalement :

- A respecter des formes géométriques favorables à la maîtrise des ondes acoustiques, et à la diffusion des premières réflexions (Figure III-3). De ce fait, la première moitié du plafond ne devrait pas recevoir de matériaux absorbants. Aussi, les plans inclinés du côté de l'enseignant ou en plafond sont recommandés.

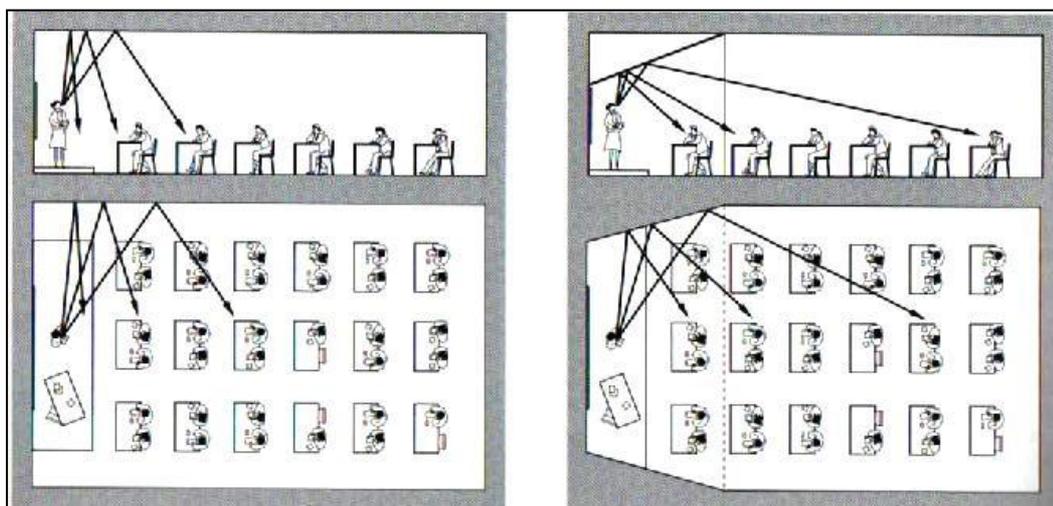
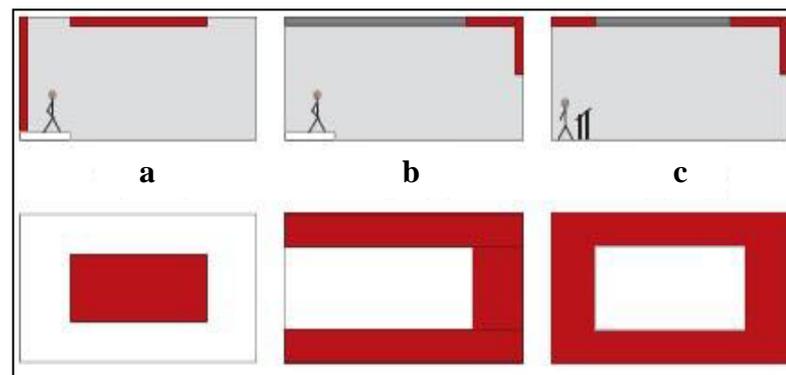


Figure III- 3. Favoriser les premières réflexions

(Source : Hamayon Loïc, 2006)

¹⁸ Hodgson, M. et Nosal, E. *Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms*. Journal of the Acoustical Society of America, vol.111(2), 2002, p.931-939.

- A disposer des matériaux absorbants avec un coefficient d'absorption $\alpha \geq 0.6$, sur la partie de plafond située au fond de la salle ainsi que le mur du fond et un mur latéral. Il est préférable que le traitement des murs soit jusqu'à la hauteur de la tête des élèves (environ 1.20m) mais, en général, le traitement se fait à partir de 1.80 à 2.00 m de hauteur pour éviter la détérioration du matériau absorbant.

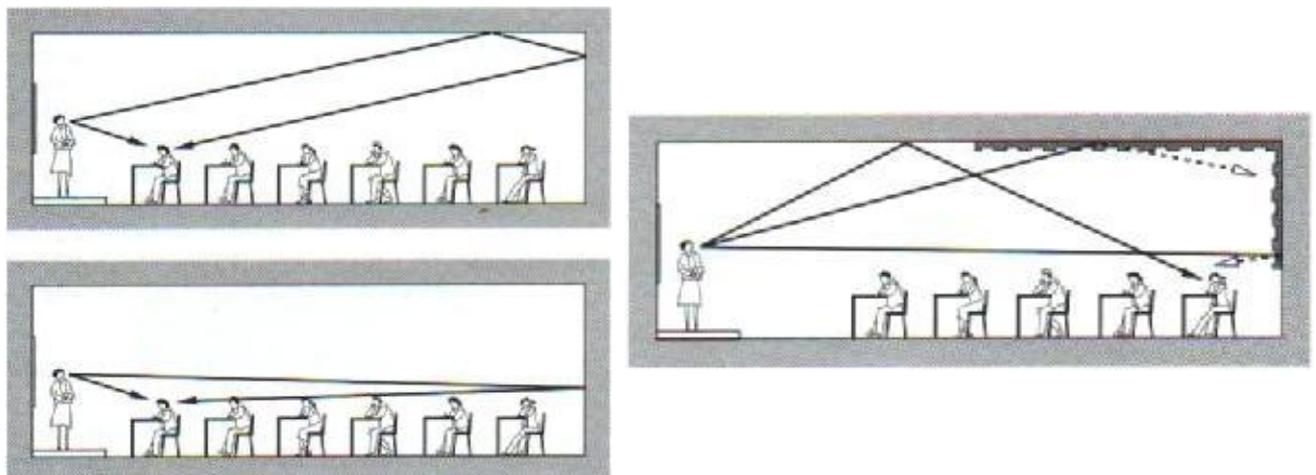


(a: défavorable, b: favorable, c: favorable).

En haut : coupe longitudinale, en bas : zone plafond, vue de dessus.

Figure III- 4. Répartition des surfaces absorbantes

(Source : Société Suisse d'Acoustique, 2004).



A droite : salle non traitée, risque d'écho et de réverbération

A gauche: salle traitée, premières réflexions favorisées et réverbération maîtrisée.

Figure III- 5. Traitement acoustique du plafond et fond de la salle

(Source : Hamayon, 2006)

Pour améliorer l'intelligibilité dans des salles de classes accueillant des formes d'enseignement moderne centrée sur l'interaction des élèves, l'apport d'absorption était la solution retenue¹⁹. Les résultats montrent une amélioration significative des conditions de travail, une diminution des niveaux de bruit ambiants de 5 dB (enseignement traditionnelle) et de 13 dB (travail de groupe); un apaisement du comportement des élèves et les enseignants éprouvent une charge de travail moindre ainsi qu'une plus faible sensibilité au bruit.

Dans une autre étude²⁰ pour améliorer les conditions acoustiques d'écoute salles d'étude d'école maternelle, le choix s'est porté sur une modification de la durée de réverbération par rajout de 50 % d'absorption sous forme de cubes suspendus au plafond (Figure III-6)



Figure III- 6. Exemple d'un traitement acoustique de la salle
(Source: Semidor Catherine, 2003)

Les différences des temps de réverbération mesurés (avant et après traitement) dans les locaux d'activité et dans les salles de classe étaient importantes et nettement perceptibles.

La qualité acoustique des salles de classe est un élément important de l'apprentissage verbal, qui représente lui-même la base des acquisitions scolaires. Diverses publications scientifiques internationales démontrent que l'environnement acoustique de la salle de classe représente un facteur très important de la réussite scolaire²¹.

¹⁹ Oberdörster. M et Tiesler. G, Ergonomie acoustique des locaux scolaires, Institut Fédéral pour la Santé et la Sécurité des Travailleurs en Allemagne, 2006

²⁰ Semidor Catherine, *La qualité sonore des espaces recevant les tout-petits*, Colloque européen « Construire avec les sons », 17/18 mars 2005, Fichier PDF, (consulté le 15/04/09) [En ligne], <http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr>.

²¹ CAPS - Cellule Audition de Paris-Sud, 2003. In. AFSSE, *Impact sanitaire du bruit*, novembre 2004, p.185

2.2. Cantine

Dans les cantines scolaires, l'objectif principal pour le confort des usagers est la maîtrise des niveaux sonores. Il s'agit principalement d'éviter l'effet cocktail²² pour un environnement confortable et pour se faire entendre d'un voisin, sans avoir à forcer la voix. Pour cela, il convient de limiter la densité d'occupation : la densité recommandée est de l'ordre de 0.4 ou 0.5²³ élèves/m².

Le temps de réverbération préconisé pour une bonne intelligibilité dans les salles à manger est de 0.5 seconde pour un volume inférieur ou égal à 250 m³ et de 0.7 seconde pour un volume supérieur à 250 m³. Dans les cuisines qui communiquent souvent avec les salles à manger et contribuent à augmenter leurs niveaux de bruit ; on cherche à obtenir des durées de réverbération inférieures à 1.5 seconde.

Pour réduire le temps de réverbération dans les cantines, on limite la hauteur sous plafond à 3.20 m²⁴. On aménage des cloisons de faible hauteur (pour la surveillance et convivialité) en matériaux absorbants.



Figure III- 7. Traitement acoustique du plafond d'une cantine scolaire en matériau absorbant
(Source : www.euphonie.fr)

Les plafonds sont traités en matériaux absorbants dont les coefficients d'absorption acoustique est supérieur à 0.6 (bandes d'octave centrées sur 500, 1000 et 2000 Hz) (Figures III-7 et III-8).

²² Lors d'une réunion de type cocktail ou dans un restaurant, le niveau de bruit augmente avec le nombre de personnes, à un certain niveau il sera presque impossible de s'entendre parler, c'est ce qu'on appelle effet cocktail party

²³ Loïc Hamayon, Réussir l'acoustique du bâtiment, Le Moniteur, Paris, 2006, p.207

²⁴ Ibid. p.208

Ces matériaux doivent être lavables et supportant l'humidité. Lorsque la hauteur sous plafond est supérieure à 3.50- 4 m, on traite les parties supérieures des murs du réfectoire.

Le niveau de bruit dans un réfectoire traité et occupé est d'environ 60 dB, si les bruits de l'extérieur ne dépassent pas cette valeur, il n'est pas nécessaire de prendre des précautions pour l'isolation acoustique.

Le plancher doit être recouvert d'un matériau résilient (Linoléum, carreaux d'asphalte ou caoutchouc).

Evidemment, le choix, l'emplacement et les dimensions des matériaux absorbants sur les cloisons ou plafonds doivent faire l'objet d'une étude acoustique détaillée.



Figure III- 8. Traitement acoustique du plafond en baffles acoustiques
(Source : www.euphonie.fr)

2.3. Espaces de circulation

Les espaces de circulation sont les lieux de transition au sein des établissements scolaires: couloirs, halls d'entrée et cages d'escaliers. Ils accueillent ponctuellement un nombre très important d'élèves dans les périodes où le contrôle des adultes est réduit.

Dans ces espaces, l'objectif principal est de maîtriser l'amplification de la réverbération pour ne pas créer de nuisances dans les espaces adjacents : salles de classe, bibliothèque...

Pour cela, la réglementation française en vigueur préconise une durée de réverbération inférieure ou égale à 1.2 seconde pour un volume compris entre 250 m^3 et 512 m^3 et inférieure ou égale à $0.15\sqrt{V}$ pour un volume supérieur à 512 m^3 .

Elle fixe, aussi la surface requise pour l'absorption acoustique dans les circulations communes des établissements d'enseignement²⁵. L'aire d'absorption équivalente A de la circulation horizontale et hall d'un volume inférieur à 250 m^3 doit être au moins égale à la moitié de la surface au sol de l'espace considéré ($A \geq S_{\text{sol}} / 2$)

L'utilisation de matériaux absorbants pour le traitement acoustique dans les espaces de circulation des écoles se fait par :

- La disposition sur les paliers, marches et contremarches de tapis. Cette solution présente des problèmes de coût, d'entretien et d'usure.
- La mise en place de matériaux absorbants au plafond (Fig.III-9) et murs (Fig.III-10). Ces solutions sont les plus utilisées car elles présentent l'avantage d'être plus ou moins durables.

