

INÈS DE BORT

LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE EN ACOUSTIQUE



ARCHITECTURE ET PHYSIQUE URBAINE
UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

- 2020 -

UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR
CHAIRE ARCHITECTURE ET PHYSIQUE URBAINE

LA RÉPONSE IMPULSIONNELLE EN ACOUSTIQUE

ÉTUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE D'UNE GÉOMÉTRIE SIMPLE

INÈS DE BORT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES 2020
INSTITUT SUPÉRIEUR AQUITAIN DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
FILIERE HABITAT ET ÉNERGIE

ENCADRÉ PAR BENOIT BECKERS ET ELENA GARCIA-NEVADO

Table des matières

Introduction	3
1. Objectifs du travail	4
2. État de l'art	5
2.1. Grandeurs physiques utilisées en acoustique.....	5
2.1.1. Caractéristiques du son	5
2.1.2. Paramètres acoustiques courants.....	9
2.2. La mesure acoustique	12
2.2.1. Les outils et leur évolution	12
2.2.2. Utilisation de la mesure en acoustique du bâtiment et bruits calibrés.....	13
2.2.3. La réponse impulsionnelle.....	15
2.3. La simulation acoustique.....	17
2.3.1. Généralités	17
2.3.2. Outils de calculs et logiciels courants	18
3. Ressources employées	20
3.1. Modèle géométrique et hypothèses.....	20
3.2. Procédure MATLAB du calcul de la réflexion spéculaire par la méthode des images	21
3.3. Réalisation d'une réponse impulsionnelle et traitement des résultats.....	22
4. Résultats	24
4.1. Réponses impulsionnelles.....	24
4.1.1. Validation des mesures.....	24
4.1.2. Paramètres acoustiques mesurés.....	26
4.2. Simulations et comparaisons avec la mesure.....	28
4.2.1. Similitudes des pics de la réponse impulsionnelle	28
4.2.2. Influence du nombre de réflexions simulés sur les paramètres acoustiques.....	29
4.3. Influence de la disposition d'une surface absorbante.....	30
4.4. Conclusion des résultats.....	33
Conclusion et perspectives.....	34
Bibliographie.....	35
Annexes	37
1. Informations relatives à la campagne de mesure de réponses impulsionnelles.....	37
2. Courbes obtenues sur les Ballons 1, 2, 3, 4 – Densité spectrale	38
3. Code MATLAB dessin du hangar étudié.....	39
4. Code MATLAB <i>proprio.m</i> modifié	40
5. Code MATLAB pour le calcul des longueurs de chaque rayon.....	42
6. Code MATLAB pour la prise en compte des coefficients d'absorption α	42
7. Code MATLAB pour la reconstitution des courbes et le calcul des paramètres.	43

Introduction

Pourrions-nous imaginer vivre dans un monde silencieux ? Le son est une onde mécanique qui se propage par vibration des molécules du milieu dans lequel il évolue et se manifeste incessamment autour de nous. Il est difficile d'imaginer le silence parfait régnant sur la Lune. Bien qu'incessant, le bruit sur Terre n'est pas le même dans les villes assourdissantes que dans les calmes campagnes. Quel contraste pour nos oreilles entre les éclats de voix des marchands sur le carreau des Halles à Bayonne, les chants des oiseaux dans la forêt Guyanaise, et le silence grave des déserts où plus aucune forme de vie ne s'aventure. Le son qui nous entoure est tantôt joyeux, tantôt grave, parfois terrible. Le bruit que l'Homme génère chaque jour, par son industrie, ses déplacements routiers ou aériens, forment une harmonie bien moins agréable à ses deux oreilles.

En architecture, l'acoustique, c'est-à-dire la science du son, n'est vraiment travaillée que dans les espaces dédiés à son expression la plus noble : la musique. La création de salles de concert relève majoritairement de tentatives, parfois infructueuses par manque d'outils de simulation fiable tant sa maîtrise est complexe. En France, la réglementation acoustique aborde principalement le problème de l'isolation, c'est-à-dire la protection des locaux contre le bruit : le bruit de voisinage, le bruit des chocs, le bruit des équipements ou le bruit extérieur. À l'échelle urbaine, les notions de pollution sonore et de nuisances liées aux trafics routiers et aériens sont au cœur de toutes les démarches entreprises. Depuis 2002, sous la directive de l'Europe, la France a mis en place les Cartes Stratégiques de Bruit (CSB) ainsi que les Plans de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE) pour toutes les villes fortement peuplées. Aujourd'hui, les solutions proposées par ces démarches s'articulent principalement autour de la réduction du bruit à la source, par l'amélioration technologique des moteurs par exemple, ou la mise en place de dispositifs de protection contre le bruit tels que les murs anti-sons qui bordent les autoroutes.

