

# L'acoustique architecturale dans une approche de durabilité : cas d'un pôle d'urgences médicales

## Architectural acoustics in a sustainable approach : the case of a medical emergency centre

Chiraz Chtara<sup>#</sup>

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

<sup>1</sup>chtarachiraz@gmail.com

**Résumé—** Le présent travail expose une étude de cas pédagogique expérimenté dans le cadre du cours « Acoustique architecturale et urbaine » dispensé pour les étudiants architectes de deuxième cycle. L'objectif a été de développer l'acoustique de leur projet d'architecture dans une démarche durable. Le projet en question est un pôle d'urgences médicales situé dans un quartier dense du Grand Tunis. L'approche méthodologique a été en deux étapes. D'abord, un travail d'identification des caractéristiques morpho-acoustiques du site d'intervention a été élaboré à travers le relevé des mesures sonores in situ, ainsi que l'usage du logiciel Autodesk Forma in vivo. Cette analyse a ambitionné d'optimiser la manipulation des contraintes du terrain dans la conception de la volumétrie du projet et l'épannelage des zones fonctionnelles. Ensuite, la conception architecturale s'est intéressée à 1) la définition des besoins sonores des sous-espaces suivant la réglementation acoustique, et 2) l'adoption d'une stratégie d'optimisation de la conception sonore et l'emploi de matériaux durables.

Le tissu urbain s'est révélé très réverbérant suite à une forte densité et une rugosité élevée. Les mesures sonores in situ et la simulation acoustique des bruits urbains ont attesté de la forte exposition du terrain aux nuisances sonores conditionnant l'implantation des masses du projet et l'épannelage des entités fonctionnelles. L'observation des besoins des sous-espaces en terme de confort acoustique a orienté les choix conceptuels concernant l'aménagement spatial et la sélection de la matérialité adéquate tantôt pour une correction acoustique, tantôt pour une isolation phonique. Les espaces qui ont fait l'objet d'une conception sonore détaillée sont: hall d'accueil, salle d'attente malades, salle de repos médecins, chambres, box de soin, salle d'opération, salle de scanner, salle de réanimation. L'usage de matériaux écologiques s'y est limité à la laine de roche ou encore les produits recyclés. Des matériaux industrialisés ont aussi été investi pour remédier aux contraintes d'hygiène que ce type de projet oblige.

**Mots-Clés—** Durabilité. Autodesk forma. Acoustique durable. Bien-être sonore. Matériaux éco-responsables.

**Abstract—** This paper presents an educational case study that was conducted as part of the 'Architectural and Urban Acoustics' course for architecture students. The aim was to enhance their understanding of sound design for their architectural project, focusing on sustainable acoustics. The case of study is a medical emergency center located in a densely populated neighbourhood of Greater Tunis. The methodological approach was twofold. First, the morpho-acoustic characteristics of the site were identified through on-site sound measurements and the use of Autodesk Forma software. This analysis aimed to optimise the handling of site constraints in the design of the project's volume and the partitioning of functional areas. Secondly, the architectural design focused on: 1) defining the sound requirements of the sub-spaces in accordance with acoustic regulations, and 2) adopting a strategy to optimise the sound design and use sustainable materials.

The densely populated urban fabric has a high roughness factor, resulting in significant reverberation. In-situ sound measurements and acoustic simulations of urban noise confirmed the site's high exposure to noise pollution. This influenced the project's layout and the design of its functional entities. The acoustic comfort requirements of the sub-spaces guided the design choices regarding spatial layout and the selection of appropriate materials for acoustic correction and sound insulation. The following areas have undergone detailed sound design: the reception hall, the patient waiting room, the doctors' rest room, the bedrooms, the treatment rooms, the operating theatre, the scanning room and the resuscitation room. Only rock wool and recycled products were used as environmentally friendly materials. Industrialised materials were also chosen to meet the hygiene requirements of this type of project.

**Keys-words—** Sustainability. Autodesk forma. Urban and architectural acoustic. Sound well-being. Eco-Friendly materials.

## I. INTRODUCTION

L'Organisation des Nations Unies définit la durabilité en ces termes, « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ». Les 17 objectifs du développement durable (ODD) à atteindre d'ici 2030 visent notamment à réduire les inégalités sociales et économiques, améliorer la qualité de l'enseignement, lutter contre les changements climatiques et maîtriser la consommation des ressources naturelles (sol, énergie, ressources locales) afin de préserver le capital environnemental des pays. Le secteur du bâtiment est largement concerné par la démarche de durabilité. En effet, l'architecture et les divers domaines qui lui sont rattachés (fabrication de matériaux, chantier, travaux de voirie et réseaux divers, etc.) font partie des plus grands consommateurs de ressources naturelles et d'énergie multiples de la phase de construction du projet jusqu'à son exploitation.

La durabilité appliquée à l'architecture se manifeste à travers la recherche d'un équilibre, une harmonie entre le bien-être des usagers et la responsabilité envers l'environnement. Le troisième objectif du ODD intitulé 'Bonne santé et bien-être' stipule qu'il faut permettre à tous de vivre en bonne santé et de promouvoir le bien-être de tous à tout âge. La conception des bâtiments doit offrir « *un climat intérieur sain concernant la lumière, l'acoustique, la qualité de l'air et l'exposition aux rayonnements et au dégazage* », [1]. Si on se penche sur les événements internationaux retracant les initiatives d'une architecture durable, l'énergie solaire, la thermique, l'aéralrique et la qualité de l'air sont manifestement beaucoup plus explorées que l'acoustique. Maîtriser la consommation de l'énergie et des ressources naturelles, réduire les émissions de carbone sont les axes principaux. De plus, les projets pilotes cités dans le guide d'architecture de 2023 pour atteindre l'objectif de bien-être des usagers dans des pays comme la Tanzanie, le Népal, le Danemark, le Soudan ou la Nouvelle Zélande ont développé la démarche de développement durable par l'usage de matériaux locaux, le recours aux solutions naturelles telles que l'aération naturelle, l'énergie solaire, minimiser les coûts et l'empreinte carbone [1]. L'acoustique ne trouve pas sa place.