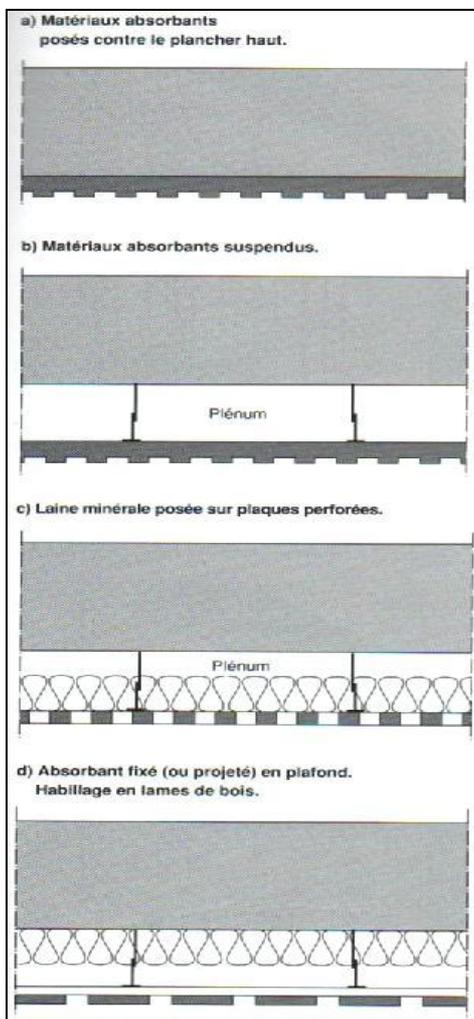


Figure III- 9. Exemples de matériaux absorbants posés en plafond
(Source: Hamayon, 2006)

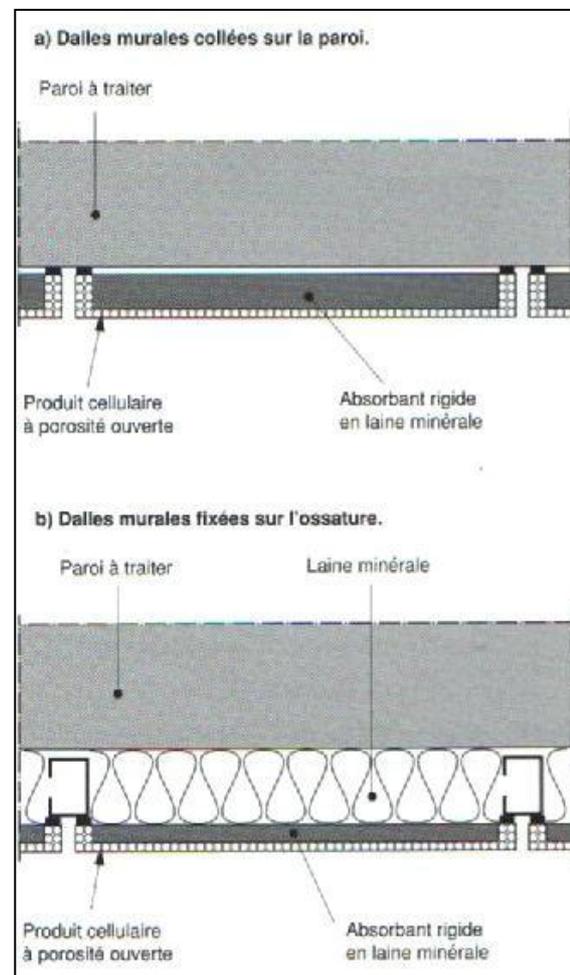


Figure III- 10. Exemple de matériaux absorbants posés sur les murs
(Source : Hamayon, 2006)

²⁵ Arrêtés du 25 avril 2003 relatifs à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement.

2.4. Amphithéâtre

Les amphithéâtres d'écoles servent souvent à de multiples fonctions : salle de réunion, grande salle de classe, théâtre, auditorium...

Il faut une étude préalable pour le volume, la forme et réflexions des sons pour les projets de construction des amphithéâtres. Cependant, on doit utiliser une amplification du son quand le volume dépasse les valeurs suivantes²⁶: écoles, 1200 m³ ; lycée, 1500 m³ et université, 1800 m³.

L'amphithéâtre doit être conçu dans un environnement calme. S'il est inclus dans un bâtiment, il doit être soigneusement isolé des espaces adjacents, on utilisera des murs avec des indices d'isolement élevés, des portes étanches et un système de conditionnement d'air silencieux.

La disposition des auditeurs en gradins favorise l'absorption. On placera des réflecteurs du son coté conférencier de manière à distribuer les ondes sonores au milieu et au fond de l'amphithéâtre (Figure III-11). Il faut rendre les murs latéraux diffusants en les habillant de reliefs. Le sol doit être recouvert de linoléum ou revêtements élastiques.

Il est nécessaire de réaliser un compromis entre les propriétés optimums de l'auditorium scolaire pour la parole et celles pour la musique.

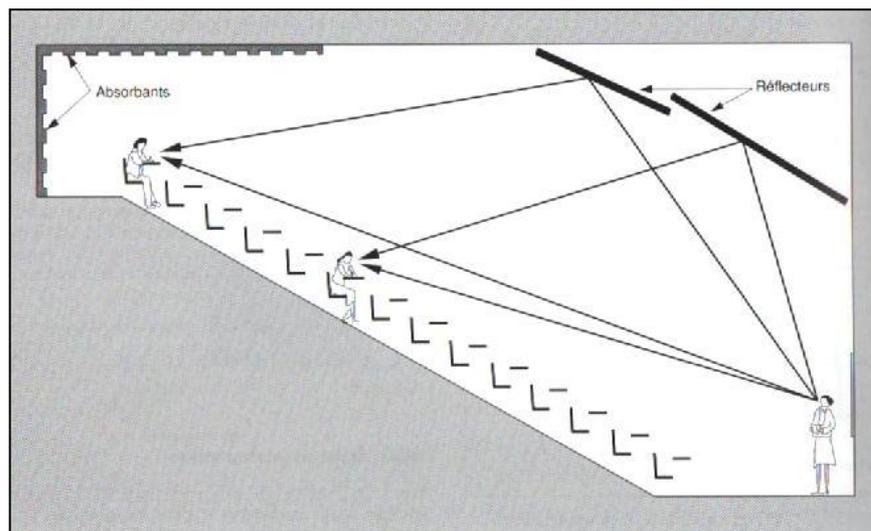


Figure III- 11. Disposition de réflecteurs et matériaux absorbants dans un amphithéâtre
(Source : Hamayon Loïc, 2006)

²⁶ V.O. Knudsen et C.M. Harris, Le projet Acoustique en Architecture, Dunod, Paris, 1957

2.5. Salle de musique

L'isolation sonore des salles de musique doit être considérée avec une attention particulière car il n'est pas seulement nécessaire de se protéger contre les bruits extérieurs ; il faut également veiller à concentrer la musique à l'intérieur pour ne pas gêner les locaux voisins. On obtient généralement satisfaction avec un isolement sonore d'au moins 45 dB, les fenêtres doivent être à double vitrage acoustique et les portes doivent avoir une structure solide.

Si elle n'est pas dotée de ventilation artificielle, la salle de musique doit être éloignée des salles de cours, on y accède par un couloir traité qui remplira la fonction de 'sas acoustique'.

La diffusion du son y est nécessaire, pour cela, il faut prévoir des panneaux obliques ou autres irrégularités à la surface des murs et plafonds. La durée de réverbération optimale pour la salle de musique dépend de la nature de la musique diffusée.

A l'intérieur de la salle de musique, il est recommandé de bien répartir les matériaux absorbants. Comme pour l'amphithéâtre, les murs et plafond voisins de l'estrade doivent être recouverts de matériaux réfléchissants, tout en évitant le parallélisme, tandis que les murs et plafond de fond doivent être absorbants. Il est recommandé d'utiliser des planchers et des lambris en bois qui fournissent une absorption des basses fréquences de la musique. L'utilisation des rideaux de velours et autres textures est déconseillée.

2.6. Bibliothèque

Le confort acoustique dans la bibliothèque scolaire nécessite un contrôle soigné des bruits ambiants et de la réverbération. Il est impératif de maintenir un niveau de bruit suffisamment bas car le silence est véritablement d'or dans une bibliothèque.

Généralement, si on obtient un niveau de bruit de fond hors utilisation de 40 dB (bibliothèque vide), on assure des conditions acoustiques satisfaisantes pendant les périodes d'occupation. De ce fait, l'utilisation de matériaux avec des coefficients d'absorption élevés est conseillée sur les plafonds. Leur utilisation n'est pas nécessaire sur les murs, car ces derniers supportent souvent un rayonnage plein de livres qui constitue une surface suffisamment absorbante.

Pour maîtriser les bruits de pas, le plancher doit être revêtu de liège ou moquette.

2.7. Gymnase scolaire

Les gymnases scolaires ont, généralement, un volume de 2000 m³ (22m × 11m et 8 à 9m de hauteur). La durée de réverbération préconisée est de l'ordre de 0.8 à 1.8 secondes (Fig IV.11.), on ne peut l'obtenir que par un traitement acoustique du plafond et la partie supérieure des murs. Les matériaux acoustiques choisis doivent être solides (panneaux de fibres appliqués sur une monture rigide, laine minérale protégée par un revêtement perforé) et avoir un coefficient d'absorption moyen de 0.6.

Il faut éviter les murs opposés lisses, réfléchissants et parallèles qui peuvent générer des 'flutter échos'.

Il est recommandé de placer le gymnase à très grande distance des salles de classe et locaux nécessitant un environnement calme.

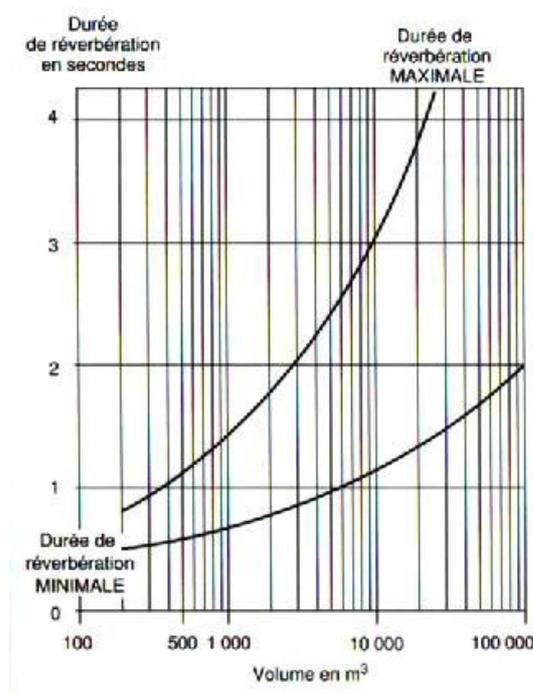


Figure III- 12. Durée de réverbération maximale et minimale en fonction du volume du gymnase
(source : Hamayon Loïc, 2006)

Elle est définie par la moyenne arithmétique des durées de réverbération du gymnase vide et équipé, dans les bandes d'octave de fréquence médiane comprises entre 125 et 4000 Hz.

La durée de réverbération maximale représentée sur la figure est égale à $0.14\sqrt[3]{V}$

3. Réglementation du confort acoustique dans les écoles

En évitant de construire des établissements scolaires près des axes de circulation, pour des raisons de sécurité routière, on évite aussi l'exposition aux nuisances ; pollution et bruit. Cet aspect élémentaire de l'urbanisme contribue de manière significative, à l'isolation acoustique des écoles.

L'architecture joue ensuite un rôle de premier plan, par l'implantation des bâtiments scolaires, leur orientation et leur conception. Les exigences acoustiques réglementaires dans divers pays fixent trois paramètres pour un confort acoustique optimal dans les locaux scolaires :

- 1- Niveau de bruit ambiant maximal perçu dans chaque espace en fonction de son usage ;
- 2- Isolement acoustique vis-à-vis de l'extérieur et entre locaux, c'est-à-dire des indices d'affaiblissement acoustique des murs extérieurs ou de séparation, ainsi que des valeurs limites acoustiques relatives aux émissions internes du bruit : bruit des équipements (chauffage, ventilation) ou bruit intérieur (bruits de couloir, des autres classes) ainsi que les bruits de chocs.
- 3- Temps de réverbération dans les locaux en fonction de leur usage.

3.1. Bruit ambiant intérieur

Les recommandations internationales expriment un niveau de bruit à ne pas dépasser à l'intérieur des locaux. Ces valeurs limites sont modulées selon la nature et l'usage des locaux dont la variété est finalement assez grande.

Le tableau III-1 présente les chiffres pour quelques pays. L'indicateur de bruit est le niveau de pression acoustique équivalent pondéré $Leq(A)$.

Le tableau III-2 présente les niveaux de bruit de fond maxima recommandés dans les salles de classe.

Une comparaison des recommandations concernant le niveau de bruit ambiant maximal dans les salles de classe montre que les valeurs françaises sont moins exigeantes que celles des autres pays.

Tableau III- 1. Recommandations en termes de bruit ambiant intérieur pour divers pays

(source: Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale, 2004)

Pays		Belgique	France	Allemagne	Italie	Portugal	Grande-Bretagne	Suède	Turquie	Brésil	USA
Année des textes		1977/87	1995	1989	1975		1997	1995	1986	1987	2002
Type d'espace	Salle de classe	30-45 ⁽¹⁾	38	30	30	35	40	30	45	40-50	35-40
	Bibliothèque	-	33	30	-	-	40	35	-	35-45	35-40
	Salle de musique	30-40	-	-	-	-	30	-	-	-	-
	Hall, couloir, préaux	-	-	-	40	-	50	-	-	-	-
	Restaurant, gymnases	35-40	43	-	40	40-45	-	40	60	-	-
	Ateliers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Etablissements pour handicapés auditifs ⁽²⁾	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-

(1) Les niveaux intérieurs préconisés dépendent du niveau du bruit de l'environnement dans le quartier, classé en quatre catégories

(2) Les niveaux recommandés sont inférieurs de 10 dB pour les malentendants.

Tableau III- 2. Niveaux du bruit ambiant dans les salles de classe

(source: Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale, 2004)

Pays	Normes, recommandations ou directives	Source
France	38 dB(A) dans le cas d'un bruit continu ; 43 dB(A) dans le cas d'un bruit intermittent	Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement
Suisse	35 dB(A) (en LeqA sur la durée d'un cours)	Recommandation suisse
Grande-Bretagne	35 dB(A) pour les salles de classe recevant moins de 50 personnes; 30 dB(A) pour les salles recevant plus de 50 personnes. (en LeqA sur 30 minutes)	Recommandations du Building Bulletin de juin 2003
USA	35 dB pour les salles de volume < 566 m ³ ; 40 dB pour les salles de volume > 566 m ³ .	ANSI S12.60-2002 (Acoustical Performance criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools) de 2002
	30 dB max	American speech Language Hearing Association (ASHA-1990)

2.3. Temps de réverbération

En terme de temps de réverbération (T_r) des salles de classe, l'American speech Language Hearing Association (ASHA) aux Etat-Unis, recommande un $T_r = 0,4$ s. La norme ANSI S12.60 de 2002, fixe un $T_r = 0.6$ s pour un volume de la salle inférieur à 283 m^3 .

En Belgique, la recommandation BIAP (Bureau International d'Audiophonologie) de février 2003, fondée sur les recommandations de l'OMS, est de $0,4$ s. En France, l'arrêté du 25 avril 2003 indique des T_r de $0,4-0,8$ s. dans une salle de volume $\leq 250 \text{ m}^3$ et de $0,6-1,2$ s dans une salle de volume $>250 \text{ m}^3$.