Pourtant, l'acoustique nous montre rapidement le lien entre la géométrie et la propagation du son. À l'instar de la lumière, le calcul des rayons sonores peut, sous certaines hypothèses, permettre d'appréhender une scène ou un environnement. Si les outils de calculs employés dans le bâtiment sont peu adaptés à l'échelle de la ville (Picaut, 2007), il apparaît nécessaire d'enrichir les méthodes avec des éléments différents. Dans les travaux sur le rayonnement ondes courtes et ondes longues menés par la Chaire d'Architecture et de Physique Urbaine, la démarche employée consiste à utiliser la mesure comme outils de vérification et d'amélioration des simulations faites à l'échelle urbaine. Nous entendons engager par ce rapport un premier pas dans cette optique, en abordant une géométrie simple d'un local, par la mesure d'une réponse impulsionnelle et sa reconstitution sur ordinateur à partir du calcul spéculaire par la méthode des images.

1. Objectifs du travail

Par les expérimentations et les petits outils de programmation mis en place dans le cadre de l'analyse d'un local simple, nous souhaitons procéder méthodiquement à la prise en main d'une chaîne de mesures, de l'acquisition de données jusqu'à l'analyse du signal, tout en associant des résultats de calculs géométriques sur ordinateur.

L'objectif consiste à constater un premier lien entre la mesure et la simulation. Pour ce faire, nous avons travaillé sur la base de paramètres acoustiques courants tels que le temps de réverbération et la clarté, en essayant de comparer les valeurs en mesure et en simulation. L'ensemble s'articule autour de la réalisation d'une réponse impulsionnelle.

Enfin, nous essaierons : de dégager de ce travail les principales contraintes ou difficultés rencontrées pour les intégrer au mieux dans les prochains travaux, et d'envisager les opérations effectuées dans un local à une échelle plus urbaine.

2. État de l'art

2.1. Grandeurs physiques utilisées en acoustique

2.1.1. Caractéristiques du son

Le son est une onde mécanique, générée dans la plupart des cas, par la vibration d'un objet tel que les cordes vocales humaines. Une onde sonore résulte d'une variation alternative de pression, positivement et négativement autour de la pression atmosphérique. Dans l'air, la propagation de l'onde suit un axe longitudinal (Barron, 1993). L'amplitude de la fluctuation détermine ce que l'on appelle l'amplitude de l'onde. Selon la composition chimique du milieu de propagation et la température, la célérité, c'est-à-dire la vitesse de l'onde varie. Dans l'air à 20°C, la valeur communément retenue s'élève à $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, contre $300\,000\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour les ondes lumineuses. C'est la raison pour laquelle l'éclair d'un orage déferlant à plusieurs kilomètres de distance précède le grondement du tonnerre. Enfin, la fréquence désigne le nombre d'oscillations générées par l'onde sonore sur une seconde et s'exprime en Hertz (Hz).

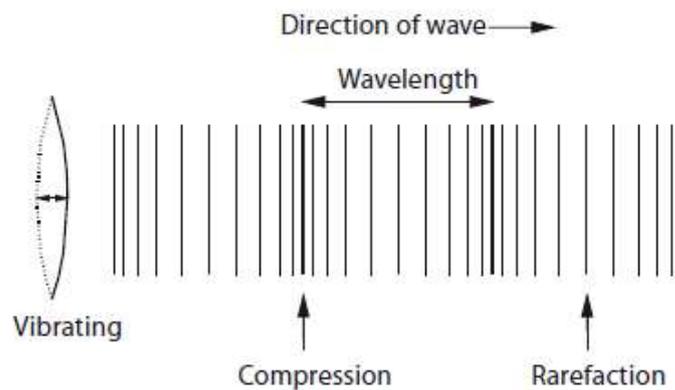


Figure 1 : Onde sonore simple avec zones de compression et de détente (Barron, 1993).

Le son est à l'oreille ce que la lumière est à l'œil, sa perception a des limites. Tout comme nous ne sommes pas capables de voir dans les domaines des ultra-violets ou des infra-rouges, nous ne pouvons entendre les sons de fréquences inférieures à 20 Hz et supérieures à 20 000 Hz, ce qui ne représente pas moins de onze octaves. En bâtiment, les études se limitent aux bandes de fréquences comprises entre 100 et 5000 Hz (Beckers, 1992). L'intervalle audible, variable selon les personnes, a tendance à se réduire dans les hautes fréquences avec l'âge ou suite à de récurrentes expositions intenses au bruit (Templeton, 1987). Des études physiologiques (Figure 2) ont aussi révélé que l'oreille humaine perçoit les intensités selon des proportions particulières telles qu'une progression géométrique de la stimulation entraîne une progression arithmétique de la perception (Beckers, 2014). La fonction logarithmique, du grec $\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$ « rapport » et $\acute{\alpha}\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma$ « nombre », introduite par John Napier (1550-1617) en 1614, permet d'opérer cette transformation et se retrouve dans celles du niveau sonore qui s'exprime en décibels.