## II. PLACE DE L'ACOUSTIQUE DANS L'ARCHITECTURE DURABLE EN TUNISIE

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 soulevé la question du sonore malgré son impact considérable sur le confort de l'usager. Pendant les derniers Forums de l'entrepreneuriat Medibat, l'édition octobre 2023, « *Entreprendre pour un bâtiment vert et durable* », ou encore l'édition de mai 2025, « *Entreprendre dans le secteur de la construction bâtiment : économie verte et circulaire* », les thématiques discutées et les expériences retracées dans une optique de durabilité, se sont concentrées sur l'empreinte carbone et la construction durable, le BIM (Building Information Modeling) et l'architecture durable, l'efficacité énergétique et le management durable. L'acoustique est encore une fois mise de côté. Une interview avec Lotfi Rejeb architecte et expert international en écoconstruction et développement durable, dresse un diagnostic et un état des lieux de l'architecture durable en Tunisie [2]. Les préoccupations des projets cités étaient principalement orientées vers le confort thermique, l'ensoleillement et la réduction de la consommation d'énergie par l'usage de matériaux locaux, la gestion des déchets et l'engagement de solutions bioclimatiques. L'acoustique reste du ressort de l'ingénierie en acoustique pour réduire les nuisances sonores urbaines, principalement les bruits véhiculaires à travers l'isolation phonique ou encore la maîtrise des sons dans les espaces clos destinés à l'écoute. Une réflexion sur l'acoustique dans une approche durable n'est pas l'aune de la réflexion.

## III. VERS UNE ACOUSTIQUE DURABLE DANS LE PROJET ARCHITECTURAL

Une acoustique durable implique une conception sonore qui répond aux exigences spatio-fonctionnelles du projet architectural et un choix judicieux de matériaux éco-responsables (écologiques, recyclés, etc.) efficaces face aux bruits urbains. 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'objectif premier est une sensibilisation des étudiants architectes, futurs concepteurs, à la part sonore du projet architectural prise dans une logique de durabilité. Les étudiants cibles sont ceux du deuxième cycle pour lesquels les cours dispensés alimentent les différentes facettes du projet développé dans l'atelier « *Méthodologie du projet architectural* ». Le cours « *Acoustique architecturale et urbaine* » propose un approfondissement des principes fondamentaux de l'acoustique et de leur application dans le domaine de l'urbanisme et de l'architecture. L'objectif principal de cette matière est de former les étudiants à identifier,

évaluer et résoudre les problèmes acoustiques pour créer des environnements bâtis harmonieux et fonctionnels sur le plan acoustique (extrait de la fiche matière du cours ARC 2204). Cette expérimentation offre aux étudiants l'occasion de développer une réflexion autour de la conception sonore du projet dans une démarche d'acoustique durable intégrant des solutions éco-responsables, le projet étant un pôle d'urgences médicales situé au Grand Tunis.

#### IV. OBSERVATION ET ANALYSE DE LA SITUATION SONORE ET ACOUSTIQUE

L'analyse d'une situation sonore passe par la compréhension des phénomènes qui lui sont rattachés à savoir, la réflexion, l'absorption et la transmission des ondes sonores. Elle sous-entend aussi la détermination des paramètres indispensables à son existence. La référence [3] définit l'espace sonore comme l'imbrication de trois composantes : 1) les signaux acoustiques divers, 2) les espaces de diffusion ou lieux de propagation de ces flux sonores, et 3) leurs perceptions ouvrant sur le domaine des significations des multiples interprétations et des pratiques sociales. Ces composantes appartiennent à des dimensions distinctes, mais complémentaires. Le signal sonore constitue *la dimension physique* du son. Deuxièmement, *la dimension spatiale* représente l'espace de propagation sonore, qu'il soit architectural ou urbain, fait de formes, de volumes et de matières (matériaux et textures). Troisièmement, *la dimension humaine* englobe les sensations et les perceptions usagères ou usagers percevants (Figure 1). L'étude de l'interaction entre ces trois dimensions permet d'observer et de comprendre la sonorité d'un espace construit.

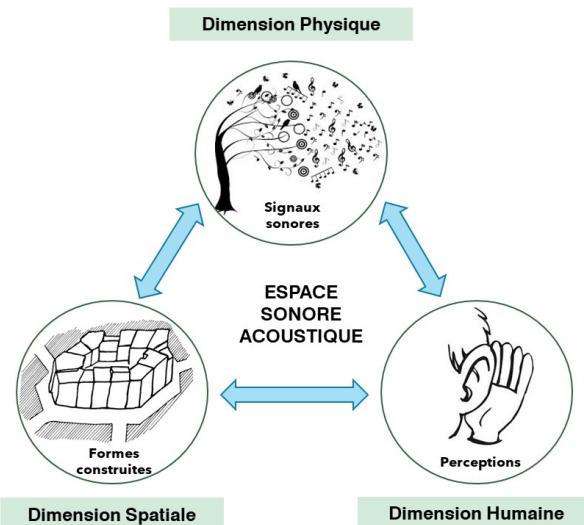


Figure 1 : Modèle conceptuel de l'espace sonore/acoustique, source : Auteure.

D'abord, l'étude des relations entre les dimensions physique et spatiale est du ressort de l'acoustique urbaine et de l'acoustique architecturale, deux champs diffus aux obstacles différents aux sons. L'acoustique urbaine, discipline de la physique de l'environnement, examine les propagations du bruit en milieu urbain en relation avec les phénomènes physiques présents dans l'environnement et la morphologie urbaine. Les ondes sonores sont influencées par 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). Les formes urbaines modèlent les sons urbains et confèrent au tissu une identité acoustique. P. Woloszyn ([4],[5]) appelle cette propagation acoustique/géométrie du bâti urbain « Modulateur Morpho-Acoustique ». Les formes urbaines influencent les propagations sonores par leurs configurations volumétriques complexes (densité urbaine, hauteur des bâtiments, morphologie des angles) et par la matérialité des surfaces des façades et les sols. Un tissu urbain est alors défini selon ses *caractéristiques morpho-acoustiques*.