En Angleterre, les recommandations du Building Bulletin (2003) est un $T_r = 0.8$ s pour les classes vides et meublées (moyenne obtenue des T_r à 500 Hz , 1 KHz et 2 KHz).

En Algérie, le T_r préconisé dans les locaux scolaires est 0.8s (DTR C3.1.1- 2004: Isolation acoustique des parois aux bruits aériens- Règle de calcul)

En France, les durées de réverbération réglementaires (Articles 5 et 8 de l'arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement) dans les autres locaux des établissements d'enseignement sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III- 3. Durée de réverbération réglementaire dans les locaux scolaires

(source : Hamayon, 2006)

Locaux concernés	Durée de réverbération T_r (secondes)
Salle de repos, d'exercice et de jeux des écoles maternelles Local d'enseignement, de musique, d'études ou d'activités pratiques, salle de restauration et salle polyvalente d'un volume $\leq 250 \text{ m}^3$ Local médical ou social, infirmerie, sanitaires, administration, foyer, salle de réunion, bibliothèque, CDI	$0.4 \text{ s} \leq T_r \leq 0.8 \text{ s}$
Local d'enseignement, de musique, d'études ou d'activités pratique d'un volume $> 250 \text{ m}^3$, sauf atelier bruyant	$0.6 \text{ s} \leq T_r \leq 1.2 \text{ s}$
Salle de restauration d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$T_r \leq 1.2 \text{ s}$
Salle polyvalente d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$0.6 \text{ s} \leq T_r \leq 1.2 \text{ s}$ et étude particulière obligatoire
Autres locaux et circulations accessibles aux élèves d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	Si $250 \text{ m}^3 < V \leq 512 \text{ m}^3$: $T_r \leq 1.2 \text{ s}$ Si $V > 512 \text{ m}^3$: $T_r \leq 0.15^3 \sqrt{V}$

Les valeurs limite du T_r ci-dessous correspondent à la moyenne arithmétique des durées de réverbération dans les intervalles d'octave centrés sur 500 , 1000 et 2000 Hz

3.3. Isolement acoustique vis-à-vis de l'environnement extérieur et entre locaux

Pour l'isolation acoustique vis-à-vis de l'extérieur, l'arrêté de 25 avril 2003, relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement en France fixe les valeurs limites pour l'isolement des écoles contre les bruits aériens extérieurs (bruit de transport terrestre), l'isolement acoustique standardisé pondéré $D_{nT,A,tr}$ exigé variera de 30 à 45 dB ; mais en aucun cas il ne sera inférieur à 30 dB. Pour l'isolement $D_{nT,A,tr}$ des locaux contre le bruit des aéroports, il est de 35 dB dans la zone C, 40 dB dans la zone B et 47 dB dans la zone A.

La réglementation allemande préconise d'adopter l'isolation des écoles en fonction des niveaux sonores extérieurs. Le tableau suivant présente les niveaux d'isolation de la façade requis pour les locaux scolaires en fonction des bruits extérieurs en Allemagne :

Tableau III- 4. Niveaux d'isolation de la façade requis pour les locaux scolaires
(source: AFSSE, 2004)

Bruit mesuré à l'extérieur	Isolation requise de la façade
Inférieur à 55 dB(A)	30 dB
55 à 60 dB(A)	30 dB
61 à 65 dB(A)	35 dB
66 à 70 dB(A)	40 dB
71 à 75 dB(A)	45 dB
76 à 80 dB(A)	50 dB
Plus de 80 dB(A)	Doit faire l'objet d'une étude spécifique

L'isolement entre locaux est le paramètre le plus travaillé dans les normes et pratiques étrangères. Les principales valeurs d'indicateurs d'affaiblissement acoustique pour différents pays européens sont présentées dans le tableau III-5 :

Tableau III- 5. Valeurs requises d'affaiblissement acoustique entre locaux dans différents pays européens

(Source : AFSSE, 2004)

Pays	Belgique	Allemagne	Italie	Angleterre	Suède
Isolation entre une salle et une autre classe	25-49	47	40	28-38	30-44
Salle de classe avec la cage d'escalier	15-39	52	42	-	44
Salle de classe et un atelier	-	55	-	48	-
Salle de classe et salle de sport	42-66	55	-	28	-
Salle de classe et la cantine	-	-	-	-	-
Salle de classe et salle de musique	42-66	-	-	-	60
Salle de classe et salle de soins	-	-	-	-	52

En France, l'article 2 de l'arrêté de 25 avril 2003 exige un isolement acoustique standardisé pondéré aux bruits aériens $D_{nT,A}$ minimal (dB). Les tableaux suivants présentent les valeurs $D_{nT,A}$ minimal des écoles maternelles et les autres établissements d'enseignement :

Tableau III- 6. $D_{nT,A}$ minimal (dB) des écoles maternelles (Source : Hamayon, 2006)

Local de réception	Local d'émission					
	Salle de repos	Salle d'exercice ou local d'enseignement ⁽¹⁾	Administration	Local médical, infirmerie	Espace d'activités, salle d'évolution, salle de jeux, local de rassemblement fermé, salle d'accueil, salle de réunions, sanitaires ⁽²⁾ , salle de restauration, cuisine, office	Circulation horizontale, vestiaire
Salle de repos	43 ⁽³⁾	50 ⁽⁴⁾	50	50	55	35 ⁽⁵⁾
Local d'enseignement, salle d'exercice	50 ⁽⁴⁾	43	43	50	53	30 ⁽⁵⁾
Administration, salle des professeurs	43	43	43	50	53	30
Local médical, infirmerie	50	50	43	43	53	40

(1) Notamment dans le cas d'un établissement d'enseignement, voisin d'une école maternelle.

(2) Dans le cas de sanitaires affectés à un local, il n'est pas exigé d'isolement minimal.

(3) Un isolement de 40 dB est admis en cas de porte de communication, de 25 dB si la porte est antipince-doigts.

(4) Si la salle de repos n'est pas affectée à la salle d'exercice. En cas de salle de repos affectée à une salle d'exercice, un isolement de 25 dB est admis.

(5) Un isolement de 25 dB est admis en présence de portes antipince-doigts

Tableau III- 7. $D_{nT,A}$ minimal (dB) des établissements d'enseignement autres que les écoles maternelles
(source : Hamayon, 2006)

Local de réception	Local d'émission						
	Local d'enseignement, d'activités pratiques, administration	Local médical, infirmerie, atelier peu bruyant, cuisine, local de rassemblement fermé, salle de réunion, sanitaires	Cage d'escalier	Circulation horizontale vestiaire fermé	Salle de musique, salle polyvalente, salle de sport	Salle de restauration	Atelier bruyant
Local d'enseignement, d'activités pratiques, administration, bibliothèque, salle de musique, salle de réunion, salle de professeurs, atelier peu bruyant	43 ⁽¹⁾	50	43	30	53	53	55
Local médical, infirmerie	43 ⁽¹⁾	50	43	40	53	53	55
Salle polyvalente	40	50	43	30	50	50	50
Salle de restauration	40	50 ⁽²⁾	43	30	50	-	55

(1) Un isolement de 40 dB est admis en présence d'une ou plusieurs portes de communication

(2) A l'exception d'une cuisine communiquant avec la salle de restauration

Le même arrêté, exige qu'un équipement de chauffage et de ventilation fonctionnant de manière intermittente n'engendre pas un bruit supérieur à 38 dB(A) et 33 dB(A) s'il fonctionne de manière continue, dans les bibliothèques, centres de documentation et locaux médicaux, les salles de repos et les salles de musique. Ce niveau est porté à 43 dB (A) pour les autres locaux.

Le niveau de bruit des équipements électriques ne doit pas dépasser 33 dB(A) dans les bibliothèques, centres de documentation, locaux médicaux, salles de repos et salles de musique et 38 dB(A) pour les autres locaux.

4. Résultats de recherche sur l'évaluation du confort acoustique dans les salles de classe

Dans une enquête²⁷ sur la perception de la qualité environnementale auprès d'élèves du secondaire, il a été démontré que dans les salles traitées, les élèves étaient satisfaits de l'ambiance sonore alors que dans les salles de classe non traitées, ils éprouvaient une diminution de la concentration. Il y avait une forte corrélation entre les scores de performances et les niveaux max LAmax. Cela prouve que les capacités des élèves du secondaire sont affectées par des bruits intermittents.

Franchini et al²⁸ ont mené une série de mesures de bruit dans une centaine d'établissements scolaires (maternelles, élémentaires, collèges et lycées). Les résultats indiquent que les niveaux intérieurs mesurés en Leq dB(A) varient entre 40,8 à 50,8 dB(A). Les niveaux extérieurs calculés en façade des locaux varient entre 59,4 et 64,6 dB(A). Les temps de réverbération mesurés dans les fréquences de 250 à 4000 Hz, dépassent les valeurs recommandées dans 83% des cas.

Une enquête de Shield et Dockrell²⁹, concernant 2000 élèves du primaire à Londres montre que :

- la plus grande part du bruit extérieur vient du trafic routier urbain.
- les niveaux acoustiques externes et internes influencent les résultats de tests de performance.
- les enfants sont sensibles au bruit extérieur, et gênés par des bruits spécifiques.
- le bruit intérieur est dominé par le bruit produit par les élèves eux-mêmes.
- le bruit de fond fort affecte les performances aux tâches académiques qui nécessitent l'usage du langage.
- les enfants qui présentent des besoins éducatifs particuliers sont très vulnérables au bruit de fond.

Zannin et Marcon³⁰ ont évalué le confort acoustique dans une école construite selon un standard brésilien (023), elle possède 04 salles de classe séparées par un couloir central de 7x7x3,1m. Les murs qui séparent les classes du couloir sont munis d'ouvertures permettant la ventilation et l'éclairage des salles. La capacité maximale de chaque salle est de 40 élèves.

²⁷ Astolfi, A.; Pellerey, F. Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.123, 2008, p.163-173. [En ligne], <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>.

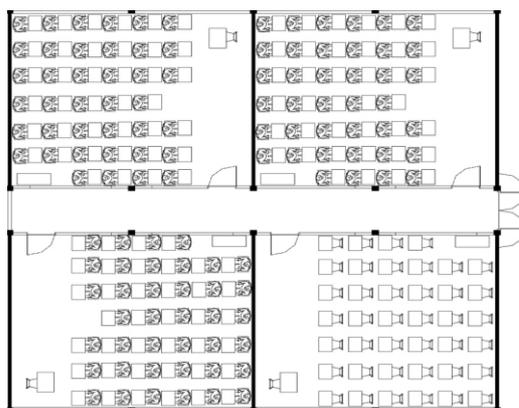
²⁸ Franchini A et al, *Pollution sonores et prestations acoustiques dans les édifices scolaires*,1995, (page consultée le 12/05/2011), [En ligne], <http://www.zebalice.it/rspiazzi/web>.

²⁹ Shield. B et Dockrell. J, *The effect of noise on children at school: A review* ,Journal Building Acoustics n°10, 2003, p.97-106. [En ligne] <http://www.architecture.com>.

³⁰ Zannin. PHT et Marcon. CR, *Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms*, Applied Ergonomics n° 38, 2007, p.675-680.

Les mesures acoustiques ont porté sur trois paramètres:

- Niveau du bruit ambiant (L_{Aeq}) à l'intérieur de la salle porte fermé et fenêtre ouverte, et à l'extérieur de l'école ;
- Temps de réverbération (Salle de classe vide, salle de classe occupée par 20 élèves, salle de classe occupée par 40 élèves) ;
- Isolement acoustique (l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R'_w : The weighted apparent sound reduction index).



Vue en plan de l'école testée
(source: Zannin et Marcon, 2007)

Les salles de classe étudiées ne comportent aucun traitement acoustique. Des simulations du temps de réverbération ont été effectuées avec différents type de matériaux isolants : Plaque de plâtre, contreplaqué et contreplaqué perforé.

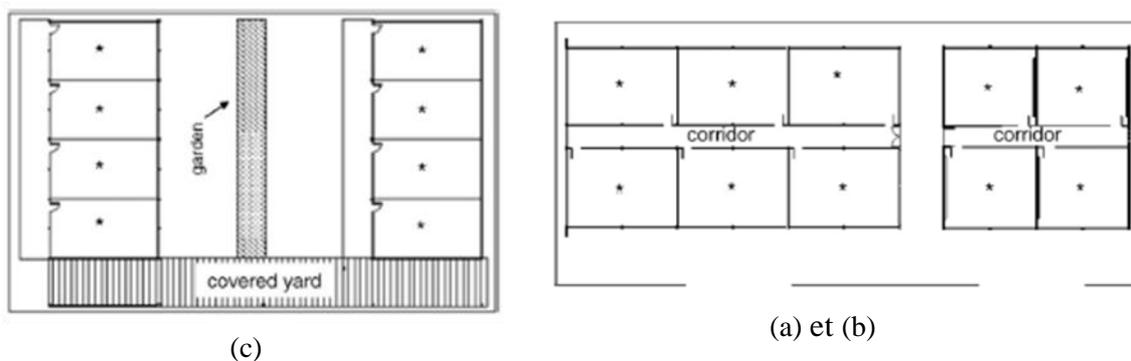
Malgré le fait que l'école évaluée se situe dans une zone urbaine calme (L_{Aeq} extérieur=53 dB(A)), Le L_{Aeq} mesuré à l'intérieur de la salle de classe vide avec les salles voisines occupées, varie entre 56,2 dB(A) et 63,3 dB(A). Ces valeurs sont supérieures aux limites fixées par les recommandations. Par conséquent, les salles de classe sont considérées comme bruyantes et les bruits sont générés par les activités des autres classes. Les résultats des questionnaires confirment les mesures acoustiques, indiquant que le bruit perçu à l'intérieur de la salle de classe provient des salles voisines : Les enseignants désignent les bruits d'élèves de classe voisine, comme source principale de bruit. Les élèves désignent : les bruits de leur propre classe (35%), bruit de la classe voisine (33%), voix de l'enseignant (24%) et autres sources (8%).