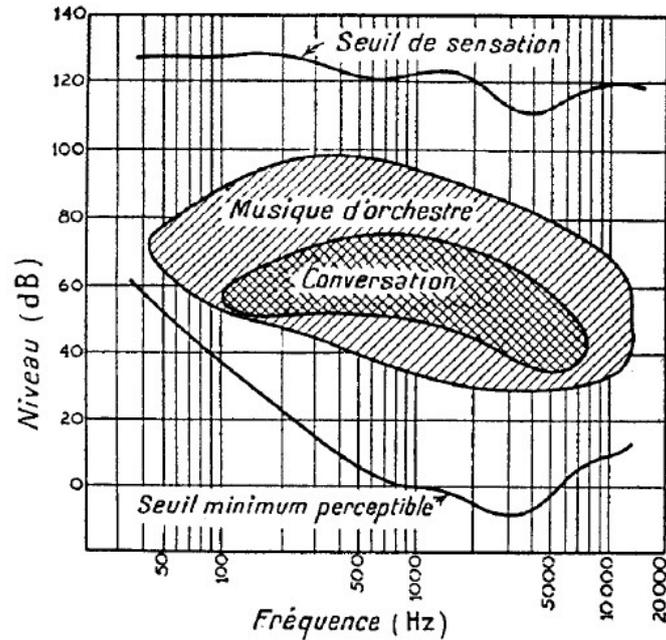


Figure 2 : Délimitation des domaines de l'audition par la courbe complétée de Wegel (Beckers, 1992).

L'énergie acoustique peut être exprimée comme une puissance (W , exprimée en watt), une intensité (I , exprimée en Joule par mètre carré) ou par le carré de la pression efficace (P_{eff} exprimée en pascal). De ces deux dernières expressions est communément admise la Formule 1 pour les ondes progressives (Beckers, 2013).

$$I \approx \frac{p_{eff}^2}{400} \quad (1)$$

À la fréquence de 1000 Hz, les limites de perception (Figure 2) correspondent à des pressions efficaces de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (noté p_0 , seuil minimum perceptible) et 20 Pa (seuil de douleur). Ces deux valeurs en pression servent de référence pour définir les limites du niveau sonore en pression L_p (Formule 2), respectivement à 0 dB et 120 dB.

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \quad (2)$$

Par les Formules 1 et 2, on peut exprimer le niveau sonore en intensité L_i (Formule 3) dont l'intensité de référence vaut $I_0 = 10^{-12} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

Une source sonore étant caractérisée par sa puissance, on utilisera l'expression du niveau sonore en puissance L_W (Formule 4), la référence en puissance vaut $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (4)$$

Ces expressions montrent rapidement que doubler l'intensité sonore revient à augmenter le niveau sonore de 3 dB. L'oreille humaine « raccourcit » en quelque sorte les écarts d'intensité : prenons l'exemple d'un vitrage simple dont le facteur de réduction est de 30 dB, c'est-à-dire qu'un bruit extérieur courant de 90 dB serait perçu à 60 dB à l'intérieur. Bien que l'énergie sonore soit divisée par 1000, un niveau sonore de 60 dB à l'intérieur d'une chambre peut empêcher l'endormissement.

L'intensité d'un même son, perçu par l'oreille à des distances différentes, décroît en raison du carré de la distance. Les ondes sonores, se propageant sphériquement autour du centre d'ébranlement (Figure 3) et mettent en mouvement des couches sphériques successives du milieu de propagation. L'intensité sonore I , répartie sur ces surfaces successives (Figure 4), décroît en raison du carré de l'augmentation de la distance à leur centre (Formule 5). Des Formules 3, 4 et 5 se retrouve rapidement l'expression courante du niveau sonore en intensité (Formule 6).

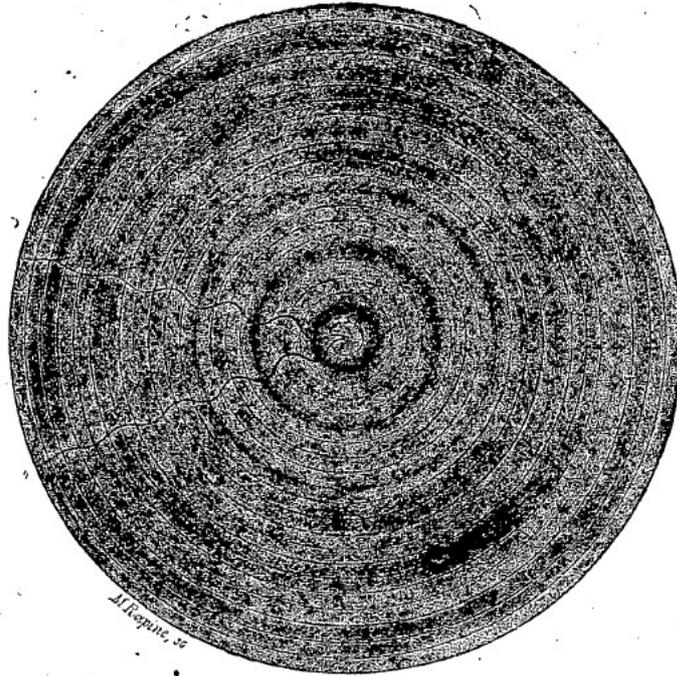
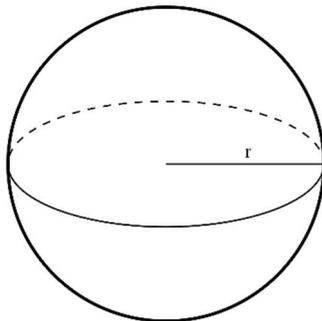


