

La conception architecturale dans une stratégie d'acoustique durable : simulation sonore et matérialité

Chiraz Chtara[#]

[#] *Equipe de Recherches sur les Ambiances, ERA, Lar-PAA, Université de Carthage
Résidence Elyes. Bloc 33. Apt. 317. La Soukra. 2036. Tunis. Tunisie*

¹chtarachiraz@gmail.com

Résumé— La présente recherche retrace une expérience pédagogique avec les étudiants architectes dont l'objectif a été de développer une stratégie d'acoustique durable dans leur projet d'atelier architecture, un pôle d'urgences médicales à Montplaisir, un quartier fortement urbanisé du Grand Tunis. La méthodologie adoptée a été en deux temps. D'abord, un intérêt à l'échelle urbaine avec 1) l'analyse du site pour ressortir ses spécificités acoustiques, 2) l'usage du logiciel Autodesk Forma pour optimiser la manipulation des contraintes du terrain dans la conception de la volumétrie du projet. Ensuite, la conception architecturale s'est basée sur 1) l'identification des caractéristiques sonores des sous-espaces suivant la réglementation acoustique, 2) l'adoption d'une stratégie d'optimisation de la conception sonore et l'usage de matériaux durables.

La démarche investie dans une cinquantaine de projets a montré que le tissu urbain se présente à forte densité avec une rugosité élevée et une fractalité faible. Les mesures sonores *in situ* et la simulation acoustique des bruits urbains ont attesté de la forte exposition du terrain aux nuisances sonores conditionnant ainsi l'implantation des masses du projet et la définition de leurs fonctions. L'observation des besoins des sous-espaces en terme de confort acoustique a orienté les étudiants dans l'aménagement spatial et la sélection de matériaux adéquats tantôt pour une correction acoustique, tantôt pour une isolation phonique. L'utilisation de matériaux écologiques a été assez limité vu la nature du projet avec notamment le choix d'un sol vinyle dans plusieurs zones du projet pour des raisons d'hygiène.

Mots-Clés— Acoustique durable. Bien-être sonore. Simulation acoustique. Autodesk Forma. Matériaux éco-responsables.

I. INTRODUCTION

La durabilité appliquée à l'architecture allie bien-être des usagers et responsabilité envers l'environnement. Si on se penche sur les événements internationaux autour de cette thématique, l'énergie solaire, la thermique et l'aéraulique sont manifestement beaucoup plus explorées que l'acoustique. Le contexte tunisien n'échappe pas à ce constat. Les derniers salons et forums sur la durabilité et l'innovation dans le bâtiment n'ont pas abordé cet aspect malgré son impact sur le confort de l'utilisateur. Une acoustique durable implique une conception sonore qui répond aux exigences spatio-fonctionnelles et un choix judicieux de matériaux efficaces face aux bruits urbains. L'attention est surtout portée sur l'échelle architecturale, or la dimension urbaine est la première échelle à observer. Grâce à l'intelligence artificielle, l'étude de l'influence des nuisances sonores urbaines sur le projet est aujourd'hui étudiée par des logiciels de simulation acoustique pour améliorer son efficacité environnementale et sa durabilité dès la phase de préconception.

Dans cette recherche, l'idée est de constituer et appliquer une démarche d'acoustique durable dans le projet d'atelier architecture des étudiants de la quatrième année de l'UIK à Tunis (année universitaire 2024/2025). Le projet en question est un pôle d'urgences médicales, situé dans le quartier Montplaisir dans le Grand Tunis, et développé selon une approche de durabilité intégrant des solutions éco-responsables.

II. L'AMBIANCE SONORE : PARADIGME D'ANALYSE ET DE CONCEPTION SONORE

L'étude d'un phénomène sonore implique la détermination précise des paramètres à observer. L'ambiance sonore, paradigme d'appréhension d'une situation sonore, définit trois dimensions pour l'analyse et la conception de l'espace construit : 1) le signal sonore (dimension physique), 2) l'espace de propagation des ondes sonores (dimension spatiale) et 3) l'utilisateur percevant (dimension humaine) (Torgue, 2014).