Quant aux temps de réverbération relevés, ils sont supérieurs aux limites recommandées. Cela est dû à l'absence de traitement acoustique. Toutefois, la classe atteint un T_r acceptable lorsqu'elle est entièrement pleine (40 élèves).

Les meilleurs résultats de simulation de plafonds traités pour corriger les durées de réverbération, sont obtenus par le contreplaqué perforé.

Zannin et Zwirtes³¹ ont mené une étude dans 6 écoles au Brésil pour évaluer la qualité acoustique des salles de classe de conceptions différentes :

- Design (a) caractérisées par des salles de classe alignées le long d'un couloir central (voir plans ci-dessous) construites en 2001 et 2005. Le volume de la salle de cours est d'environ 156 m^3 , les planchers sont en carrelage et le revêtement des murs et plafonds en plâtre.
- Design (b) similaires aux précédentes avec des différences de hauteurs des locaux et matériaux de construction. La construction de ces écoles date de 1977 et 1978. La salle de cours a un volume de 140 m^3 , les plafonds sont en bois lambrissés, les planchers en parquets et les murs en brique revêtus de plâtre peint.
- Design © composées de blocs indépendants, renfermant les salles de classe, autour de la cour. Ces écoles sont achevées en 1998. Le volume de la salle est d'environ 140 m^3 .



Plans de distribution des salles de cours des écoles testées
(source: Zannin et Zwirtes, 2009)

La qualité acoustique des salles de classe a été analysée sur la base des mesures effectuées in-situ de:

- la durée de réverbération T_r (classe inoccupées et meublées),
- le niveau du bruit ambiant L_{eq} extérieur et intérieur (salle de classe vide et occupée)
- l'isolement acoustique (mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique apparent R'_{w_j}).

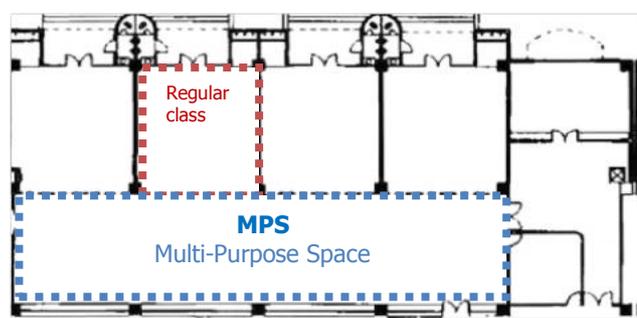
³¹ Zannin, PHT et Zwirtes. DPZ, *Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools*, Applied Acoustics n°70, 2009, p. 626-635.

L'évaluation acoustique des trois conceptions révèle une mauvaise qualité acoustique impliquant tant le design architectural que les matériaux utilisés. Dans la conception (b) et (c), l'emplacement des espaces de récréation et cours d'écoles favorise l'augmentation des niveaux de bruit ambiant intérieur. Pour les écoles de design (a), l'utilisation d'ouvertures vitrées dans les murs séparant les salles de classe et couloirs, permet au bruit des autres classes et hall de pénétrer, augmentant ainsi le bruit ambiant.

Quant aux temps de réverbération, il a été trouvé que les vieilles écoles (design b) offrent de meilleures conditions acoustiques en raison des matériaux de finition des planchers et plafonds.

D'une manière générale, les niveaux de bruit ambiant mesurés dans les différentes salles de classe étaient au-dessus des recommandations. Cela est dû, en grande partie à l'isolation inadéquate des façades et murs de séparation.

Dans une recherche³² qui a été menée en Taïwan pour analyser l'environnement acoustique d'une forme de conception nouvelle très répandue dans ce pays, qui est « des salles de classe communes » (Joint classrooms). Le but de cette recherche est de comparer l'environnement acoustique de ces salles de classe communes et des salles traditionnelles.



Plan des salles de classe communes (Joint classrooms)
(source: Che-Ming Chiang et Chi-Ming Lai, 2008)

Il a été trouvé que les niveaux sonores dans les classes communes et traditionnelles excèdent 55 dB(A). Les sources de bruits en cause sont principalement les élèves et enseignants des classes contiguës dans le premier design et les bruits routiers dans le second design.

Dans une étude comparative entre des paramètres acoustiques mesurés et les mêmes paramètres calculés (comme le temps de réverbération) dans huit (08) salles de classe de lycées. Les temps de réverbération de la formule de Sabine sont les plus précis et se rapprochent considérablement des

³² Che-Ming Chiang et Chi-Ming Lai. *Acoustic environment evaluation of joint classrooms for elementary schools in Taiwan*, Building and Environment n° 43, 2008, p 1619-1632.

valeurs mesurées pour les salles vides. Pour les salles occupées, les formules d'Eyring et de Sabine ont les résultats les plus précis³³.

Les salles de classe faisant partie de cette investigation ont des superficies comprises entre 40 et 78 m², et des volumes entre 160 et 296 m³. L'échantillon est assez hétérogène, ce qui a permis d'avoir plusieurs résultats du TR. L'exactitude entre les valeurs calculés et mesurés est telle, qu'elle à été citée de type ingénierie (c'est à dire des différences relatives globales entre les valeurs inférieures à 10% pour l'ensemble de l'échantillon).

Des résultats similaires ont été obtenus par Bistafa et Bradley en 2000³⁴ dans des salles vides.

Il en ressort que pour expertiser ou prédire le temps de réverbération d'une salle de classe, il n'est pas nécessaire d'employer des expressions analytiques plus complexes que les formules de Sabine ou d'Eyring. D'ailleurs, la formule de Sabine est la plus précise et apporte des valeurs calculées presque identiques aux valeurs mesurées.

Lukas et al³⁵, ont conduit une étude dans 14 établissements scolaires de Los Angeles, situés à différentes distances de voies autoroutières, qui montre que les différences de distances par rapport à l'autoroute ont pour conséquence des différences de niveau de bruit de fond allant jusqu'à 19 dB entre les salles de classe les plus bruyantes et les plus calmes. Les scores de lecture et de mathématiques des classes de niveau équivalent, et des données de comportement général dans les salles ont été évalués dans 74 salles de classe.

Les résultats de cette étude indiquent que pour un rang équivalent, les scores étaient fonction du niveau de bruit ambiant dans la classe.

Stansfeld et al³⁶ ont mené une série d'études dans les écoles primaires autour de l'aéroport de Heathrow à Londres, examinant les effets du bruit des avions sur la santé des enfants et sur leurs performances. Ils comparent la performance scolaire et la santé des enfants dans des écoles exposées à des niveaux élevés de bruit d'avions (parfois un survol toutes les 90 secondes) et celles d'enfants peu exposés au bruit d'avion. Les enfants exposés présentent une capacité plus faible en lecture et une irritabilité plus forte que les enfants se trouvant dans une école moins bruyante.

³³ Astolfi, A. Corrado, V et Griginis, A. *Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms*, Applied Acoustics n° 69, 2008, p 966–976

³⁴ Bistafa, SR et Bradley, VS. *Predicting speech metrics in a simulated classrooms with varied sound absorption*, 2000 .In. Astolfi, Corrado et Griginis. Loc. cit.

³⁵ Lukas J.S et al, 1981. In. AFSSE, *Impact sanitaire du bruit: Etats des lieux, indicateurs bruit/santé*, novembre 2004

³⁶ Stansfeld, S.A et al, *Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health*, Journal of Environmental Psychology n° 29, 2009, p 203–207p .

Conclusion

L'architecture joue un rôle prépondérant pour isoler les écoles des nuisances sonores et favoriser une bonne intelligibilité dans les espaces destinés à la parole. L'implantation des bâtiments, leur orientation et leur conception doivent respecter au plan réglementaire, des prescriptions (résultats de recherche et normes) qui devraient être connus des maîtres de l'ouvrage et des architectes et qui concernent les salles de classe, les salles de langue, de musique, les gymnases et les piscines, les locaux de restauration, les ateliers, les préaux et les couloirs...

Des solutions de type architectural ou acoustique permettent de doter les salles de classe d'une isolation performante au bruit provenant de l'extérieur ou des espaces adjacents. Compte tenu des effets du bruit sur les performances et comportements, des recherches ont été faites dans plusieurs pays et ont abouti à des recommandations pour améliorer le confort acoustique dans les établissements scolaires mais malheureusement, ça n'a pas été le cas en Algérie.

Conclusion générale

Le bruit est synonyme de nuisance. En milieu urbain, les bruits les plus dominants sont générés par les moyens de transport et les activités humaines. Ils engendrent une gêne considérable ressentie par les habitants des villes.

La perception subjective des bruits diffère d'un individu à l'autre. Cependant, Il existe une population très sensible aux méfaits des bruits, ce sont les personnes âgées et les enfants en phase d'apprentissage. En effet, il a été prouvé, principalement chez les plus jeunes, que le bruit peut compromettre l'exécution de tâches cognitives (mémorisation, concentration, lecture...).

Le confort acoustique dans le bâtiment se base sur des principes simples comme celui de masse ou de la double paroi. Pour isoler des bruits aériens, on agit au niveau de l'implantation des constructions, l'agencement des locaux, l'aménagement d'espaces tampons et d'obstacles entre la source de bruit et l'espace sensible. Afin d'éviter la propagation des vibrations et bruits de chocs, on désolidarise les différents éléments de la construction. On utilise des sols flottants, plafonds suspendus, joints de dilatation et plots antivibratoires.

Enfin pour éviter le phénomène de réverbération, on adapte la géométrie et la répartition des matériaux absorbants à la fonction de la salle.

La maîtrise du bruit dans l'environnement scolaire, de la maternelle à l'université, est un facteur déterminant dans la réussite scolaire. Il est peu pris en compte, alors que les conséquences du bruit sur le développement intellectuel des élèves et la fatigue des enseignants sont sérieuses.

La salle de classe est un élément structurant dans la conception des écoles. Elle est le lieu de l'apprentissage où l'enseignant (le locuteur principal) transmet son savoir en s'appuyant très largement sur la communication orale, et où les élèves (à la fois locuteurs et auditeurs) écoutent, participent au cours et bavardent entre eux. Ces derniers, ont besoin d'un environnement calme qui favorise la concentration et l'apprentissage.

Pour cela, il est nécessaire d'avoir un rapport signal sonore/bruit de fond supérieur ou égal à 15 dB (audition normale). C'est à dire le niveau du bruit de fond dans la salle ne doit pas dépasser 35 dB(A), avec une durée de réverbération maximale entre 0.4 et 0.8 secondes.

Afin d'évaluer le confort sonore de plusieurs conceptions de salles de cours et de comparer leur qualité acoustique, nous avons effectué un travail expérimental dans trois lycées situés dans différents environnements sonores de la ville de Constantine.

Les lycées Soumia et El Houria sont des constructions qui datent de l'époque coloniale. La première est massive, ses salles de cours sont spacieuses et réverbérantes, elles donnent sur des ruelles étroites commerçantes. La deuxième présente un zoning des différentes fonctions (salles de cours regroupées dans un même bloc) avec des salles de classe desservies par un long couloir fermé. Elles s'ouvrent par de larges baies vitrées sur la cour de récréation.

L'architecture du lycée Bouhali est contemporaine avec un plan de masse éclaté et d'importantes surfaces vitrées. Le lycée Bouhali est inséré dans un environnement sonore moins bruyant que celui des deux autres lycées. Ses salles de classes s'ouvrent d'un côté sur l'extérieur et de l'autre sur la cour et la cour de récréation.

Pour l'ensemble de ces lycées, des mesures du bruit de fond ont été effectuées à l'intérieur et à l'extérieur des salles de classe inoccupées ainsi que des mesures du bruit ambiant dans la salle occupée (lycée Bouhali). En complément, le calcul du temps de réverbération dans les salles permet de déterminer le confort acoustique. Pour l'appréciation de ces paramètres physiques, une enquête a été réalisée auprès des enseignants et élèves des différents lycées, qui ont reçu des questionnaires type pour l'évaluation de leur perception du bruit en classe.

La qualité sonore des différents espaces du lycée dépend de leur fonction, du nombre d'utilisateurs, du moment de la journée et de leur conception. La perception de ces espaces par les élèves et enseignants décrit une certaine hiérarchie sonore: la cour de récréation, les terrains de jeux, gymnase et cantines sont des espaces bruyants qu'il convient de séparer des salles de cours. Les couloirs qui sont contigus aux salles doivent être traités pour éviter la propagation des bruits intérieurs et la réverbération. Les liaisons entre ces deux espaces doivent être étudiées (porte et sas). Nous devons penser lors de la conception d'une école à un zoning sonore des espaces basé sur des relations spatiales étudiées (proximité ou éloignement, contiguïté ou isolement) afin d'assurer un confort acoustique optimal dans les espaces sensibles au bruit.

Les résultats des mesures révèlent que les salles de cours des lycées Soumia et Bouhali sont caractérisées par des bruits de fond supérieurs aux valeurs limites recommandées par l'OMS. Contrairement aux salles du lycée El Houria qui présentent des niveaux de bruit de fond en deçà de valeurs limites.

De ce fait, les salles des lycées Soumia et Bouhali sont les plus bruyantes. La situation s'aggrave avec l'ouverture des fenêtres pour l'aération. L'ensemble des interrogés des trois lycées optent pour la fermeture des ouvertures afin de diminuer les niveaux de bruit à l'intérieur des salles de cours, bien que cela ne soit pas très efficace. Pour pallier à cet inconvénient, les enseignants haussent la voix pour se faire entendre

L'évaluation subjective des élèves et enseignants, quant à la qualité sonore de leur salle de classe, confirment ces résultats. Selon les questionnés, les salles des lycées Soumia et Bouhali sont considérées bruyantes alors que celles du lycée El Houria le sont moins.

Cependant, le lycée Soumia de part sa conception offre un environnement intérieur moins bruyant que celui du lycée Bouhali. Le plan éclaté de ce dernier favorise la propagation des bruit à l'intérieur des salles.