A l'échelle du bâtiment, il faut garantir le confort sonore de l'usager (dimension humaine). Deux phénomènes sonores sont alors à maîtriser selon les exigences de l'activité de l'espace : l'isolation phonique et la correction acoustique. 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 réverbérée 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* », [6]. 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.

## V. METHODOLOGIE ADOPTEE

Notre protocole méthodologique ambitionne de satisfaire aux exigences de l'acoustique durable et se base sur les trois dimensions physique, spatiale et humaine, obligatoires à l'existence de la situation sonore. Il est structuré en deux grandes phases : la première étape concerne l'analyse acoustique du site d'intervention générant la modélisation de la volumétrie du projet, la deuxième étape se concentre sur la conception sonore d'espaces architecturaux.

### A. Exploration des spécificités acoustiques du site d'intervention

1) *Identification des Caractéristiques Morph-Acoustiques du Tissu Urbain (étude de la dimension spatiale)*: L'observation de l'influence des formes urbaines se fera à l'échelle du tissu urbain et à l'échelle plus spécifique de la rue ([7], [8], [9], [10]). La caractérisation du pouvoir acoustique du tissu urbain implique l'examen de trois indicateurs physiques : i) la densité urbaine d'occupation ou l'étude du rapport construit/non construit dans la parcelle, 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 [11]. Ces trois 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 une attention portée aux spécificités matérielles et formelles des voiries entourant 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 [12].

2) *Mesures des Intensités Sonores (étude de la dimension physique)*: Acoustiquement, le signal sonore est une sensation auditive engendrée par une onde sonore. Il est défini par son intensité, sa fréquence et son timbre [13]. Dans notre recherche, l'étude du signal sonore se limitera à la mesure de l'intensité ou niveau sonore en dB via des applications de sonomètre disponibles sur les smartphones des étudiants pendant l'analyse in situ. 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 Urbaines et Influence des Vents Dominants par le logiciel Autodesk Forma (étude de l'interaction entre la dimension physique et la dimension spatiale)* : 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 [14]. 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, l'énergie, le carbone, l'ombre, le micro climat qui sont générés la qualité de l'environnement urbain [15]. Pour l'aspect sonore, Autodesk 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. Par ailleurs, ce logiciel simule les vents dominants qui ont une influence conséquence 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. Conception sonore du bâtiment

1) *Identification et catégorisation des nuisances sonores* : Cette étape est l'examen de l'environnement sonore immédiat autour et dans le bâtiment. Il s'agit en effet d'identifier les bruits urbains idée extérieurs et intérieurs et de les classer suivant leur nature : a) bruit aérien (bruit propagé dans l'air tel que les bruits de voix, bruits de télévision, etc. On parle alors de propagation aérienne.), b) bruit d'impact ou de chocs (bruit provenant d'un choc sur une paroi comme les bruits de pas, déplacement de meubles, de chute d'objet), ou c) bruit solidaire ou bruit d'équipement (bruit dont la propagation est solidaire tel que le bruit d'ascenseur).

2) *Réglementation acoustique relative aux zones et sous-zones du projet* : Le programme fonctionnel du pôle d'urgences médicales comprend plusieurs zones : Zone (A) publique et d'accueil, Zone (B) d'examens et de soin, Zone (C) d'imagerie médicale, Zone (D) du laboratoire d'analyse, Zone (E) de chirurgie, Zone (F) la morgue, Zone (G) de service de réanimation, Zone (H) d'observation (hébergement), Zone (J) des médecins, Zone (K) du personnel, Zone (L) locaux techniques. L'idée est d'observer les caractéristiques spécifiques des sous-espaces afin de déchiffrer leurs exigences acoustiques et comprendre les liens sonores complexes qui les régissent selon la réglementation acoustique relative aux lieux de soin [16].

3) *Conception architecturale, aménagement et choix des matériaux* : 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. Cette étape est une conception et une justification des solutions acoustiques à préconiser pour répondre aux besoins spécifiques de ces espaces à travers : a) l'identification du temps de réverbération optimal à viser selon l'usage de chaque espace et la manière dont il influence les choix de conception, b) la sélection des matériaux à privilégier pour les murs, plafonds, sols et mobiliers afin de garantir un confort acoustique adapté aux activités de la spatialité choisi.

## VI. RESULTATS

La démarche investie dans une cinquantaine de projets a donné des résultats assez satisfaisants pour toutes les étapes du travail. Les résultats seront présentés ci-après suivant les différentes étapes déjà énumérées, illustrés par les travaux des étudiants.

### A. Analyse acoustique du site

L'analyse acoustique du site d'intervention a révélé des conclusions qui convergent vers les mêmes caractéristiques typomorphologiques du tissu urbain, un tissu fermé et dense, acoustiquement peu perméable aux sons urbains favorisant une réverbération importante (Figure 2). Les bâtiments aux alentours sont principalement des rez-de-chaussée avec cinq étages, séparés par des voies de six mètres 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 monotonie 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.