L'acoustique urbaine examine l'interaction entre le signal sonore et l'espace de propagation ou tissu urbain, qui constitue un champ diffus aux obstacles divers pour les signaux sonores. Les formes urbaines modèlent les sons urbains et confèrent au tissu une singularité acoustique. Woloszyn (2000) appelle cette propagation acoustique/géométrie du bâti, Modulateur Morpho-Acoustique. Un tissu urbain est alors défini selon ses caractéristiques morpho-acoustiques résultant des configurations volumétriques complexes et la matérialité des différentes surfaces. Par ailleurs, il est important de préciser que les ondes sonores sont influencées par d'autres paramètres à l'échelle urbaine, à savoir : l'absorption atmosphérique (influence de l'humidité et de la diffusion thermique) et les conditions météorologiques (la vitesse du vent et les gradients de température).

Par ailleurs, deux aspects sont à maîtriser dans le bâtiment pour garantir le confort sonore de l'usager (dimension humaine). D'une part, l'isolation phonique réduit les nuisances sonores provenant de l'extérieur ou de l'intérieur vers l'espace récepteur. D'autre part, la correction acoustique s'intéresse à la bonne diffusion de l'énergie réverbérante à l'intérieur d'un local où se trouve des sources sonores. La réverbération est « *un effet de propagation par lequel les sons perdurent après l'arrêt de l'émission* », (Augoyard & Torgue, 1995, p. 120). Le temps de réverbération T_r (en seconde) est le temps mis par le son pour décroître après extinction de la source, il peut être court ou long. Les facteurs principaux dont il faut tenir compte pour garantir un temps de réverbération optimal (court ou long) sont : i) la destination de la salle ou sa fonction, ii) son volume, iii) la surface et la nature de ses parois, iv) le type de mobilier et le nombre d'occupants.

III. APPROCHE METHODOLOGIQUE

La démarche adoptée dans notre recherche étudie deux échelles : 1) urbaine, par l'analyse acoustique du site d'intervention et la modélisation de la volumétrie qui en résulte ; et 2) architecturale, à travers la conception sonore des spatialités du projet. Notre protocole méthodologique ambitionne de satisfaire à des exigences de développement durable et se base sur les trois dimensions physique, spatiale et humaine, obligatoires à l'existence de la situation d'ambiance sonore.

A. *Exploration des Spécificités Acoustiques du Site d'Intervention*

1) *Identification des Caractéristiques Morph-Acoustiques du Tissu Urbain* : L'observation de l'influence des formes urbaines se fait à deux échelles : l'échelle du tissu urbain et l'échelle de la rue. La caractérisation du pouvoir acoustique du tissu urbain implique l'examen de trois indicateurs physiques : i) la densité urbaine d'occupation, rapport construit/non construit, ii) la rugosité du terrain, indice traitant de la hauteur et de la répartition du bâti sur le fragment, et iii) la fractalité des configurations spatiales, indice informant sur la hiérarchie de distribution des éléments pleins d'une surface (Bar et Loye, 1981 ; Raimbault, 2002). Ces indicateurs renseignent sur le degré de porosité du tissu urbain aux bruits et sur les propriétés sonores spécifiques de ses masses. Le changement de l'échelle d'observation se traduit par l'attention portée à des composantes plus spécifiques qui entourent le terrain du projet : i) la géométrie de la rue c'est-à-dire son profil (rapport hauteur/largeur), ii) la matérialité des façades, et iii) la matérialité du sol (Chtara, 2019).