D'une manière générale les salles du lycée El Houria sont calmes et propices à la communication orale. En l'absence des bruits intérieurs, elles présentent un niveau de bruit de fond en deçà des valeurs limites recommandées. Cela est dû à l'orientation des salles qui s'ouvrent sur la cour intérieure. Le couloir de desserte constitue un sas sonore qui les protège des bruits extérieurs (trafic routier dense). Puisque ces derniers sont prépondérants, la disposition de la salle de cours El Houria est plus efficace contre les bruits aériens extérieurs que celles des autres lycées.

De ce fait, on confirme la première hypothèse de ce travail concernant le rôle de la conception architecturale dans la diminution des niveaux de bruit perçu à l'intérieur des salles de classe et la création d'un environnement sonore propice. Les éléments qui ont favorisé cette diminution sont les espaces tampons, la compacité du plan et les matériaux de construction.

Les niveaux du bruit de fond dans les salles desservies par un couloir augmentent significativement quand les locaux adjacents sont occupés. Cela s'explique par la propagation des bruits émanant du couloir et des classes voisines, augmentant ainsi les niveaux de bruit de fond dans la salle testée.

Le bruit de fond dans la classe cumule les bruits générés par les sources extérieurs et les bruits provenant des espaces adjacents, ce qui confirme la deuxième hypothèse selon laquelle le confort acoustique est influencé en premier lieu par les bruits extérieurs (cas des lycées Bouhali et Soumia).

Les élèves et enseignants qui sont gênés par les bruits pendant les cours, mentionnent différentes sources de nuisances sonores extérieures qui dépendent de l'environnement immédiat de chaque lycée. La source principale reste la circulation routière.

Les bruits intérieurs représentent les plus grands pourcentages de gêne durant les cours aux lycées El Houria et Bouhali. Les bruits générés par les déplacements, les regroupements et bavardages sont perçus comme très gênants par l'ensemble des usagers car ils perturbent les activités scolaires, particulièrement les tâches qui requièrent le plus de concentration et d'attention.

D'une manière générale, la somme des bruits intérieurs et extérieurs affectent l'ensemble des activités en classe. La compréhension des textes, la mémorisation et la concentration sont les premières activités affectées régulièrement par le bruit pour une majorité des lycéens.

La gêne exprimée par les élèves et les enseignants est justifiée car pendant les cours, les niveaux sonores à l'intérieur des salles occupées augmentent considérablement. Cela est dû principalement aux bruits générés par les élèves dans la classe. A cela, s'ajoute le phénomène de réverbération, car toutes les salles testées présentent des durées de réverbération trop longues.

L'ensemble des questionnés désignent le nombre d'élèves et leur comportement, comme facteur pouvant améliorer l'acoustique en classe.

La perception subjective des lycéens et enseignants confirment les mesures du bruit dans les salles de classe. Ils sont très sensibles aux variations de la pression acoustique et très attentifs à leur environnement sonore.

Les résultats de l'évaluation du confort sonore ont révélé que les salles des lycées El Houria et Soumia offrent des avantages acoustiques intéressants (sas sonore, compacité et matériaux). La salle du lycée El Houria est la plus calme car elle est protégée des bruits de l'extérieur.

De ce fait, on devrait s'inspirer de l'héritage architectural qu'offrent les lycées séculaires de la ville de Constantine pour concevoir des salles de cours adaptées à la communication orale, où le confort acoustique optimal favorise l'échange, la concentration et l'instruction pour la réussite scolaire

Recommandations

- Le choix du site doit tenir compte de l'éloignement de l'école par rapport à la source de bruit. Cela permet une réduction de 3 à 6 dB(A) (sonore linéaire ou ponctuelle respectivement par doublement de distance). Pour cela, les documents d'urbanisme devraient constituer des outils de choix et de prévision.

Planter l'école à l'écart des artères à grand trafic. Le niveau de bruit au site choisi doit être inférieur à 45dB(A).

- Le choix de l'emplacement et de l'orientation du bâtiment scolaire doit tenir compte des contraintes acoustiques du site. Les locaux sensibles (salles de classe) doivent être orientés du côté calme, à l'opposé des sources de bruit (on tiendra cependant compte également de l'orientation des façades et de son interaction avec l'éclairage naturel et l'apport solaire).

- L'isolation acoustique peut être obtenue grâce à un plan de masse approprié (cas du lycée Soumia), des matériaux adaptés et une bonne disposition des salles de cours (El Houria), Toutefois, on peut avoir recours au double vitrage acoustique et renforcement de l'isolement des parois.

- La disposition architecturale interne du bâtiment doit respecter un zoning sonore avec une hiérarchisation des espaces du plus bruyant au plus calme. Séparer les salles de cours (espaces calmes) des espaces bruyants: cantine, gymnase et terrains de jeux, aussi bien horizontalement que verticalement.

- Eviter d'ouvrir les salles de cours (espace sensible) sur l'extérieur ou sur les terrains de jeux.

- Les dimensions et volume de la salle doivent être étudiés afin d'éviter un long temps de réverbération. D'une manière générale, il faut éviter les salles longues et étroites et les salles trop larges (privilégier les traitements acoustiques avec des matériaux absorbants, faux-plafond et revêtements muraux acoustiques)

- Créer des espaces tampons (sas acoustique) entre la salle de classe et la source de nuisance sonore

- Traiter les couloirs pour éviter la réverbération et la propagation des bruits.

- Equiper la salle avec des tables et chaises avec embout souple ou chaises fixes, pour éviter les bruits solidiens.

- Sensibiliser les élèves et personnel administratif car ils sont à la fois récepteurs et acteurs du bruit. Que chacun, à son niveau et par son comportement œuvre pour améliorer l'environnement sonore à l'école,

- Entretenir les équipements de l'école, les joints des portes et fenêtres.

Comme pistes de recherches futures, on propose d'étudier l'interaction entre le confort sonore et les autres paramètres de confort (lumière, ventilation). Tester la conception de typologie variée de dessertes du point de vue acoustique et lumineux, puisque la cloison séparant la classe du couloir comporte souvent des ouvertures pour l'éclairage.

Evaluer le confort sonore dans les écoles primaires étant donné que la sensibilité des enfants au bruit est plus grande.

Mesurer l'isolement des façades pour voir l'impact réel des différents matériaux de construction sur l'atténuation des bruits extérieurs et la perception des usagers.

Livres

1. ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), *Réussir un projet d'urbanisme durable: Méthode en 100 fiches pour une approche environnementale de l'urbanisme*, Le Moniteur, Paris, 2006, 353 p.
2. BALAY, Olivier, *l'Espace sonore de la Ville au 19^{ème} Siècle*, A la Croisée, Paris, 2003.
3. BEAUMIER, Jean-Lois. *L'isolation phonique écologique: Matériaux et équipements, mise en œuvre et étude des cas, en neuf et en rénovation*, Terre vivante, Mens, France, 2011, 205 p.
4. CHAGUE, Michel. *L'acoustique de l'habitat: Principes fondamentaux, application de la réglementation française et européenne*, Editions du Moniteur, Paris, 2001, 235 p.
5. DE HERDE, André et LIEBARD, Alain. *Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bioclimatiques*, Editions Le Moniteur, Paris, 2005.
6. DEOUX, Suzanne et Pierre. *Le guide de l'habitat Sain: Habitat qualité santé pour bâtir une santé durable*, 2^{ème} édition, MEDIECO Editions, Andorre, 2002-2004, 537 p.
7. DESMONS, Jean. *Acoustique pratique: Chauffage, climatisation, froid, sanitaire*. Editions Parisiennes, Paris, 2003, 151 p.
8. DUTHU, Henri, MONTHARRY, Daniel et PLATZER, Michel. *La Technique du Bâtiment tous corps d'état*, 3^{ème} Edition, Editions Le Moniteur, Paris, 2004.
9. FORSYTH, Michael. *Architecture et Musique: L'architecte, le musicien et l'auditeur du 17^{ème} siècle à nos jours*, Pierre Mardaga éditeur, Bruxelles, 1985, 360 p.
10. GALLAUZIAUX, Thierry et FEDULLO, David. *Le grand livre de l'isolation*, Editions Eyrolles, Paris, 2009-2010
11. HAMAYON, Loïc et MICHEL, Claude. *Guide d'acoustique pour la conception des bâtiments d'habitation*, Editions Le Moniteur, Paris, 1982.
12. HAMAYON, Loïc. *Comprendre simplement l'acoustique des bâtiments*, Editions Le Moniteur, Paris, 2008, 237 p.
13. HAMAYON, Loïc. *Réussir l'Acoustique du Bâtiment*, 2^{ème} édition, Editions Le Moniteur, Paris, 2006, 234 p.
14. HAMAYON, Loïc et MICHEL, Claude. *Guide d'acoustique pour la conception des bâtiments d'habitation*, Editions Le Moniteur, Paris, 1982.
15. JOSSE, Robert. *Notions d'Acoustique: A l'usage des architectes, ingénieurs et urbanistes*, éditions Eyrolles, Paris, 1977, 292 p.
16. LIENARD, P, *Décibels et indices de bruit: Divers méthodes d'évaluation des niveaux sonores, Gêne et nuisances dues au bruit à partir de mesures physique*, 2^{ème} édition, Masson, Paris, 1978, 53 p.

17. NEUFERT, E. *Les éléments des projets de construction*, 9ème édition, Editions Le Moniteur, Paris, 2006.
18. NGO, Christian et REGENT, Alain. *Déchets et pollution: Impact sur l'environnement et la santé*, Dunod, Paris, 2004, 134 p.
19. PUJOLLE, Jean. *La pratique de l'isolation acoustique des bâtiments*, Editions Le Moniteur, Paris, 1978.
20. ROUGERON, Claude. *L'isolation acoustique et thermique dans le bâtiment*, Editions Eyrolles, Paris, 1979, 308 p.
21. SCHRIVER-MAZZUOLI, Louise. *Nuisances sonores: Prévention, protection, réglementation*, Dunod, Paris, 2007. 190 p.
22. SIMONIN-ADAM, Christine. *Acoustique et réhabilitation: Améliorer le confort sonore dans l'habitat existant*, Groupe Eyrolles, Paris, 2003, 381 p.
23. VAN TRAN, Bui. *Acoustique architecturale*, Office des Publications universitaires, Alger, 1996, 169 p.
24. WATSON, Donald et CAMOUS, Roger. *L'habitat bioclimatique: De la conception à la construction*, L'Etincelle, 1986.

Mémoires et Thèses

1. BENRACHI Bouba, *Evaluation de la relation exigences techniques et coûts dans la conception du logement collectif- Cas de Constantine*, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2002.
2. BOUGRIOU Badreddine, *Bilan et réalité de l'architecture scolaire*, Thèse de Magister, Université de Constantine, 2002.
3. DEBACHE-BENZAGOUTA Samira, *La conception sonore des bâtiments d'habitation- Cas du logement collectif*, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2004.
4. REMY Nicolas, *Maitrise et prédictibilité de la qualité sonore de projet architectural-applications aux espaces publics en gare*, Thèse de doctorat de l'école polytechnique de l'Université de Nantes, Cresson, 2001.

Articles publiés

1. ASTOLFI A, CORRADO V, GRIGINIS A. *Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms*, Applied Acoustics n°69, 2008, 968-976 p.
2. BALAY Olivier, *L'espace sonore de la ville au 19^{ème} siècle*, presses universitaires de France n° 56, 2007. Fichier PDF (consulté le 13/01/09), [En ligne], www.cairn.info.
3. BISTAFA, S.R. and BRADLEY, J.S. *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*. Journal of the Acoustical Society of America n°107, 2000, p. 861-875.

4. BRADLEY J.S, *La conception acoustique de salles destinées à la communication orale*, Solution constructive n°51, 2009, (consulté le 19/04/2011), [En ligne], [www.http://irc.nrc-cnrc.gc.ca](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca).
5. BRADLEY. J.S, REICH. R.D. et NORCROSS. S.G, *On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility*. Journal of the Acoustical Society of America vol.106, 1999. p.1820-1829.
6. CHERUETTE Patrick, *Du son aux bruits: les clés de la perception auditive*, Les cahiers techniques du bâtiment N° 185, décembre 1997. p 56-59.
7. CHIANG Che-Ming, LAI Chi-Ming. *Acoustical environment evaluation of joint classrooms for elementary schools in Taiwan*. Building and Environment 43, 2008, p.1619-1632.
8. DEGIOANNI, J.F, *L'acoustique: des principes simples pour une sciences complexe*, Les cahiers techniques du bâtiment N° 185, décembre 1997. p.60-61
9. DEGIOANNI, J.F, *Dossier Locaux scolaires*, Les cahiers techniques du bâtiment N° 168, janvier/février 1996. p. 65-75
10. DELETRE Jean-Jacques, *Le confort sonore et la métrologie acoustique*, Arch et compost/Arch behav, vol.7, 1991, p.95-100.
11. EVANS. G.W, HYGGE. S et BULLINGER, M. *Chronic noise and psychological stress*, Psychological Science n°6, 1995, p.333-338.
12. FRANCHINI. A et al, *Pollution sonores et prestations acoustiques dans les édifices scolaires*,1995, (page consulté le 12/05/2011), [En ligne], <http://www.zebalice.it/rspiazzi/web>.
13. JIANXIN Peng, *Chinese speech intelligibility at different speech sound pressure levels and signal- to- noise ratios in simulated classrooms*, Applied Acoustics n°71, 2010, 386-390 p.
14. KNECHT, H.A et al. *Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: predictions and measurements*. American Journal of Audiology vol 11, 2002, p 65-71. [En ligne], <http://aja.asha.org/cgi/content/abstract/>
15. LAUKHANEN Ann-Maria et al. *Acoustic measures and self reports of vocal fatigue by female teachers*, Journal of voice, Vol 22, N°3, 2008.
16. MUMOVIC D et al, *Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England*, Building and Environment n°44, 2009, p 1466-1477.
17. QUILGHINI Janne, *Exigences pédagogiques et réponses architecturales*, Technique et Architecture n°344, novembre 1982
18. ROZEC Valérie et RITTER Philippe, *Les avancées et les limites de la législation sur le bruit face au vécu du citoyen* (la ville, le bruit et le son), Géocarrefour, vol.78 n°2, (page consultée le 17/11/11). [En ligne], <http://geocarrefour.revues.org>.
19. SAN SOUCI Soach, *Acoustique des salles de classe accueillant des élèves malentendants et normotendants*, Atelier CAPS, ORSAY, 2003, Fichier PDF, (consulté le 19/04/2011). [En ligne], <http://www.dotacoustics.com>.