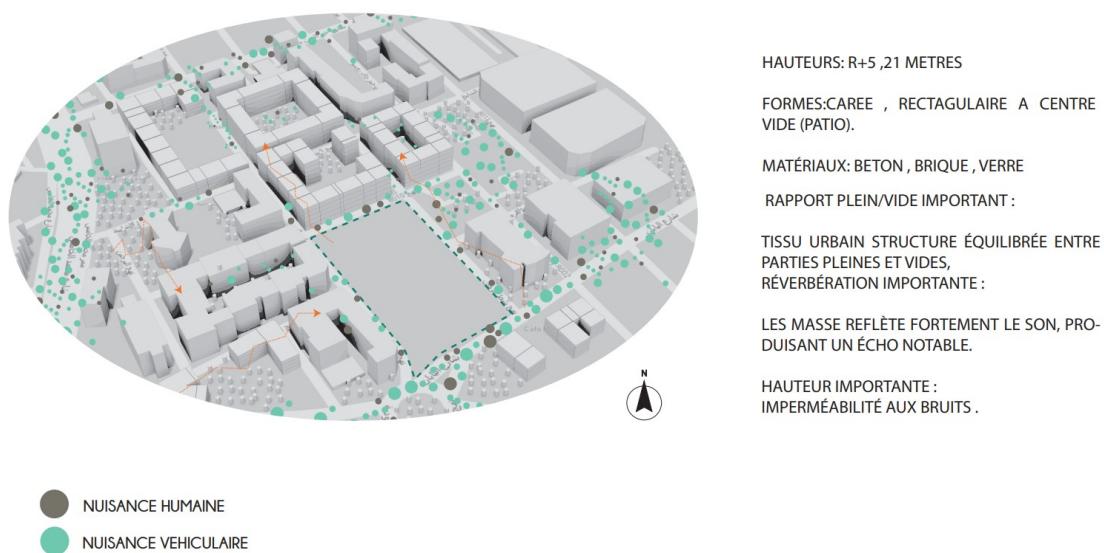


Figure 2 : Caractéristiques morpho-acoustiques du tissu urbain, source : extraits des travaux des étudiants

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. La Figure 3 montre un exemple de

simulation où « *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).

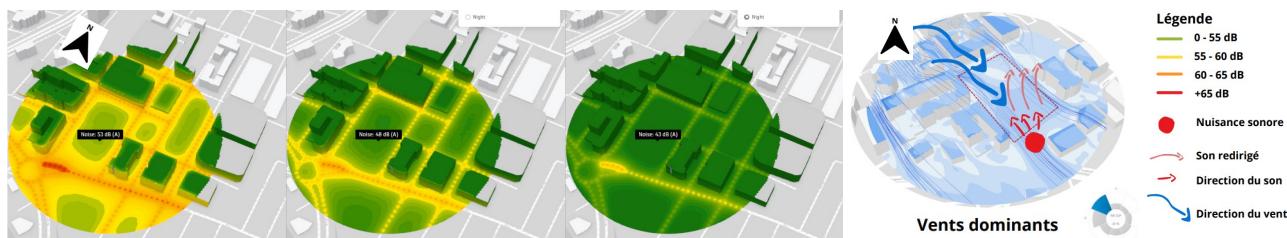


Figure 3 : Simulation des bruits urbains pendant la matinée, l'après-midi et la nuit (de gauche vers la droite) et celle des vents dominants et leurs impacts autour et dans le terrain sur le logiciel Autodesk Forma, source : extraits des travaux des étudiants

La simulation via le logiciel Autodesk Forma ambitionne d'améliorer l'efficacité environnementale et la durabilité du projet architectural dès la phase de préconception. L'usage du logiciel dans ce sens a été assez limité, quelques expérimentations ont été décelées comme l'exemple ci-dessous dans la Figure 4. La simulation a été faite pendant la matinée et pendant la nuit pour un terrain nu et avec une proposition de volumétrie. Les niveaux sonores enregistrés sur les toitures ou encore sur les façades ont permis aux étudiants de choisir le bon matériau avec l'isolation phonique nécessaire pour les espaces se trouvant dans les volumes concernés.

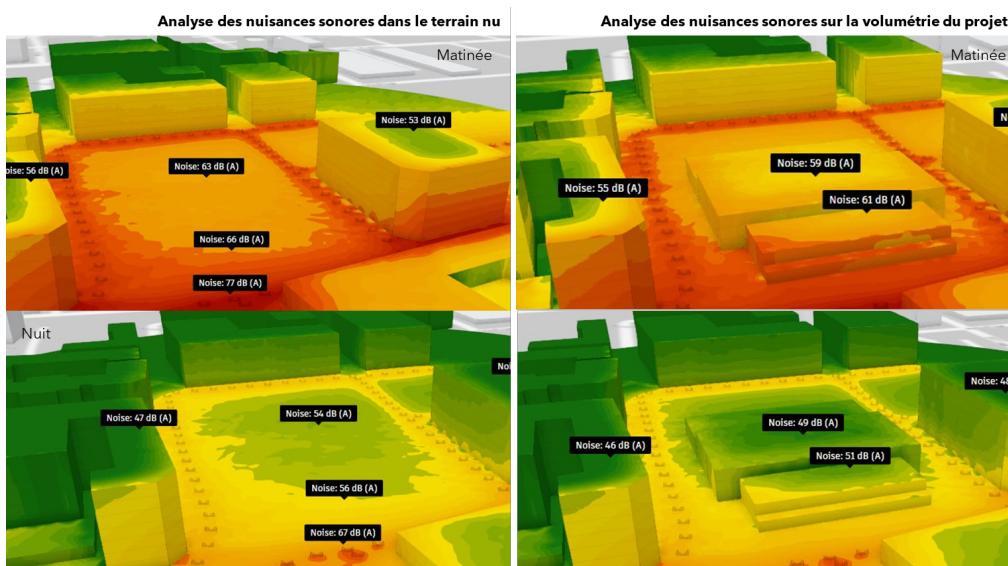


Figure 4 : Simulation des bruits urbains pendant la matinée et la nuit avec le terrain nu (à gauche) et avec une proposition de volumétrie du projet (à droite) sur le logiciel Autodesk Forma, source : extraits des travaux des étudiants

Par ailleurs, 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. Dans l'exemple de la Figure 5, l'écran est une placette urbaine végétalisée créant un microclimat sonore caractérisé par la présence des sons des oiseaux, un son apaisant et apprécié par l'oreille humaine.