2) *Mesures des Niveaux Sonores* : Acoustiquement, le signal sonore est une sensation auditive engendrée par une onde sonore. Il est défini par son intensité, sa fréquence et son timbre (Chagué, 2001). Dans notre recherche, l'étude du signal sonore se limitera à la captation de l'intensité ou niveau sonore (en dB) via des applications de sonomètre disponibles sur les smartphones des étudiants. Les mesures sont faites à différents moments de la journée (matin, après-midi et nuit) et à plusieurs endroits du terrain et ses alentours.

3) *Etude des Nuisances Sonores et Influence des Vents Dominants, Usage d'Autodesk Forma* : Autodesk Forma est un logiciel basé sur le cloud, une nouvelle solution qui s'ajoute à Autodesk en 2023, il offre des outils d'IA puissants et faciles à utiliser pour l'avant-projet et les études de faisabilité (Vérut et Akiki, 2023). Il utilise des données physiques, des réglementations et des données environnementales pour analyser et optimiser la conception du projet en fonction des paramètres physiques tels que le bruit, l'exposition au soleil, la vitesse du vent qui affectent la qualité de l'environnement urbain (Mendez et D'Silva, 2023). Pour l'aspect sonore, Forma permet l'analyse du bruit et fournit : 1) des résultats rapides pour guider la conception, et 2) des résultats détaillés selon les conditions acoustiques du projet. Pour la simulation, il se base sur des données récupérées : i) nombre de voitures qui acheminent les voiries avoisinant le terrain, ii) vitesse maximale autorisée, iii) informations sur le réseau ferroviaire s'il existe, et iv) informations au niveau des façades.

Le logiciel simule les vents dominants qui ont une influence conséquente sur la direction ondes sonores. En effet, la vitesse du vent augmente avec l'altitude, rabattant vers le sol le trajet de la propagation sonore. Si les ondes sonores ont la même direction que le vent, il y a création d'une zone favorable de propagation de la source, dans le cas contraire c'est une zone défavorable de propagation sonore qui est créée.

B. Stratégie d'Optimisation de la Conception des Sous-Espaces : Expertise et Conception Sonore

Le programme fonctionnel du pôle d'urgences médicales est complexe et se compose de zones constituées de sous-espaces aux exigences sonores différentes. Cette deuxième temporalité de l'exercice vient à l'étape de l'avant-projet sommaire (APS) où l'épannelage des activités est finalisé. D'abord, l'idée est d'identifier les sons intérieurs et extérieurs au projet, de quantifier leurs niveaux sonores et de les organiser ensuite selon leur nature (bruits de chocs, bruits aériens ou bruits solidiens) pour préconiser la solution conceptuelle adéquate.

Etant donné le nombre important de sous-espaces et la complexité de la tâche, les étudiants ont la possibilité de sélectionner un à deux sous-espaces maximum à développer. Le choix des matériaux et l'aménagement spatial seront tributaires des exigences sonores recommandées par la réglementation acoustique des hôpitaux et établissements de santé : durées de réverbération et isolement acoustique.

IV. RESULTATS

La démarche investie dans une cinquantaine de projets a donné des résultats assez satisfaisants pour toutes les étapes du travail. L'analyse acoustique du site d'intervention a révélé des conclusions qui convergent vers les mêmes caractéristiques typo-morphologiques du tissu urbain. Ce dernier se présente fermé et dense, acoustiquement peu perméable aux sons urbains favorisant une réverbération importante. Les bâtiments aux alentours sont principalement des R+5, séparés par des voies de 6m conditionnant une forte rugosité donc une imperméabilité aux sons. Le tissu est orthogonal, constitué de bâtiments disposés avec une certaine régularité ; la fractalité est alors faible offrant une certaine homogénéité dans l'expérience auditive des rues avec peu de transitions sonores. L'observation de la morphologie et de la matérialité à l'échelle de la rue permet de visualiser des rues en L bordées de façades majoritairement vitrées et un sol bitumeux, deux matériaux denses et lourds. Ce sont des surfaces qui engendrent des réflexions sonores vers le terrain.