20. SEEP. B et al, *Classroom Acoustics: A resource for creating learning environments with desirable listening conditions*, The Acoustical Society of America, 2000, p11747-4502, [En ligne], http://www.canadiancarpet.org/carpet_in_schools/ClassroomAcoustics.pdf
21. SHIELD. B et DOCKREL. J, *The effect of noise on children at school: A review*, Journal Building Acoustics n°10, 2003, p.97-106.
22. STANSFELD S.A et Al, *Aircraft and road trafic noise exposure and children's mental health*. Journal of environmental psychology n°29, 2009, p.203-207.
23. SUNER Bruno, *Les résonateurs, une redécouverte prometteuse*, Les cahier techniques du bâtiment n° 133, février/mars 1992.
24. YANG W et KANG J. *Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces*, Applied Acoustics n° 66, 2005, 211-229 p.
25. ZANNIN PHT, KRUGER E L, *Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms*, Building and Environment vol 39, 2004, p 1055-1063.
26. ZANNIN PHT, MARCON CR, *Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms*, Applied Ergonomics n°38, 2007, p 675-680.
27. ZANNIN PHT, ZWIRTES DPZ, *Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools*, Applied Acoustics n°70, 2009, p 675-680.

Rapports d'études et comptes rendus de colloques

1. Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale (AFSSE), *Impacts sanitaires du bruit: Etats des lieux, indicateurs bruit/santé*, novembre 2004, (consulté le 12/11/08), [En ligne] <http://ufcna.com/Bruit-impact-sante-AFSSE.pdf>.
2. Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail AFSSET, *Effets biologiques et sanitaires du bruit, comment lutter contre le bruit?*, octobre 2007, Fichier PDF (consulté le 19/01/2009), [En ligne] www.afsset.fr.
3. Bruitparif, RIF, 01dB et CIDB, *Campagne de mesure et de sensibilisation au bruit au sein des lycées d'Ile de France: Rapport de synthèse*, novembre 2009. Fichier PDF, (consulté le 06.03.10), [En ligne], www.ecoutetonlycée.com.
4. Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), *Recherche appliquée et construction pour faire face aux enjeux de société et aux évolutions techniques majeures*, juillet 2005, Fichier PDF, (consulté le 10/01/2009), [En ligne], www.cstb.fr.
5. DIAZ Frédéric, *Acoustique architecturale*, Recueil de notions de base (Fichier PDF) [En ligne] www.artic.ac-besançon.fr (consulté le 13/03/2010)
6. FILIPPINI Mickael, *Etude acoustique de l'auditorium de Pigna*, Rapport de stage en maîtrise de physique et applications- Université de Corse Pascal Paoli (Faculté des sciences et techniques) 2002/2003, p. 44. Fichier PDF (consulté le 17/03/2010) [En ligne], <http://www.centreculturelvoce.org>.

7. LAVANDIER Catherine et autres, *Qualité des ambiances sonores liées aux usages des établissements d'enseignement*, Colloque européen « Construire avec les sons », 17/18 mars 2005, Fichier PDF, (consulté le 15/04/09) [En ligne], <http://rp.urbanisme.developpement-durable.gouv.fr>.
8. Nelson, P.B; Soli, S.D; Seltz, A. *Acoustical Barriers to Learning*, Technical Committee on Speech Communication of the Acoustical Society of America, 2002. (page consultée le 12.05.11) [En ligne], <http://www.centerforgreenschools.org/docs/acoustical-barriers-to-learning.pdf>.
9. SEMIDOR Catherine, *La qualité sonore des espaces recevant les tout-petits*, Colloque européen « Construire avec les sons », 17/18 mars 2005, Fichier PDF, (consulté le 15/04/09) [En ligne], http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr/puca/agenda/construire_avec_les_sons.pdf.
10. Shield. B et Dockrell. J, *The effects of classroom and environmental noise on children's academic performance*. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem , 2008, (page consultée le 12.05.11). [En ligne], http://www.icben.org/2008/PDFs/Shield_Dockrell.pdf

Guides et brochures

1. Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat ANAH, *Bruit et confort acoustique (Fiche technique)*, Fichier PDF (consulté le 11/10/2008), [En ligne], www.anah.fr
2. CREARGOS, *Confort acoustique: quelles solutions?*, 2009, (consulté le 11/12/2009), [En ligne], www.creargos.com
3. Direction de l'Education de la Wilaya de Constantine, Service de programmation et suivi, Bureau des statistiques et carte scolaire. *Guide des établissements d'enseignements*, 2009/9010.
4. Eurocoustic. *L'acoustique dans les locaux de cultures et loisirs*, Saint-Gobain Eurocoustic, 2008, 19 p.
5. Eurocoustic. *L'acoustique dans les bureaux*, Saint-Gobain Eurocoustic, 2008, 07 p.
6. Eurocoustic. *Plafonds: Le confort acoustique, le choix esthétique*, Saint-Gobain Eurocoustic, 2008, 114 p.
7. Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, *Matériaux d'isolation acoustique, choisir des matériaux sains avec un écobilan favorable*, Octobre 2008, Fichier PDF, (consulté le 26/10/2009) [En ligne], <http://app.bruxellesenvironnement.be>.
8. LAFARGE plâtre commercialisation, Memento 2010, Fichier Pdf (consulté le 01/05/11) [En ligne], <http://www.lafarge-france.fr/memento-2010-12-Reglementation>
9. Ministère de la Jeunesse, des Sports et des loisirs. *Les piscines: Conception, réalisation, exploitation*, Paris, 1978. 217 p.

Lois et documents techniques

1. Arrêté du 25 février 1964 relatif à la lutte contre le bruit excessif.
2. Arrêté du 4 avril 1972 relatif à la mesure du bruit produit par les véhicules automobiles et aux conditions imposées aux dispositifs dits "silencieux".
3. Arrêté du 17 octobre 2004 portant approbation du cahier des charges fixant les normes de surface et de confort applicables aux logements destinés à la location-vente. JORA N°13 du 16/02/2005
4. Circulaire du 25 Avril 2003 relative à l'application de la réglementation acoustique des bâtiments autres que d'habitation ; JORF n°123 du 28 Mars 2003 page 9107, texte n°14. (consulté le 17/12/2009), [En ligne], Legifrance.gouv.fr.
5. CNERIB, Document Technique réglementaire DTR C3.1.1, *Isolation acoustique des parois aux bruits aériens*: Règles de calcul, Editions CNERIB, Alger, 2004.
6. Décret N° 95-408 du 18 Avril 1995 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage. Journal Officiel de la République Algérienne du 19 Avril 1995 (Fichier PDF)
7. Décret N° 2006-1099 du 31 Août 2006 relatif à la lutte contre le bruit de voisinage et modifiant le code de la santé publique (dispositions réglementaires), JORA du 1^{er} septembre 2006 (Fichier PDF)
8. Loi N° 92-1444 du 31/12/1992 relative à la lutte contre le bruit. Journal Officiel de la République Algérienne N°01 du 01/01/93 (Fichier PDF).
9. Société Suisse d'Acoustique (SGA), Recommandation relative à l'acoustique des salles de classe et autres locaux destinés à la parole, 2004, Fichier PDF (consulté le 20/04/2011), [En ligne], www.sga-ssa.ch.

Sites internet

1. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME. <http://www.ademe.fr/>
2. Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (ANAH): <http://www.anah.fr>
3. Centre d'information et de documentation sur le bruit CIDB: <http://www.bruit.fr>
4. Ministère de l'écologie et du développement durable: <http://www.ecologie.gouv.fr>
5. Organisation mondiale de la santé: <http://www.who.int/fr/indeex.html>
6. [En ligne] <http://www.acouphile.fr>
7. [En ligne] <http://www.acousticbulletin.com>
8. [En ligne] <http://www.audition-info.org>
9. [En ligne] <http://www.dBstop.com>
10. [En ligne] <http://www.cresson.archi.fr>

Annexe 1. Caractéristiques de l'onde sonore

L'onde sonore de fréquence f et de période T se propage jusqu'à la membrane du tympan de l'oreille avec une célérité C qui dépend de la nature du milieu. La propagation peut être représentée par une courbe sinusoïdale (fig I-1). Il y a ainsi une double périodicité, une périodicité temporelle et une périodicité spatiale.

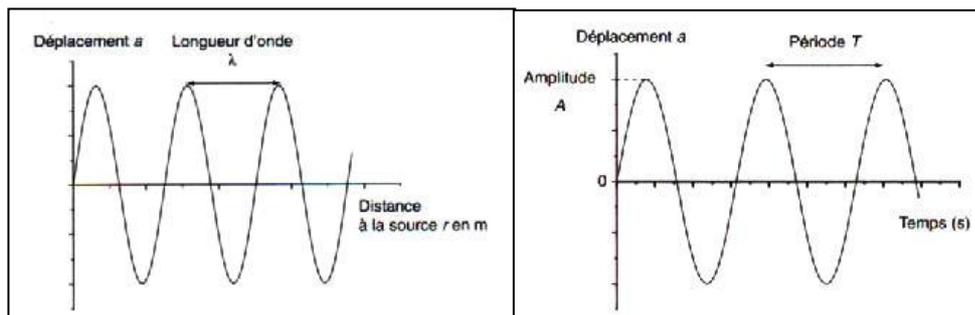


Figure I-1. Double périodicité caractérisant l'onde sonore

(Source: Schriver-Mazzuoli, 2007)

L'onde sonore est ainsi caractérisée par :

- son Amplitude A qui est la valeur maximale de l'élongation dans un sens ou un autre ;
- sa vitesse particulière $v=da/dt$, da étant l'élongation pendant l'intervalle de temps dt ;
- sa période T qui est le temps en seconde écoulé entre deux passages de la molécule à la même position dans le même sens ;
- sa fréquence f qui est le nombre d'oscillations par seconde des molécules d'air autour de leur position d'équilibre ou encore le nombre de périodes par seconde exprimée en hertz :

$$f = \frac{1}{T}$$

- sa pulsation ω en radians par seconde, définie comme le produit de la fréquence par 2π

1. Longueur d'onde

La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde acoustique pendant une période. Elle est égale au produit de la célérité du son par la période T . $\lambda = CT$

La fréquence f étant l'inverse de la période, on écrit : $\lambda = C/f$

C : la célérité du son, T : la période, f : la fréquence

A température ambiante, la célérité du son est d'environ 340m/s, ainsi la fréquence des sons audibles (comme nous le verrons plus loin) s'étendant en moyenne de 20 Hz à 20 kHz, la longueur d'onde des sons audibles varie donc de $\lambda=340/20=17$ m à $\lambda=340/20\ 000=17\times 10^{-3}$ m=17mm. Les sons aigus sont ainsi caractérisés par une fréquence élevée et une faible longueur d'onde et inversement pour les sons graves.

2. Célérité

La vitesse de propagation du son ou célérité est indépendante de la fréquence; elle varie avec le milieu de propagation et pour un même milieu elle varie légèrement avec la température et la pression. La formule empirique suivante nous permet de calculer la célérité du son C en fonction de la température de l'air T en Kelvins: $C = 20(T_K)^{1/2}$

Dans l'air, la vitesse du son est de l'ordre de 340 m/s à température ambiante. Elle est inférieure à la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s) ; ceci explique que lors d'un orage, on perçoit la lumière avant le bruit du tonnerre.

3. Fréquence

La fréquence f d'un son est le nombre de variations de pression autour de la pression atmosphérique par unité de temps. Elle est exprimée en hertz, ex : 400 Hz correspondent à 400 variations de la pression par seconde.

La fréquence est l'expression du caractère grave ou aigu d'un son, les sons graves sont dits de basse fréquence ; les aigus, de haute fréquence.

Lorsque deux sons ont pour fréquences respectivement f_1 et f_2 , on dit qu'ils sont séparés par l'intervalle f_2/f_1 et qu'ils définissent une bande de fréquences de largeur $\Delta f = f_2 - f_1$, f_2 étant la plus grande des deux fréquences.

L'**octave** et le **tiers d'octave**, qui sont très utilisés en acoustique architecturale, sont des intervalles valant respectivement 2 et $\sqrt[3]{2} = 1,26$. Par souci de normalisation, on donne un rôle préférentiel aux octaves dont les fréquences centrales sont : 31,5 – 63 – 125 – 250 – 500 – 1000 – 2000 – 4000 – 8000 – 16000 Hz.

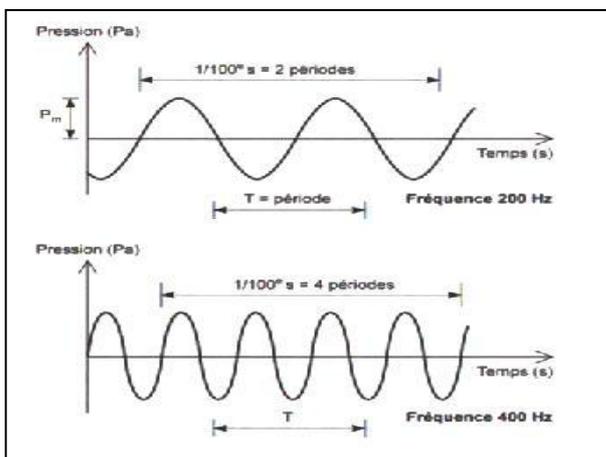


Figure I- 2. Fréquence du Son
(Source : Hamayon, 2008)

4. Niveaux d'intensité, de pression, de puissance:

Intensité, pression et puissance acoustique

Niveau de puissance acoustique L_w	Niveau d'intensité acoustique L_I	Niveau de pression acoustique L_p
$L_w = 10 \log W/w_0$ (dB)	$L_I = 10 \log I/I_0$ (dB)	$L_p = 20 \log p/p_0$ (dB)
W : puissance acoustique de la source (W) ; W ₀ : puissance acoustique de références = 10^{-12} W.	I : intensité acoustique (W/m^2) ; I ₀ : intensité acoustique de références* = 10^{-12} W/m^2 .	p : pression acoustique efficace (Pa) ; p ₀ : pression acoustique de références** = 2×10^{-5} Pa.