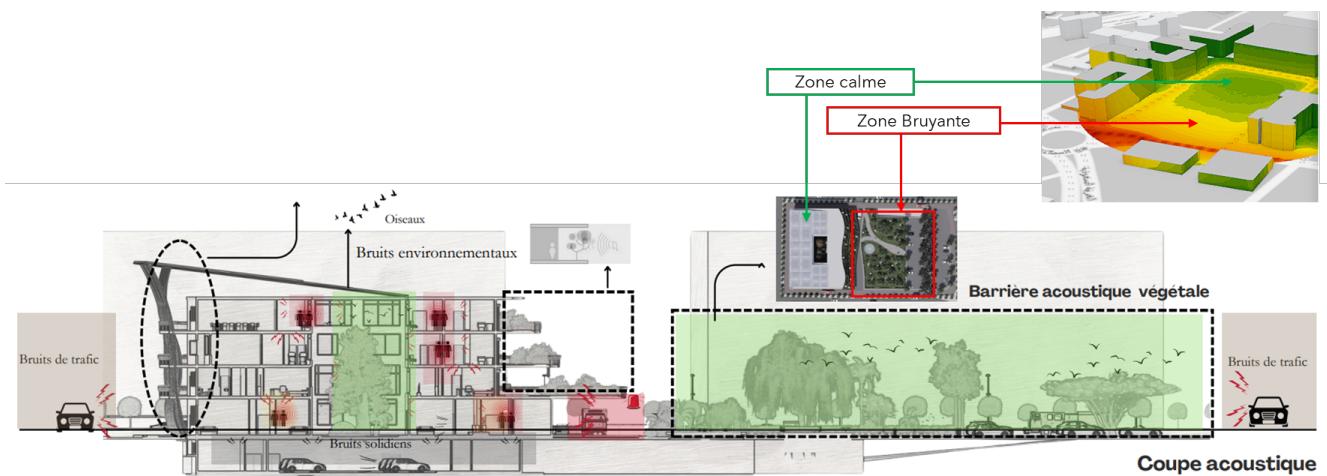


Figure 5 : Exemple d'implantation du projet dans la moitié calme du terrain et la création d'un jardin qui constitue un écran anti-bruit, source : extrait des travaux des étudiants

### B. Identification des nuisances sonores

L'identification des sources sonores auxquelles le projet est soumis montre une multitude de bruits extérieurs et intérieurs à maîtriser afin de garantir un confort acoustique : i) des bruits aériens extérieurs (avion, sirène des ambulances), ii) des bruits aériens intérieurs (voix humaines, conversations, sonneries de téléphones, bruits des machines, sons des véhicules), iii) des bruits d'impact (chariots des malades, sons de pas d'usagers divers -personnel, visiteurs, malades-), iv) des bruits solidiens (ascenseurs, climatisation, bruits des pneus des voitures venant du sous-sol). La Figure 6 montre un exemple de schématisation qui permet de visualiser les nuisances sonores extérieures et intérieures. 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.

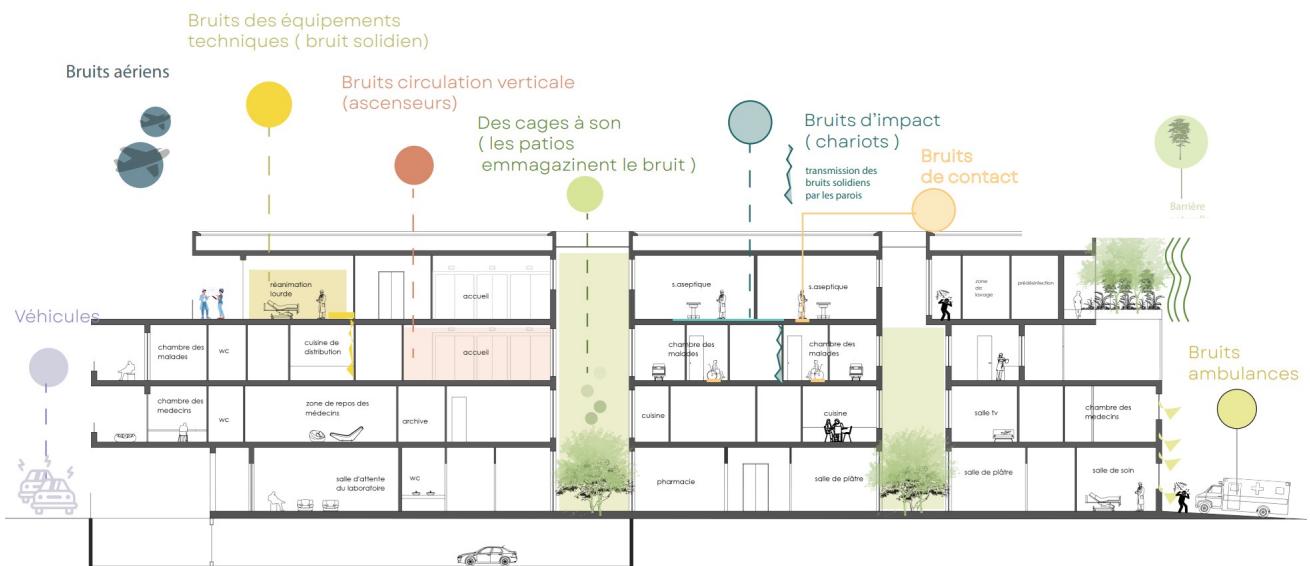


Figure 6 : Coupe architecturale montrant les différents types de bruits extérieurs et intérieurs, source : extrait des travaux des étudiants

### C. Conception d'une schématisation des entités du pôle d'urgences médicales

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 (Figure 7, Figure 8).