Les mesures sonores *in situ*, prises autour du site et à des temporalités différentes, ont révélé un terrain exposé à plusieurs nuisances principalement mécaniques aux niveaux sonores élevés (véhicules et avions) : entre 53 et 67 dB(A) la matinée et l'après-midi, entre 43 et 54 dB(A) pendant la nuit. La simulation sonore des bruits urbains via Forma, faites sur la base des valeurs maximales du niveau sonore et des spécificités des rues véhiculaires, ont permis d'estimer l'impact de ces nuisances sur le terrain (Figure 1) : « on note que les nuisances sonores sont élevées du côté Sud du site, en journée, il faudra donc prévoir des solutions d'isolation phonique dans le projet (...). Les vents dominants venant du Nord-Ouest redirigent les bruits venant du côté Sud », (extrait d'un rendu des étudiants). Les zones bruyantes (en jaune) et calmes (en vert) ainsi identifiées, l'emplacement des entités composantes du pôle d'urgences ou épannelage a été fait en fonction des besoins sur le plan auditif. Un exemple de préconisation conceptuelle se déploie comme suit : « les zones nécessitant du calme comme la zone de la chirurgie, la réanimation ou le laboratoire pourront être placés dans l'espace calme, à l'Est et au Nord-Est. (...) créer un écran anti-bruit au niveau du côté Sud et mettre en place un isolant phonique. La zone d'hébergement, l'administration et la zone des médecins pourront être placés dans les niveaux supérieurs pour les éloigner au mieux du bruit. (...) inclure des espaces verts pour favoriser des effets sonores apaisants pour les usagers (son des oiseaux, son du vent dans les arbres, etc.) », (extrait d'un rendu des étudiants).

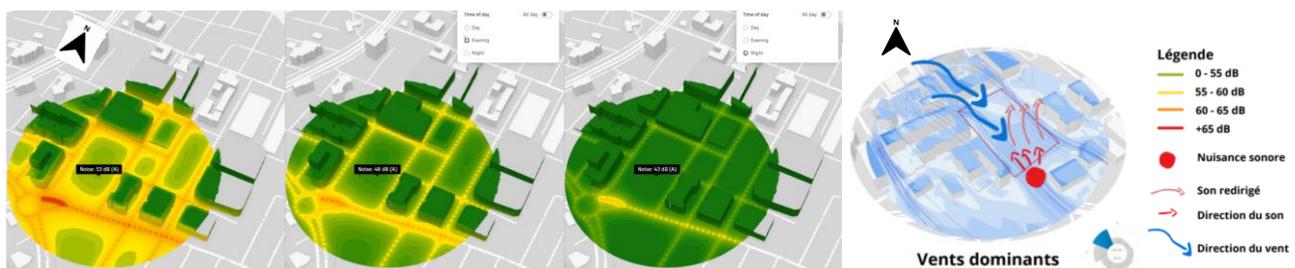


Figure 1 : Simulation des bruits urbains pendant la matinée, l'après-midi et la nuit (de gauche vers la droite) et celle des vents dominants et leurs impacts autour et dans le terrain sur le logiciel Autodesk Forma, source : extraits des travaux des étudiants (AU : 2024/2025)

L'identification des sources sonores auxquelles le projet est soumis montre une multitude de bruits extérieurs et intérieurs à maîtriser (Figure 2) : i) des bruits aériens extérieurs (avion, sirène des ambulances), ii) des bruits aériens intérieurs (voix humaines, conversations, sonneries de téléphones), iii) des bruits de chocs ou d'impact (chariots des malades, sons de pas de plusieurs usagers), iv) des bruits solidiens (ascenseurs, climatisation, bruits des pneus des voitures venant du sous-sol).