Figure 3 : Propagation sphérique d'une onde sonore dans un milieu indéfini (Guillemin, 1882).



$$S = 4 \pi r^2$$

Figure 4 : Surface d'une sphère de rayon r .

$$I = \frac{W}{4 \pi r^2} \quad (5)$$

Démonstration :

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$L_i = 10 \log \left(\frac{W}{4 \pi r^2} \frac{1}{10^{-12}} \right)$$

$$L_i = 10 \log \left(\frac{W}{10^{-12}} \right) - 10 \log(4 \pi r^2)$$

$$L_i = L_W - 10 \log(4 \pi) - 10 \log(r^2)$$

Arrondi à l'unité du deuxième terme :

$$L_I = L_W - 11 - 20 \log(r) \quad (6)$$

Pour décrire l'émission, on utilise le niveau sonore en puissance (L_W), et pour la propagation et la perception du son, le niveau sonore en intensité (L_I) ou en pression (L_p). Si le décibel est l'unité de base en acoustique, on retrouve souvent dans le bâtiment l'emploi du décibel A, noté dB(A). Ce dernier correspond à l'application d'un filtre, appelé filtre A, prenant en compte le comportement de l'oreille humaine soumis à des niveaux sonores inférieurs à 55 dB. Il existe d'autres filtres, comme le C adapté aux niveaux sonores plus élevés (Figure 5).

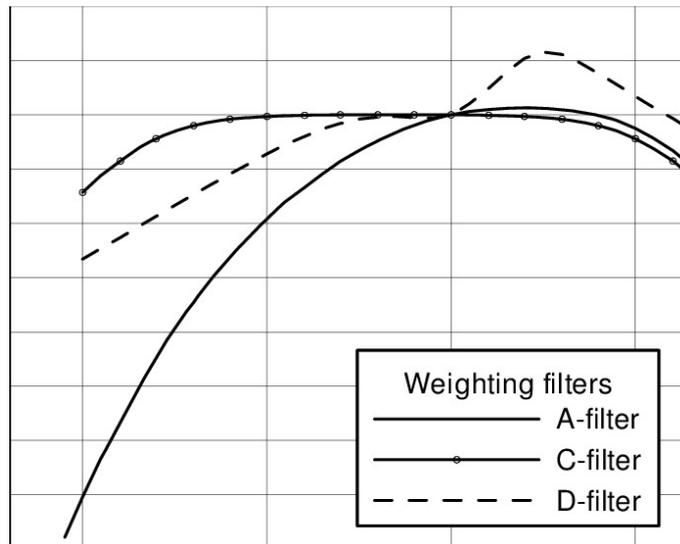


Figure 5 : Courbe des filtres de pondération acoustique A, C et D (Jacobsen, 2011).

Nous venons de lister les différentes caractéristiques d'un son : sa fréquence, sa vitesse, son mode de propagation ainsi que son niveau. Pourtant un même son produit dans une cathédrale et dans un intérieur très molletonné ne sera pas perçu de la même manière. En architecture, le son se rapporte nécessaire à l'environnement dans lequel il se propage, c'est-à-dire à sa géométrie et ses matériaux. Des paramètres ont été mis en place pour qualifier la relation entre le son et l'enceinte qui l'accueille.

2.1.2. Paramètres acoustiques courants

Distinguons d'une part l'énergie sonore « directe » reçue en un point (un auditeur) et l'énergie sonore issues des multiples réflexions que le son a subi au contact des parois ou des obstacles présents dans la pièce. Si l'énergie réfléchié parvient à l'auditeur très rapidement après l'énergie directe, un discours ou une musique paraîtra claire et distincte. En revanche, si l'énergie réfléchié arrive avec beaucoup de retard, l'auditeur percevra des échos qui augmentent la réverbération, et réduisent la compréhension. Les paramètres mis en place se présentent sous la forme de rapport entre énergies précoces et tardives. Parmi eux on retrouve les suivants :

- **La clarté, notée C_{80} et exprimée en décibel**, se définit comme le rapport entre l'énergie intégrée sur les quatre-vingt premières millisecondes E_0^{80} et l'énergie totale qui s'en suit E_{80}^{∞} faisant suite à une impulsion (Figure 6 et Formule 7). Sa définition signifie que plus l'énergie est précoce, plus la clarté est élevée. Des valeurs négatives de clarté peuvent survenir dans le cas où l'énergie après 80 ms est supérieure à l'énergie initiale. L'intervalle des valeurs possibles de clarté s'étend de -10 à 20 dB (DIRAC, 2020) et se resserre autour de -2 et 2 dB pour une écoute confortable de la musique (Barron, 1993). Le seuil de quatre-vingt premières millisecondes (80 ms) correspond à une valeur de temps adaptée à l'écoute de la musique, on retrouve aussi le calcul du C_{50} , plus adaptée à l'écoute du discours. L'échelle de son évaluation proposée par L. Gerald Marshall en 1995 (Figure 7) a été utilisée à de multiple reprises sans toutefois faire l'objet d'une étude spécifique pour sa validation (Marshall, 1995).