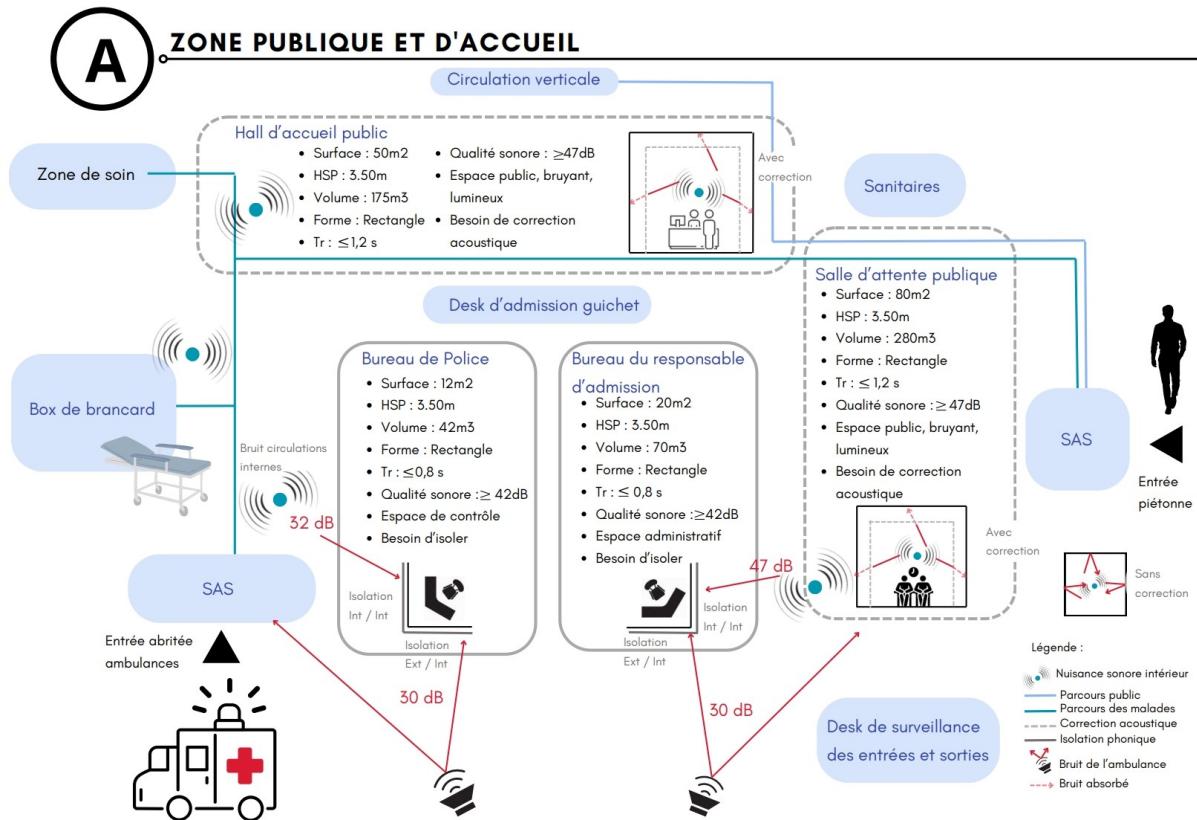


Figure 7 : Exemple 1 de schématisation des besoins acoustiques et les liens des sous-espaces de la Zone A publique et d'accueil, source : travaux des étudiants.

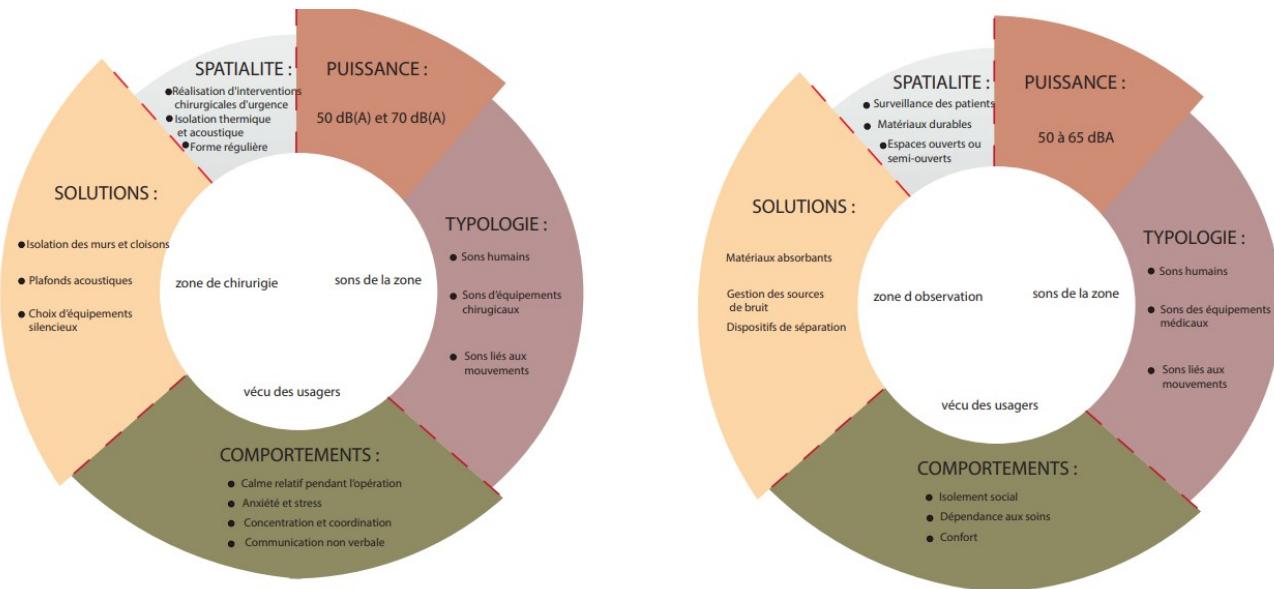


Figure 8 : Exemple 2 de schématisation des besoins acoustiques et les liens des sous-espaces de la Zone (E) de chirurgie (à gauche) et de la Zone (G) de service de réanimation (à droite), source : travaux des étudiants.

#### *D. Choix conceptuels relatifs aux besoins acoustiques des sous-espaces choisis*

Pour la conception sonore détaillée des sous-espaces, dix exemples de locaux ont été étudiés avec une majorité des travaux (40%) qui s'est penchée sur la zone A publique et d'accueil ainsi que la zone B d'examens et de soins. Ces spatialités ont nécessité tantôt une isolation phonique (chambres, box de soin, salle d'opération), tantôt une correction acoustique (salle de scanner, salle de réanimation) ou les deux à la fois (hall d'accueil, salle d'attente malades, salle de repos médecins) (TABLEAU 1).