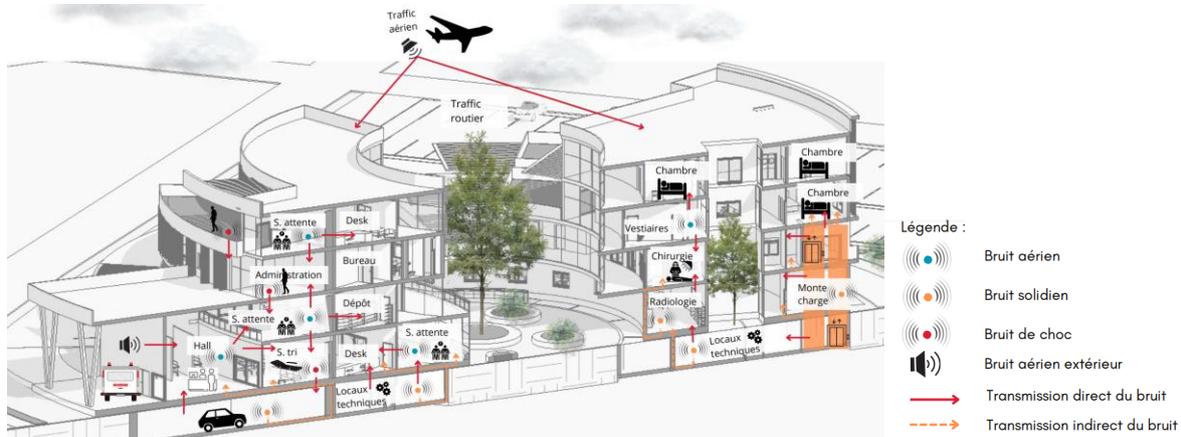


Figure 2 : Coupe schématique montrant les différents types de bruits, source : extrait des travaux des étudiants (AU : 2024/2025)

L'examen et le décryptage des besoins selon la réglementation acoustique, élaborés pour toutes les zones du pôle d'urgences, ont éclairé les étudiants sur l'approche globale à adopter en terme de confort acoustique et les ont orientés dans la sélection de l'espace à développer. Une stratégie d'isolation phonique a été appliquée sur l'enveloppe extérieure, au niveau des dalles intermédiaires et pour les dispositifs d'entrée notamment l'usage de portes acoustiques. De plus, plusieurs projets ont été implantés avec un retrait conséquent par rapport à la rue la plus mouvementée avec la mise en place d'un écran végétal anti-bruit.

Les matériaux investis dans les projets sont pour la plupart industrialisés ou bien recyclés (c'est-à-dire dans une démarche écologique). L'usage de matériaux écologiques a été assez limité vu la nature du projet avec notamment l'usage d'un sol vinyle pour des raisons d'hygiène. La réduction des bruits aériens s'est faite par l'utilisation de l'isolant laine de roche, par exemple, dans les murs extérieurs et intérieurs, le triple vitrage conditionnant un affaiblissement sonore appréciable. La diminution de l'impact des bruits solidiens et de chocs a été possible grâce à l'installation de dalles flottantes et la pose de sous-couches en liège naturel ou en caoutchouc dense recyclé. Les étudiants ont été plus inventifs dans la choix des matériaux pour la correction acoustique qui concernent les six parois de l'espace (TABLEAU 1).

TABLEAU 1
 MATERIAUX CHOISIS POUR LA CORRECTION ACOUSTIQUE, SOURCE : AUTEURE

Plafond		Sol	
Panneaux absorbants en laine minérale		Linoléum	
Plafonnier absorbant en PET recyclé		Vinyle ou PVC acoustique antistatique	
Panneaux acoustiques Eco-fibre recyclé		Carrelage bois et sous-couche en liège	
Murs		Mobilier	
Paroi en plâtre recyclé		Fauteuils acoustiques rembourrés	

Selon la réglementation, la salle d'attente des malades doit avoir un $T_r \geq 1,2(s)$ et un niveau sonore $N \geq 47dB$. La Figure 3 montre un exemple de solution avec i) l'installation de plafonniers absorbants en PET recyclé, ii) la mise en place de quelques parois verticales en plâtre perforé, iii) un sol revêtu de carrelage effet bois avec sous couche en liège, iv) un vitrage pour lequel il y a ajout de 2 films PVB acoustique ou Polyvinyle de butyral qui absorbent les ondes sonores et réduit la transmission du bruit, efficace pour l'isolation phonique.