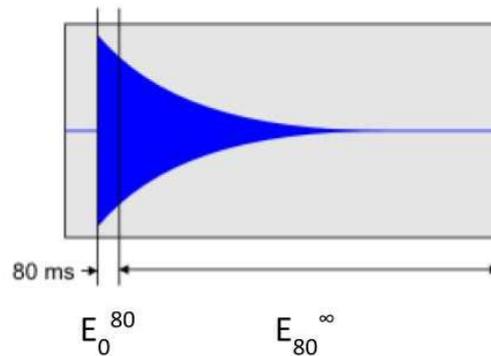


Figure 6 : Récupération des données sur l'échogramme pour le calcul du C_{80} (DIRAC, 2020).

$$C_{80} = 10 \log \frac{E_0^{80}}{E_{80}^{\infty}} \quad (7)$$



Figure 7 : Échelle subjective pour l'évaluation de la clarté du discours C_{50} (Marshall, 1995).

- Le temps de réverbération, noté T_R et exprimé en seconde**, correspond au temps nécessaire pour que, suite à l'interruption de la source sonore, le son diminue de 60 dB. En pratique, il est difficile de mesurer une décroissance de 60 dB à cause du bruit environnant. On utilise donc des temps de réverbérations extrapolés à partir d'écart intermédiaires (10, 20, 30 dB), notés T_{10} , T_{20} et T_{30} , dont les valeurs sont obtenues à partir de la section de la courbe de décroissance située respectivement entre 5 dB et 15, 25 et 35 dB en dessous du niveau initial (Figure 8). Un calcul issu de travaux en statistique a été proposé par Wallace Clément Sabine (1868-1919) en 1898 à partir du volume V du local (en m^3), de la surface totale des parois S (en m^2), et de la moyenne de leur coefficient d'absorption α (Formule 8). Si cette formule se retrouve souvent dans la littérature, son résultat néglige les effets d'interférences et diffraction, et ne tient pas compte de la géométrie du local, ni de la disposition des surfaces absorbantes. Cette expression reste cependant couramment utilisée, faute de formule à la fois plus simple et plus proche des valeurs exactes. Les temps de réverbération T_{10} s'étendent de 0,005 à 10 secondes et celles de T_{20} et T_{30} de 0,1 à 10 secondes.

$$T_R = 0.161 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \quad (8)$$

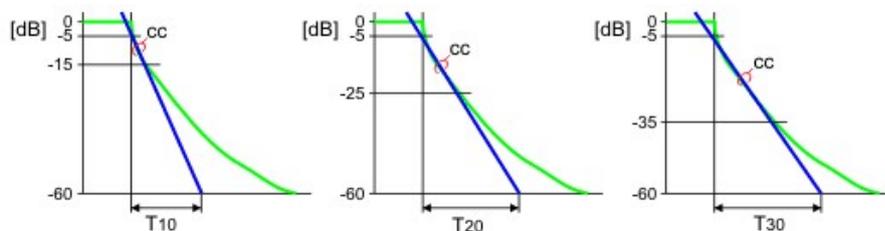


Figure 8 : Calcul de T_{10} , T_{20} et T_{30} sur la courbe de décroissance logarithmique (DIRAC, 2020).

- Le temps de première décroissance, noté EDT (« Early Decay Time ») et exprimé en secondes**, est un indicateur considéré comme une mesure fondamentale dans les espaces dédiés à la musique (Barron, 2009). Il intervient aussi dans la mesure du phénomène de réverbération, mais s'utilise plus fréquemment que le T_R car il s'identifie mieux à la perception (Beckers, 1992). Sa valeur est obtenue à partir de la section de la courbe de décroissance située entre 0 dB et -10 dB en dessous du niveau initial (Figure 9). À partir de la pente correspondante, l'EDT est calculé comme le temps nécessaire pour atteindre une décroissance de 60 dB. Ce paramètre est d'avantage lié à la partie initiale du signal que le T_R , il donne ainsi plus d'information sur l'intelligibilité du son étudié. La plupart des valeurs pratiques de l'EDT se situent entre 0,05 et 5 secondes (DIRAC, 2020).

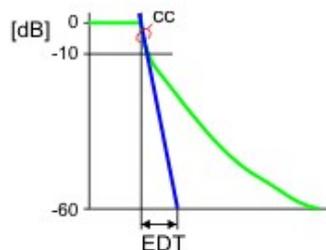


Figure 9 : Mesure de la valeur de l'EDT sur la courbe de décroissance logarithmique (DIRAC, 2020).

La clarté et la réverbération sont toutes deux associées à la notion de retard d'énergie, mais il n'existe pas de relation explicite entre leurs expressions. Elles sont souvent, toutes deux, calculées dans les projets. Il y a d'autres paramètres, non détaillés ici, employés en acoustique pour la prise en compte de spécificités du son, comme la spatialité, à travers des indicateurs comme le *Lateral Energy Fraction* noté LEF, ou le *Interaural Cross Correlation* noté IACC. Les paramètres acoustiques permettent de synthétiser le comportement d'un local sans pour autant permettre de mieux comprendre l'impact de sa géométrie, ses matériaux, et la répartition fréquentielle sonore. En ce sens, il existe peu de méthodes de validation et d'appréciation précise sur les valeurs à atteindre.