*correspond à l'intensité minimale perceptible par l'oreille en l'absence de bruit de fond à la fréquence de 1000 Hz.

**correspond à la pression minimale perceptible par l'oreille en l'absence de bruit de fond à la fréquence de 1000 Hz.

Annexe2. Calcul de l'Indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi discontinue

Pour calculer l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi discontinue, composée de plusieurs éléments (mur, porte, fenêtre) on utilise la formule suivante :

$$R_{résultant} = 10 \log \frac{S_1 + S_2}{S_1 \cdot 10^{-0,1R_1} + S_2 \cdot 10^{-0,1R_2}}$$

Où :

$R_{résultant}$: indice d'affaiblissement acoustique de la paroi discontinue (dB) ;

S_1 et S_2 : surfaces des composants de la paroi discontinue (m²);

R_1 et R_2 : indices d'affaiblissement acoustique des composants (dB)

L'indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi discontinue peut être, aussi, calculer à l'aide de l'abaque suivant. Il donne la différence ΔR (dB) qui doit être soustraite de l'indice d'affaiblissement acoustique le plus élevé pour obtenir l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi discontinue, en fonction du rapport des surfaces des différents éléments et de la différence entre leurs indices d'affaiblissement acoustique.

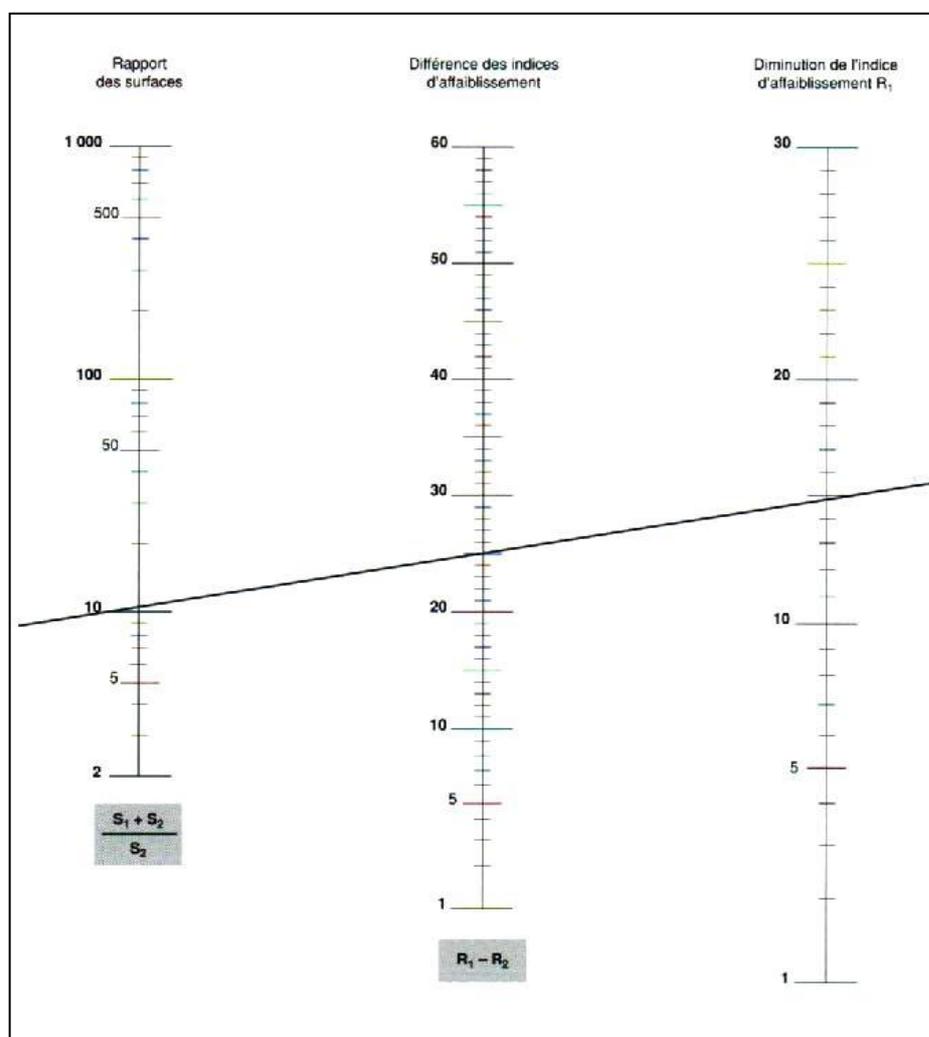
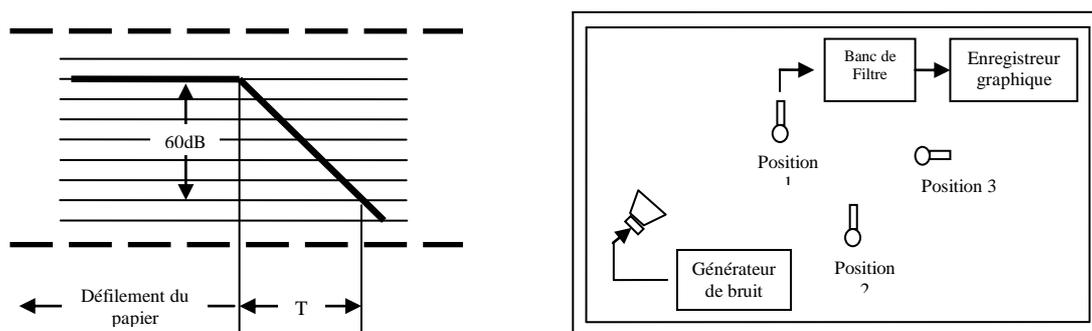


Diagramme permettant l'évaluation de l'indice d'affaiblissement acoustique d'un ensemble de deux éléments différents (Source :Hamayon, 2006)

Annexe 3. Méthodes de mesure des paramètres de performances acoustique du bâtiment

1. Mesure du temps de réverbération

Le protocole de la mesure du temps de réverbération dans un local, consiste à émettre un bruit rose, qui est interrompu après un certain temps. On mesure le niveau sonore à l'aide d'un sonomètre muni d'une sortie permettant l'enregistrement sur une table graphique ou un oscilloscope, on y observe ainsi la décroissance du niveau sonore en fonction du temps, après extinction de la source. La vitesse de défilement du papier étant connue, l'évaluation de la durée du phénomène est obtenue par une simple mesure de distance sur le graphe.



Principe de mesure du temps de réverbération d'un local (Source : Michel Chagué, 2001)

La vitesse à laquelle le son décroît est directement liée au nombre de réflexions dans le local et par conséquent à la capacité d'absorption sur les obstacles sur lesquels les réflexions se produisent. Compte tenu que le coefficient d'absorption des matériaux varie avec la fréquence, la mesure du temps de réverbération est faite sur chaque bande d'octave ou de tiers d'octave.

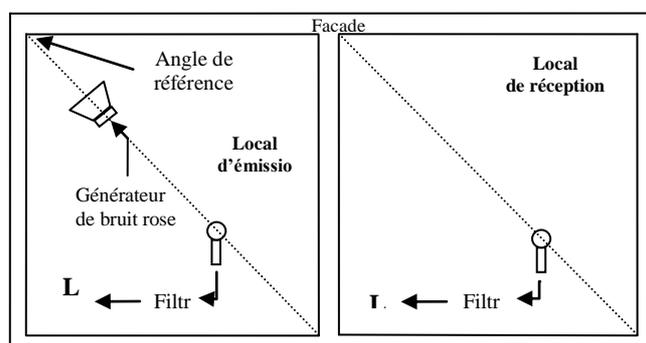
En pratique, il n'est presque jamais possible d'observer une décroissance de 60 dB, en raison de la présence du bruit de fond. Par conséquent, on se contente d'observer une partie de la décroissance et de la prolonger par extrapolation. Généralement, on évalue la chute de 15 dB calculée entre -5 et -20 dB.

2. Méthode de mesure de l'isolement aux bruits aériens

2.1. Mesure de l'isolement aux bruits aériens intérieurs

La mesure de l'isolement aux bruits aériens entre locaux consiste à générer un bruit rose dans un local et à analyser par bande d'octave (ou de tiers d'octave) le niveau sonore transmis dans le local adjacent. La source doit avoir une puissance suffisante pour minimiser le bruit de fond.

Le microphone est placé sur une diagonale du local aux deux tiers de sa longueur à partir de l'angle de référence. La hauteur par rapport au sol est fixée à 1,5 m. La source de bruit est placée sur le sol du local d'émission en un point de la diagonale distant de 1 m de l'angle de référence



Principe de mesure de l'isolement acoustique aux bruits aériens entre locaux. (Source : Michel Chagué, 2001)

On suit le même principe pour la mesure de l'isolement au bruit aérien vertical entre locaux (superposés)

Dans le cas de la mesure d'isolement au bruit aérien entre une circulation commune est un local, l'angle de référence du local de réception est le proche de la porte. La source de bruit est installée dans la circulation commune à une distance de 2 à 5 m de la porte, le microphone est placé à 1 m de celle-ci.

2.2. Mesure de l'isolement aux bruits aériens extérieurs

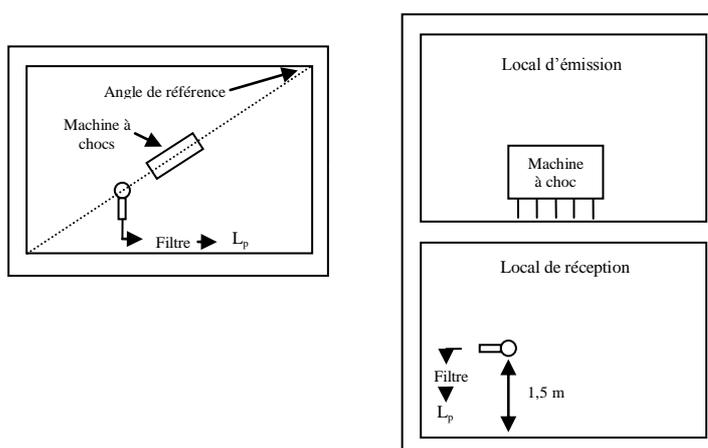
Pour la mesure de l'isolement vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur, l'angle de référence du local de réception est situé à droite en regardant la façade lorsque celle-ci est unique et dans l'angle formé par deux façades dans les autres cas. Le microphone est placé aux deux tiers de la longueur de la diagonale à partir de l'angle de référence.

Pour le relevé du niveau de pression régnant à l'extérieur, le microphone est placé à 2 m des parties les plus avancées de la façade ou toiture. Lorsqu'une source artificielle de bruit est nécessaire (bruit route), son emplacement doit être fixé à au moins 7 m du centre de la façade du local testé.

3. Mesure des bruits d'impact

Pour tester la performance acoustique aux bruits de chocs des planchers et revêtements, on effectue des mesures *in situ* du niveau de pression acoustique du bruit de choc transmis. Pour ce faire, on utilise une machine à choc qui produit un bruit d'impact normalisée. La machine est équipée de 5 marteaux de 500g disposés en ligne, mis en mouvement par un moteur électrique. Les chocs appliqués au plancher sont provoqués par la chute libre des marteaux d'une hauteur de 4 cm, la cadence étant fixée à 10 coups par seconde.

La machine à choc est installée au centre du local d'émission sur le plancher. L'axe d'alignement des marteaux doit être orienté à 45° par rapport aux poutres du plancher ou parallèlement à une diagonale du local. Le microphone est placé aux deux tiers de la longueur de la diagonale, par rapport à l'angle de référence qui est situé à droite en regardant la façade unique ou à l'angle formé par deux façades. Les niveaux de pression acoustique dans le local de réception sont relevés par bande d'octave ou de tiers d'octave. Il faut vérifier que le niveau sonore soit supérieur d'au moins 10 dB au bruit de fond.



Disposition du matériel pour le mesurage du niveau de bruit de choc.

(Source : Michel Chagué, 2001)

Annexe 4. Système et processus auditifs

- Oreille externe :

L'oreille externe comprend :

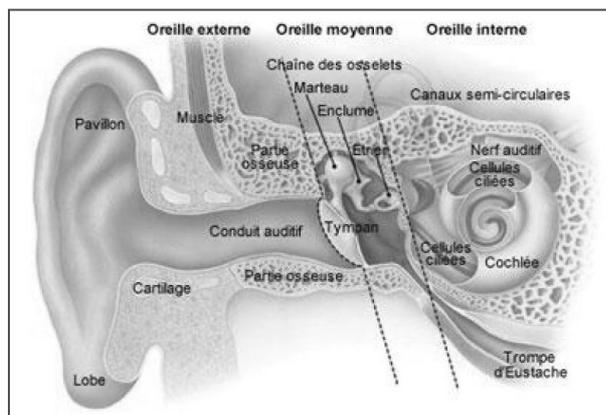
Le **pavillon** : est constitué de fibrocartilages, capte les vibrations acoustiques et les dirige vers le conduit auditif ;

Le **conduit auditif externe** joue le rôle d'amplificateur. Par un phénomène de résonance, les fréquences comprises entre 2000 et 5000 Hz se trouvent légèrement renforcées. De plus, l'orientation du conduit par rapport aux vibrations sonores permet de préciser l'emplacement des sources dans l'espace grâce à la différence d'énergie arrivant aux deux oreilles d'une part, au décalage temporel que met le son pour leur parvenir d'autre part.