Figure 3 : Exemple de choix architectural pour la salle d'attente des malades admis à l'intérieur du service (à gauche, une schématisation avec le choix des matériaux, à droite, l'image de synthèse correspondante), source : extrait des travaux des étudiants (AU : 2024/2025)

V. CONCLUSIONS

A travers cette expérimentation, l'acoustique durable se présente comme une part qui trouve tout son sens dans la recherche du confort de l'utilisateur, au même titre que la thermique et l'ensoleillement. Suivant la démarche investie, la conception sonore des sous-espaces a été structurée, se basant sur leurs caractéristiques sonores et le pouvoir d'absorption ou d'affaiblissement phonique des matériaux. L'étude du Tr pourra être plus poussée via des logiciels adaptés comme I-Simpa relié à SketchUp, mais surtout Forma pour rester dans la cohérence du processus BIM. Dans ce sens, le logiciel Forma permet d'avoir des résultats détaillés, or cette expérimentation s'est limitée à des résultats rapides pour orienter la conception volumétrique du projet. Par ailleurs, l'objectif de sensibilisation des concepteurs de demain à l'importance du paramètre sonore dans l'acte de bâtir a été atteint, ainsi que la pratique d'investir les outils de l'IA dans les choix conceptuels pour une stratégie durable.

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier les étudiants architectes pour leur sérieux et leur investissement afin de réussir cette expérience. Mes remerciements s'adressent aussi à monsieur Chédi Gdoura, architecte, BIM-6D Consultant, qui a initié et encadré les étudiants architectes pour l'usage de Forma.

REFERENCES

- [1] A. Mendez and A. D'Silva, "Turn Every Stone" in Your Conceptual Design Using Autodesk Forma", in *AU 2023 The design and make conference*, paper AS601687, 16 pages. Available : www.autodesk.com.
- [2] C. Chtara, "Caractérisation(s) de l'espace sonore de la médina de Tunis au XIX^e-Début XX^e s.: formes urbaines, récits de voyage et effets sonores", Thèse de doctorat, Ed. SIA-Université de Carthage, Tunis, Tunisie, Juin 2019.
- [3] H. Torgue, « Posture d'écoute et attention au monde sonore ». Dans Y. Citton (dir.), *L'économie de l'attention. Nouvel horizon du capitalisme ?*, La découverte, pp. 229-239, 2014.
- [4] J.-F. Augoyard et H. Torgue, *A l'écoute de l'environnement : Répertoire des effets sonores*, Editions Parenthèse, Marseille, 174 p, 1995.
- [5] M. Chagué. *L'acoustique de l'habitat : principes fondamentaux*, Editions du Moniteur, Paris, 2001.
- [6] M. Raimbault, *Simulation des ambiances sonores urbaines : intégration des aspects qualitatifs*, Thèse de doctorat, CERMA-Université de Nantes, Nantes, France, 2002.
- [7] P. Bar et B. Loye, *Bruit et formes urbaines : propagation du bruit routier dans les tissus*, Cetur, Lyon, 1981.
- [8] P. Woloszyn, *Une approche de la géométrie diffuse des ambiances sonores urbaines*, Thèse de doctorat, CERMA-Université de Nantes, Nantes, France, 2000.
- [9] Réglementation acoustique française. Disponible : [Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements de santé. - Légifrance](#)
- [10] T. Vérut et I. Akiki, *Autodesk Forma : Utilisez la modélisation sur Forma et synchronisez avec facilité sur Revit grâce au lien bidirectionnel dans la collection AEC. Webinaire du 03/07/2023. Disponible : (122) Modélisation dans Autodesk Forma (anciennement Spacemaker). - YouTube*