Pour mieux comprendre l'influence de l'environnement sur ces paramètres, intéressons-nous à l'interaction entre le son et la matière. Au contact d'un obstacle, une partie du son se réfléchit, une autre passe au travers, et tout le reste est absorbé par l'obstacle (Figure 10). Selon leur nature, les matériaux n'interagissent pas de la même façon avec le son. L'indicateur utilisé pour qualifier la proportion d'énergie qui n'est pas réfléchi par le matériau est le coefficient d'absorption, souvent noté α . Les valeurs de α peuvent varier selon les bandes de fréquences étudiées (Tableau 1).

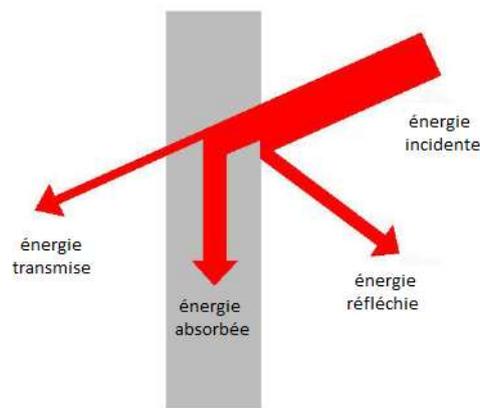


Figure 10 : Interactions du son avec la matière (Beckers, 2013).

Matériaux	Fréquences centrales des bandes d'octave (Hz)					
	125	250	500	1K	2K	4K
Murs en béton fini	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Béton armé	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,05
Tissu de rideau lourd suspendu en plis	0,06	0,16	0,3	0,55	0,65	0,65
Eau d'une piscine ou d'une patinoire	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Personne assise dans une audience	0,33	0,4	0,44	0,45	0,45	0,45
Panneau acoustique absorbant	0,28	0,58	0,96	0,91	0,86	0,81

Tableau 1 : Coefficients d'absorption de différents composants du bâtiment (Templeton, 1987).

2.2. La mesure acoustique

2.2.1. Les outils et leur évolution

L'un des premiers instruments de mesure du son dont fait état Guillemin Amédée (1826-1893) dans le volume dédié au son de la *Petite Encyclopédie Populaire des Sciences et de leurs applications*, de 1882, permettait, par la mesure de la longueur d'une corde et de l'amplitude de ses vibrations, de vérifier les premières lois des vibrations sonores. Le sonomètre (Figure 11), aussi appelé monocorde, se présentait sous la forme d'une caisse en bois destinée à renforcer les sons à la manière du corps d'une guitare. Au-dessus de cette caisse venaient se tendre des cordes, de boyaux ou métalliques, fixées d'une part par des pincettes en fer, et tendues d'autres part par un poids correspondant à la tension appliquée à chacune d'elles. Une règle graduée installée sous les cordes permettait d'évaluer les longueurs des parties vibrantes que l'on pouvait faire varier à l'aide d'un chevalet glissant.

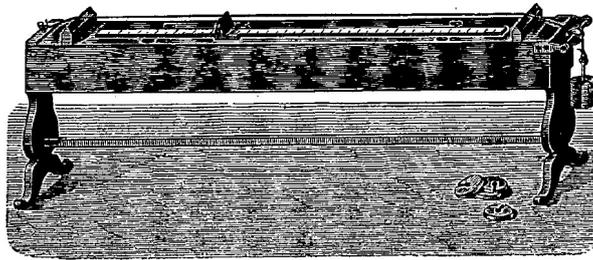


Figure 11 : Sonomètre, aussi appelé monocorde (Guillemin, 1882).

L'instrumentation de mesure acoustique n'a cessé d'évoluer dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle avec la prise en compte de la temporalité des phénomènes sonores. Elle est passée d'une instrumentation dédiée, analogique, électrique et mécanique à une instrumentation multitâche, électronique et plus ergonomique. Cinq générations de sonomètres se succèdent de 1950 aux années 2000, en passant par la création d'un instrument portable dans les années 1960 (Figure 12), l'arrivée du numérique dans les années 1980 et celle des micro-ordinateurs au début du XXI^{ème} siècle (Figure 13). Aujourd'hui, les sonomètres intègrent des capacités de calcul permettant le traitement de l'information sonore, et l'enregistrement des paramètres supplémentaires tels que le son lui-même, les données météo, la position GPS... Ces nouveaux outils s'accompagnent de logiciels de traitement sur ordinateur permettant l'extraction et l'analyse de toutes les données collectées durant la mesure. Les mesures réalisées dans la suite de ce rapport ont été traitées à l'aide du logiciel DIRAC 6.0.



Figure 12 : Premier sonomètre portable 2203 par Brüel & Kjaer en 1960 (Aflalo, 2005).



Figure 13 : Sonomètre micro-ordinateur 2250 par Brüel & Kjaer en 2017 (Brüel & Kjaer, 2017).