TABLEAU 1 :  
CHOIX DE LA SOLUTION SONORE SELON LES EXIGENCES DES SOUS-ESPACES, SOURCE : AUTEURE

Traitement acoustique	Espaces développés	Exemples de schématisation des besoins acoustiques de quelques sous-espaces
<b>Isolation Phonique</b>	- Chambres, - Box de Soin, - Salle d'Opération.	<p>ext</p> <p>int</p> <p>30dB≤</p> <p>100-125dB</p> <p>30dB≤</p> <p>Hall d'accueil public</p> <p>hebergement 42dB circulation 25dB hebergement 42dB</p> <p>Hébergement</p>
<b>Correction Acoustique</b>	- Salle de Scanner, - Salle de Réanimation.	<p>direction acoustique</p> <p>35dB</p> <p>27dB</p> <p>35dB avec un Tr de 0.5 à 0.7</p> <p>correction acoustique</p> <p>Espace bureautique</p>
<b>Isolation Phonique &amp; Correction Acoustique</b>	- Hall d'Accueil, - Salle d'Attente Malades, - Salle de Repos Médecins, - Espaces Bureautiques.	<p>Bruit impact</p> <p>35 dB/45dB avec un Tr &lt;= 2s</p> <p>40dB</p> <p>Porte</p> <p>Ra ≥ 35 dB</p> <p>SALLE D'ATTENTE</p> <p>SALLE DE SOIN</p> <p>Salle d'attente pour les malades</p> <p>≥ 35 dB avec 0.4-0.6 s</p> <p>Salle de repos</p>

--	--

Les matériaux investis dans les projets sont pour la plupart industrialisés ou bien recyclés (c'est-à-dire dans une démarche durable). L'usage de matériaux durables a été assez limité vu la nature du projet avec notamment l'usage d'un sol vinyle pour des raisons d'hygiène. Le TABLEAU 2 résume les exemples de matériaux utilisés pour les quatre parois : sol, plafond, murs. 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 concerne les six parois de l'espace. Le mobilier installé dans un espace ayant un impact non considérable sur la réverbération dans l'espace, ce dernier a été largement étudié par les étudiants. Un mobilier constitué d'éléments absorbants a donc été le plus choisi.

TABLEAU 2  
MATERIAUX CHOISIS POUR LA CORRECTION ACOUSTIQUE ET L'ISOLATION PHONIQUE SELON LA PAROI, SOURCE : AUTEURE

Plafond		Sol - Dalle	
Correction acoustique	Isolation phonique	Correction acoustique	Isolation phonique
Panneaux absorbants en laine minérale	-	Linoléum	Sous-couche acoustique en caoutchouc dense recyclé (20dB)
Plafonnier absorbant en PET recyclé	-		Vinyle ou PVC acoustique antistatique
Panneaux acoustiques Eco-fibre recyclé	-	Carrelage bois et sous-couche en liège	Sous-couche en liège naturel haute densité (18dB)
Mousses acoustiques	-		Chanvre
Murs			
Correction acoustique	Isolation phonique	Correction acoustique	Isolation phonique
Paroi en plâtre recyclé	Laine de roche	Rideaux	-
Bardage en PVC effet bois	Chanvre		Revêtement antimicrobien acoustique
	Double et triple vitrage	Fauteuils acoustiques rembourrés	-
	Portes acoustiques		-

Selon la réglementation, la salle d'attente des malades (Zone B d'examens et de soin) doit avoir un  $Tr \geq 1,2(s)$  et un niveau sonore  $N \geq 47dB$ . La Figure 9 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.

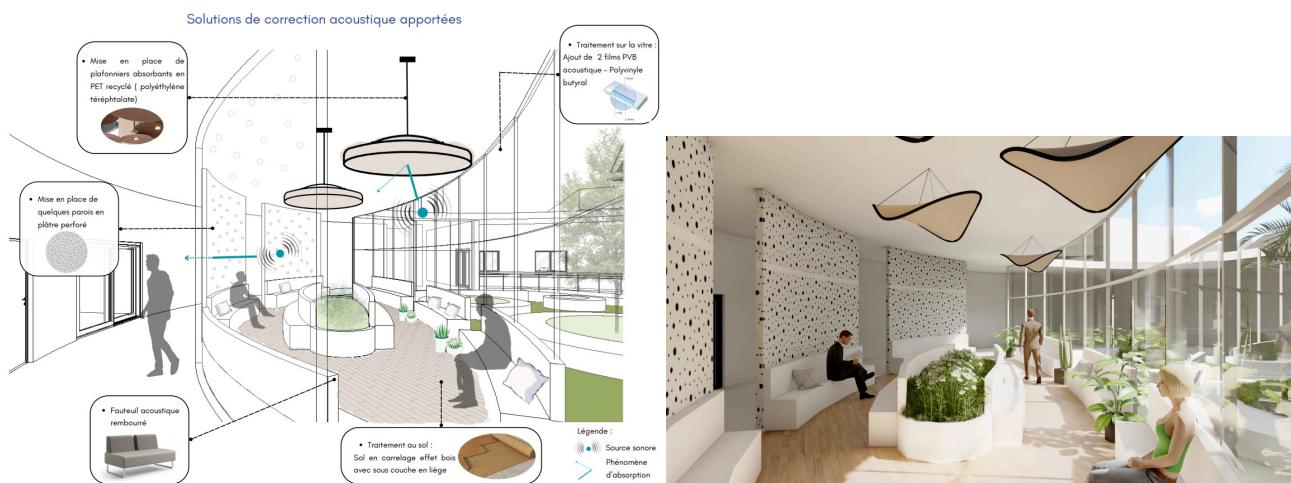
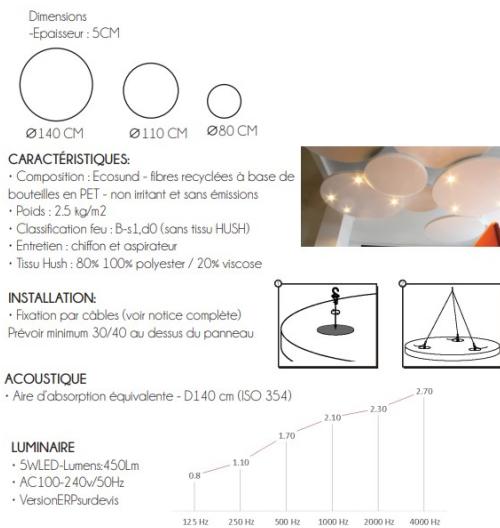