Cela explique pourquoi il est plus difficile de localiser des sons de fréquence basse que des sons de fréquences élevées, l'écart de temps étant moins significatif.

Le **tympan**, est une mince membrane fibreuse (1/10 de mm), de forme circulaire d'un diamètre d'une dizaine de millimètres. Il obture le conduit auditif externe et est solidaire au marteau, premier osselet de la chaîne tympan-ossiculaire.

Le tympan capte les variations de la pression sonore. Les vibrations du tympan sont synchrones à celles du son et elles ont la même amplitude pour tous les sons d'égale intensité.



- Oreille moyenne : elle est composée de cavités creusées dans le rocher du temporal, se sont : la trompe d'Eustache, la caisse du tympan et les cavités mastoïdiennes.

La **trompe d'Eustache**, est un conduit long de 4cm, qui fait communiquer la caisse du tympan avec le pharynx permettant ainsi l'équilibrage des pressions de part et d'autre de tympan.

La **caisse du tympan** qui fait la liaison entre le tympan et la fenêtre ovale, laquelle s'ouvre sur l'oreille interne ; la fenêtre ovale ayant une superficie 20 fois inférieure à celle du tympan (respectivement 3 mm² et 60 mm²), il se produit une importante amplification de vibrations acoustiques.

La caisse du tympan comprend la **chaîne des osselets** (marteau, enclume et étrier) qui transmet les vibrations acoustiques du tympan à la fenêtre ovale. Elle est maintenue par des ligaments suspenseurs et par des muscles qui se contractent sous l'influence de bruits importants. En effet, lorsque le bruit est supérieur à 85 dB et dure plus de 1s, les muscles des osselets se contractent et diminuent les vibrations, c'est la *réflexe stapédien*. Le réflexe stapédien est un réflexe naturel de l'ouïe, il permet de protéger partiellement l'oreille de l'impact des bruits intenses par la contraction des muscles sustentateurs de la chaîne des osselets, ainsi l'étrier se trouve séparé de son point de contact avec l'oreille interne. On peut comparer le réflexe stapédien au réflexe de contraction de la pupille de l'œil quand elle subit une très forte luminosité.

- Oreille interne : appelée également *labyrinthe*, du fait de sa complexité structurale. Elle comprend :

L'**organe vestibulaire**, qui préside au sens de l'équilibre ;

La **cochlée**, ou « limaçon », est l'organe proprement dit de l'audition. Formée d'un sac membraneux de très petite taille flottant dans l'oreille interne, elle englobe un grand nombre de cellules en forme de cils d'où partent les fibres nerveuses qui se réunissent pour constituer le nerf cochléaire ou nerf auditif. Ce dernier transmet les informations au cerveau qui interprète le message sonore.

Annexe 5. Effets du bruit sur la santé

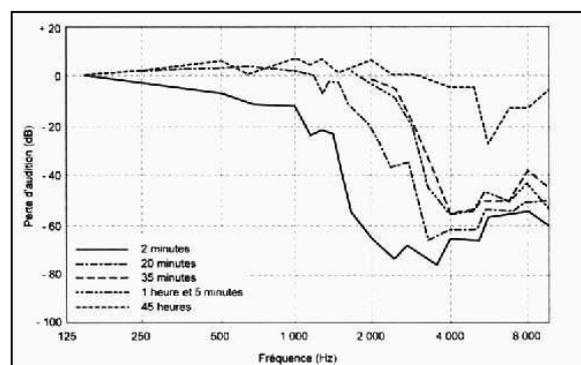
1-Effets traumatiques sur l'audition

A partir de niveaux sonores supérieurs à 120 dB l'oreille moyenne est lésée entraînant une rupture du tympan et la luxation des osselets. Ces lésions sont plus ou moins réversibles selon la durée et la fréquence du son : les bandes de basse fréquence (75 à 150 Hz) sont moins nocives que les bandes de haute fréquence (600 à 1200 Hz). Un bruit bref et très intense peut provoquer la rupture du tympan parfois suivie après cicatrisation d'une baisse de l'acuité auditive. Le seuil critique d'action traumatique d'une ambiance bruyante se situe entre 80 et 90 dB.

Le danger représenté par le bruit pour l'audition réside dans l'accoutumance aux bruits élevés. Selon le caractère permanent ou non de la lésion causée par le bruit sur l'audition. On peut distinguer :

Fatigue auditive :

Elle se définit comme une diminution passagère et réversible de l'audition consécutive à une stimulation sonore de 60dB ou plus dont la durée varie en fonction de l'intensité du stimulus, de la durée d'exposition et de la fatigue de l'individu



Fatigue auditive et récupération

Source : Hamayon, 2008

La surdité :

Le déficit léger, se situant dans la zone des sons aigus entre 3000 et 6000 Hz. Le déficit moyen (élargissement aux zones aigues et graves de la zone de conversation). Au stade grave, le déficit est de 80 dB pour les sons aigus et de plus de 35 dB pour la zone de conversation voire surdité complétée pour un déficit global de 82 dB.

Les acouphènes :

Les acouphènes correspondent à la perception anormale de sifflements, de bourdonnements, de tintements ressentis dans la tête ou l'oreille, en l'absence de source sonore extérieure. Ils touchent, généralement les personnes âgées de plus de 60 ans et les personnes exposés à des bruits intenses. Ils se situent dans les aigus avec une intensité variable souvent inférieure à 12 dB.

L'hyperacousie :

L'hyperacousie est la diminution de la tolérance de l'oreille aux bruits quotidiens qui deviennent insupportables et douloureux. Elle est due à un dysfonctionnement du mécanisme cérébral des sons. Dans certaines hyperacousies sévères, une intensité inférieure à 40 dB provoque la sensation de douleur.

La presbyacousie :

La presbyacousie est l'apparition chez des sujets âgés d'une surdité de perception souvent bilatérale et symétrique due au vieillissement des cellules sensorielles de l'oreille interne. La capacité de l'individu à entendre des sons élevés et à comprendre les mots dans une conversation normale diminue. Une baisse de l'audition de 1 dB par an est généralement observé à partir de 60 ans, le mécanisme est irréversible et peut être aggravée par les bruits intenses. La presbyacousie peut être enrayerée par le port de prothèses auditives.

2- Les effets non traumatiques ou extra-auditifs

Effets biologiques et physiologiques

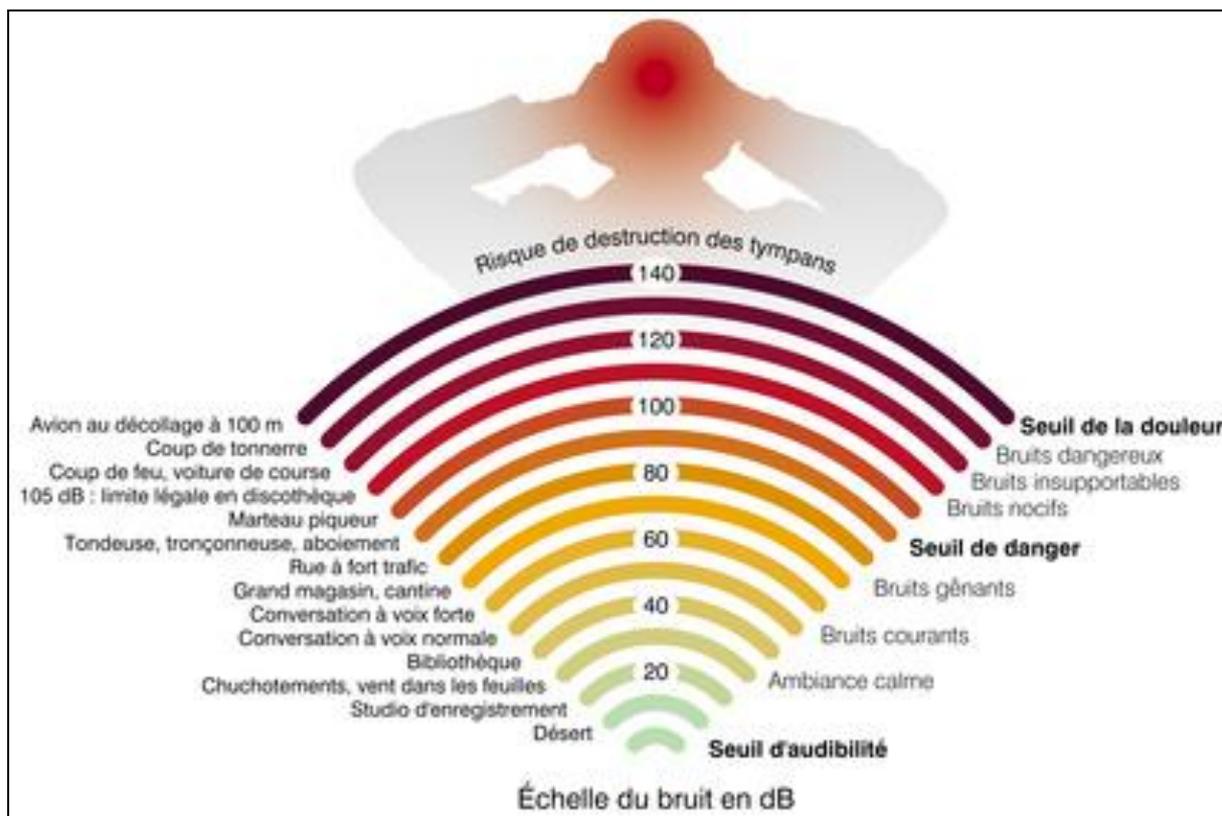
Des études récentes ont démontré que le bruit pouvait être à l'origine de troubles biologiques et physiologiques ou aggraver l'état pathologique préexistant de l'individu, tels que :

- Des troubles d'équilibres provoqués par des niveaux sonores de 110 à 130 dB ;
- des troubles cardio-vasculaires (accélération du rythme cardiaque et de la vasoconstriction, palpitations, modification de la tension artérielle...) ;
- d'effets sur les systèmes endocrinien et immunitaire due à des modifications de la sécrétion d'hormones (adrénaline, cortisol) ;
- des douleurs gastriques ;
- des troubles du sommeil, difficultés à s'endormir, réveil précoce, qualité du sommeil altérée ce qui peut provoquer à long terme une fatigue chronique amenant baisse des performances, de la vigilance et anxiété
- des troubles de la vision, maux de tête, perturbation de la mémoire, incidence sur les maladies mentales.

Effets subjectifs et psychologiques :

La gêne engendrée par le bruit affecte la qualité de vie. Cela peut se traduire par la baisse des performances, des effets sociaux et comportementaux conflictuels (isolement, agressivité, perturbation de la communication orale). Au travail, le bruit conduit à une baisse du rendement et à l'augmentation des accidents du travail.

Echelle du bruit



Annexe 6. Les différents types de bruit

1- Bruits normalisés ou bruits de référence :

Les bruits normalisés sont créés artificiellement et utilisés pour des mesures acoustiques. On distingue :

- **Bruit blanc** est composé de toutes les fréquences audibles au même niveau de pression sonore, sa densité spectrale de puissance constante quelle que soit sa fréquence. Ces fréquences doublent d'une octave à l'autre et ont toutes la même énergie qui croît de trois décibels par octave.

- **Bruit rose** : bruit dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence et dont le niveau par bande d'octave est constant. Il contient plus de sons graves que d'aigus. Il est utilisé pour mesurer l'isolement à l'intérieur des bâtiments et l'isolement des façades au bruit des avions.

- **Bruit route** : bruit dont le niveau sonore dans chacune des bandes d'octave ou de tiers d'octave est voisin de celui des trafics routier et ferroviaire. Il est plus riche en sons graves que le bruit rose. Son spectre est continu dans une bande d'octave mais l'intensité en décibels dans chaque bande d'octave est fixée par rapport à l'intensité contenue dans la bande d'octave centrée sur 1000 Hz. Les variations des autres bandes d'octave par rapport à cette bande sont respectivement de : +6 dB (à 125 Hz) ; + 5 dB (à 250 Hz), + 1 dB (à 500 Hz), - 2 dB (à 2000 Hz), -8 dB (à 4000 Hz).

- **Bruit de chocs normalisé** : bruit produit dans un local par une machine à cinq marteaux frappant le sol pour mesurer l'isolation d'un revêtement.

2- Autres types de bruit

- ***Bruit continu*** : Un bruit émis sans interruption, sur le même mode, tel que le bruit émis par une VMC, un compresseur une pompe.
- ***Bruit intermittent*** : Un bruit discontinu, émis moins de 50% du temps. Dans le bâtiment, il s'agit notamment des bruits de sanitaires ou d'ascenseurs.
- ***Bruit impulsif*** : Consiste en une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique d'une durée inférieure à 1s et séparées par des intervalles de temps d'une durée supérieure à 0.2 s : Exemples : claquement de portes, coups de bélier, les explosions, les bruits de pétards...
- ***Bruit à tonalité marquée*** : Le contenu tonal de ce bruit est identifiable soit directement à l'oreille (oiseau, moustique, sifflet de l'arbitre), soit au moyen d'une analyse de fréquence.
- ***Bruit fluctuant*** : bruit ayant des fluctuations de niveau supérieur à 5 dB mesuré avec un sonomètre en mode lent.
- ***Bruit stable*** : bruit ayant des fluctuations inférieures à 2 dB sur un sonomètre en mode lent.
- ***Bruit particulier*** : bruit du milieu ambiant pouvant être identifié spécifiquement.
- ***Bruit résiduel*** : bruit ambiant en l'absence de bruits particuliers
- ***Bruit aérien*** : bruit se propageant dans l'air pouvant être extérieur ou intérieur (exemples : bruit de circulation, la voix, bruit de télévision...)
- ***Bruit solidien*** : bruit se propageant dans les solides. On distingue les bruits d'impacts (bruits de chocs sur une paroi) et bruits d'équipement (ascenseur, chaudière...)
- ***Bruit ambiant*** ou ***bruit de fond*** : ensemble de bruits émis par toutes les sources sonores proches ou éloignées en un lieu et à un instant donné