Lors d'une mesure acoustique, le son peut être :

- Naturellement présent dans l'environnement, dans le cadre d'une mesure de surveillance du bruit par exemple (voir chapitre 2.2.2).
- Artificiellement généré par un émetteur. Parmi les émetteurs calibrés, on retrouve les sources sonores omnidirectionnelles dodécaédriques, principalement utilisées pour la mesure de l'isolation acoustique et acoustique des salles, et les machines à chocs pour la mesure des bruits dans les solides (voir chapitre 2.2.2).



Figure 14 : Haut-parleur dodécaédrique OmniPower de Type 4292-L par Brüel & Kjær.

2.2.2. Utilisation de la mesure en acoustique du bâtiment et bruits calibrés

Les procédures de mesure acoustique décrites dans les normes ont pour objectif de vérifier la conformité des locaux étudiés avec les valeurs réglementaires fixées sur plusieurs paramètres. Les principales procédures s'articulent autour des thèmes suivants :

- **Isolation entre deux locaux (ISO 16283) :**
 - **Isolation aux bruits aériens :** la procédure consiste à mesurer le niveau sonore dans un local « récepteur » à partir d'un bruit standardisé (rose ou blanc) émis dans un local « source » à l'aide d'une source sonore omnidirectionnelle type dodécaédrique. La valeur obtenue dans le local récepteur est comparée aux valeurs maximum décrite dans les textes réglementaires.
 - **Isolation aux bruits de façade (c'est-à-dire au bruit extérieur) :** la procédure est identique à celle décrite précédemment mis à part que le local « source » correspond à l'extérieur du bâtiment.

- **Isolation au bruit d'impact** : la procédure consiste à mesurer le niveau sonore dans un local « récepteur » à partir d'un bruit de choc standardisé émis dans le local source par une machine à chocs.
- **Surveillance du bruit** : le principe revient à analyser le son produit par un élément existant (tel qu'un industriel, un avion (ISO 20906 :2009), des travaux de construction...) et à vérifier que son impact sonore sur l'environnement respecte les conditions fixées par les réglementations.
- **Temps de réverbération** : la mesure du temps de réverbération est utilisée pour vérifier que sa valeur n'excède pas les valeurs réglementaires notamment dans les espaces de circulation, les bureaux ou les salles de classe. D'un point de vue expérimental, cette mesure permet aussi de déterminer le coefficient d'absorption des matériaux présents dans la scène. La mesure peut être réalisée par une réponse impulsionnelle (voir chapitre 2.2.3)
- **Autres méthodes expérimentales** : il existe aussi des procédures de mesure acoustique adaptées à l'analyse de locaux particuliers, comme les églises qui sont très réverbérantes. Ces travaux s'inscrivent dans la volonté d'adapter les procédures dans le cadre de la rénovation du patrimoine ancien (Martellotta, 2019), sans pour autant apporter de solutions techniques à l'issue de la mesure.

Il existe plusieurs bruits calibrés utilisés dans les procédures de mesures acoustiques. Parmi eux, on retrouve principalement les bruits suivants :

- **Le bruit blanc** qui contient toutes les fréquences audibles et présente une énergie spectrale constante sur l'intégralité de l'échelle des fréquences.

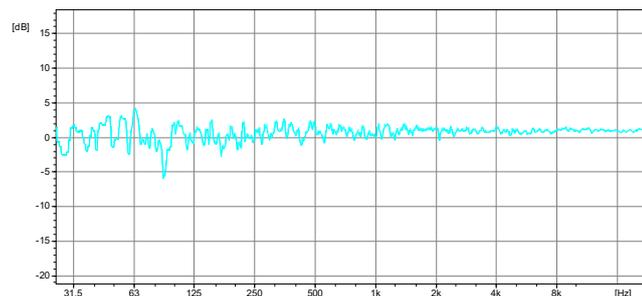


Figure 15 : Densité spectrale d'un bruit blanc généré sur DIRAC 6.0.

- **Le bruit rose** qui contient lui aussi toutes les fréquences audibles mais présente une énergie constante par bande d'octave. C'est-à-dire que la bande d'octave comprise entre 500 et 1000 Hz contient la même énergie que celle qui s'étend de 2000 à 4000 Hz. On considère le bruit rose comme étant plus adapté à la perception humaine que le bruit blanc.

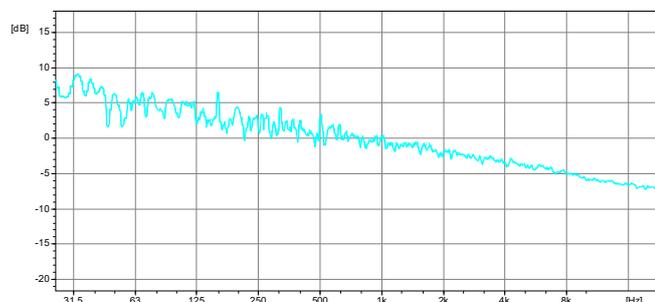


Figure 16 : Densité spectrale d'un bruit rose généré sur DIRAC 6.0.