Figure 9 : Exemple de choix architecturaux pour la salle d'attente des malades admis à l'intérieur du service (à gauche, une schématisation avec le choix des matériaux, à droite, l'image de synthèse correspondante), source : extrait des travaux des étudiants

Une deuxième exemple de sous-espace développé est la zone de concentration appartenant à la zone (H) d'observation (Figure 10). Il propose des zones acoustiques calmes où les usagers peuvent s'asseoir individuellement ou en petits groupes. Cet espace, nécessitant une isolation phonique et une correction acoustique, est de forme rectangulaire avec une hauteur sous-plafond réduite 1.80m maximum. La solution acoustique propose d'utiliser un vitrage performant, du triple vitrage et un sol en parquet avec sous-couche acoustiques. Des panneaux acoustiques intégrant de la lumière artificielle tamisée ont été accrochés au plafond pour réduire le niveau sonore.



Double ou Triple Vitrage avec Intercalaires Acoustiques

Description : Incorporation de deux ou trois couches de verre séparées par des lames d'air ou de gaz (argon ou krypton), parfois associées à un intercalaire acoustique.

Avantages :

Réduction des bruits aériens (comme la voix ou les bruits de circulation).

Figure 10 : Exemple de choix architecturaux pour l'espace de concentration (Zone (H) d'observation) nécessitant une isolation phonique et une correction acoustique (à gauche, les caractéristiques du dispositif d'absorption sonore, à droite, l'image de synthèse de l'espace), source : extrait des travaux des étudiants

## VII. CONCLUSIONS

Au même titre que la thermique et l'ensoleillement, l'acoustique se présente comme une composante importante dans la recherche du confort de l'usager et dans l'approche durable du bâtiment. Suivant la démarche investie dans cette expérimentation, la conception sonore des sous-espaces s'est basé 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.

Cette expérimentation a largement étudié les dimensions spatiales (espace de propagation) et physiques (signal sonore). La dimension humaine s'est résumé à la réglementation acoustique, qui reste un critère relatif au confort acoustique, il est donc quantitatif. La prise en compte des perceptions des usagers, malades, visiteurs ou personnel est à étudier. Le concept d'écologie sonore ou encore la notion d'ambiance sonore qui s'imprègne de la démarche de l'acoustique durable proposent des méthodes et des outils qui seraient très utiles pour un tel travail.

## REMERCIEMENT

Mes remerciements s'adressent aux étudiants architectes de la quatrième année (deuxième année du deuxième cycle) de l'Université Ibn Khaldoun (UIK) de Tunis de l'année universitaire 2024/2025 qui ont participé avec dévouement à cette expérimentation. Leur sérieux et leur investissement ont permis d'atteindre des résultats intéressants et une base pour l'évolution du cadre pédagogique de ce cours. Je tiens à remercier mon collègue monsieur Chédi Gdoura, architecte, BIM-6D Consultant, qui a initié et encadré les étudiants

architectes à l'usage d'Autodesk Forma non seulement pour la dimension sonore mais aussi pour les divers signaux physiques (ensoleillement, microclimat, etc.).

#### REFERENCES

- [1] N. Mossin et al., Un guide d'architecture : Pour les 17 Objectifs de Développement Durable de l'ONU Volume 2A. 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](http://www.autodesk.com).
- [2] Construire autrement : vers une construction plus durable en Tunisie, Interview avec Lotfi Rejeb, dans La construction durable en Tunisie : une responsabilité collective, Revue Archibat n°63, février 2025, pp. 56-57. Disponible sur : [\[Construire autrement : vers une architecture durable et responsable en Tunisie – Archibat\]](#).
- [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] P. Woloszyn, Vers un simulateur des ambiances sonores urbaines : Le modulateur morpho acoustique. Les Annales de la recherche urbaine N°70, 1996, lieux culturels, pp. 158-159.
- [5] P. Woloszyn, Une approche de la géométrie diffuse des ambiances sonores urbaines, Thèse de doctorat, CERMA-Université de Nantes, Nantes, France, 2000.
- [6] J.-F. Augoyard et H. Torgue, A l'écoute de l'environnement : Répertoire des effets sonores, Editions Parenthèse, Marseille, 174 p, 1995.
- [7] Cetur. (1980). Guide des bruits des transports terrestres : prévision des niveaux sonores. Lyon: Ministère des transports.
- [8] J. P. Odion, (1996). Testologie architecturale des effets sonores : prédictibilité de la qualité sonore. Grenoble: Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain CRESSON.
- [9] M. Raimbault, *Simulation des ambiances sonores urbaines : intégration des aspects qualitatifs*, Thèse de doctorat, CERMA-Université de Nantes, Nantes, France, 2002.
- [10] D. Djellali, M. Chadli & C. Semidor (2012). Analyse comparative des paysages sonores dans les centres anciens dans une perspective de développement durable et de cadre de vie. Cas de la "place des martyres" à Alger, Algérie et la "place de la victoire" à bordeaux, France. Sciences et technologie D - N°36, pp. 35-43.
- [11] P. Bar et B. Loyer, Bruit et formes urbaines : propagation du bruit routier dans les tissus, Cetur, Lyon, 1981.
- [12] C. Chtara, "Caractérisation(s) de l'espace sonore de la médina de Tunis au XIX<sup>e</sup>-Début XX<sup>e</sup> s.: formes urbaines, récits de voyage et effets sonores", Thèse de doctorat, Ed. SIA-Université de Carthage, Tunis, Tunisie, Juin 2019.
- [13] M. Chagué. *L'acoustique de l'habitat : principes fondamentaux*, Editions du Moniteur, Paris, 2001.
- [14] 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](#)
- [15] A. Mendez et A. D'Silva, "Turn Every Stone" in Your Conceptual Design Using Autodesk Forma. 2023. The design and make conference.
- [16] Réglementation acoustique française. Disponible : [Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements de santé. - Légifrance](#)