- **Le bruit de trafic** permet de recréer le bruit produit par la circulation des véhicules routiers et ferroviaires. L'énergie contenue dans chaque bande d'octave est normalisée par rapport à l'énergie contenue dans celle centrée sur 1000 Hz. Il se caractérise par le fait de contenir d'avantage d'énergie dans les basses fréquences, c'est-à-dire les graves.

2.2.3. La réponse impulsionnelle

En acoustique, une réponse impulsionnelle désigne la réponse d'un système (un local par exemple) à une impulsion. Sous l'hypothèse que le système est linéaire et invariant dans le temps (Figure 17), un son $x(t)$ émis dans un local est dit convolué avec la réponse impulsionnelle $h(t)$ pour aboutir à une certaine réponse $y(t)$ (Figure 17). Le produit de convolution entre ces deux fonctions est noté $*$, son expression est décrite en Formule 9. De façon générale, la réponse impulsionnelle permet de comprendre comment l'énergie est répartie dans le temps et sur les différentes fréquences dans un environnement donné, entre deux points. On pourrait également dire que le local agit comme un filtre sur l'excitation. Inversement, la réponse impulsionnelle peut être calculée par déconvolution de la réponse d'un système à une excitation.

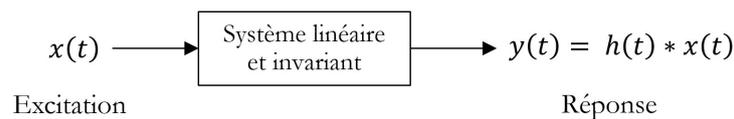


Figure 17 : Représentation générale d'un système linéaire et invariant.

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_0) \times x(t - t_0) dt \quad (9)$$

Pour obtenir la réponse impulsionnelle $h(t)$, l'excitation en entrée du système doit être une impulsion (Figure 18) appelée impulsion de Dirac $\delta(t)$ (Formule 10), car son produit de convolution est neutre (Tahon, 2014). En acoustique, l'impulsion générée doit contenir l'ensemble des fréquences pour caractériser le comportement du local soumis à toutes ces fréquences (Beckers, 1992). Une autre manière de caractériser le système consiste à obtenir sa réponse en fréquence $H(f)$, qui peut être obtenue par la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle (Formule 11) et inversement (Formule 12).

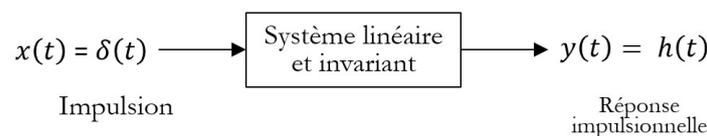


Figure 18 : Réponse impulsionnelle d'un système linéaire et invariant.

$$\text{Impulsion de Dirac :} \quad \delta(t) = \begin{cases} +\infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-i2\pi ft} dt = TF[h(t)] \quad (11)$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{i2\pi ft} df = TF^{-1}[H(f)] \quad (12)$$

Alors que la réponse impulsionnelle $h(t)$ est réelle, la réponse fréquentielle $H(f)$ est une fonction complexe dont la variable f représente la fréquence. Elle contient une partie réelle et une partie imaginaire qui peuvent être représentées par :

- Son module, noté $|H(f)|$, que l'on appelle spectre d'amplitude.
- Son argument, noté $\arg(H(f))$, que l'on appelle spectre de phase du signal.

Dès lors que la réponse impulsionnelle $h(t)$ ou la réponse en fréquence $H(f)$ est connue, il est possible de connaître la réponse $y(t)$ d'un système à n'importe quelle sollicitation. Si c'est $H(f)$ qui est connue, la réponse est donnée par la Formule 13, et si c'est $h(t)$, par la Formule 14 avec $h(t-\tau)$ la réponse à l'instant t à une impulsion appliquée à $t = \tau$, ou $*$ le produit de convolution.

$$y(t) = TF^{-1}[H(f) TF[x(t)]] \quad (13)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau = h(t) * x(t) \quad (14)$$

En acoustique expérimentale, l'impulsion peut être générée par un bruit bref et puissant ou un bruit calibré. L'appareil le plus couramment utilisé comme source sonore calibrée et omnidirectionnelle est le haut-parleur dodécaédrique. Selon la précision que l'on souhaite atteindre, il est possible d'avoir recours à des sources sonores alternatives (Papadakis, 2019). Celles-ci sont principalement impulsives : claquement de mains, éclatement d'un ballon baudruche, tir d'un pistolet... Bien qu'elle permette de décrire très précisément le système étudié, la réponse impulsionnelle ne donne d'information qu'entre deux points : le point source et le point récepteur.

2.3. La simulation acoustique

2.3.1. Généralités

La prévision acoustique est un champ d'étude dont l'objectif consiste à modéliser l'action sonore dans un environnement. Les premières simulations d'acoustique des salles ont été introduites par Schroeder en 1962. Aujourd'hui, les approches théoriques sont multiples mais les approches opérationnelles sont moins nombreuses, en particulier pour le milieu urbain (Picaut, 2006). Ainsi, les outils de simulation sont souvent utilisés pour le calcul de valeurs approchées des paramètres acoustiques courants et apportent peu d'aide à la décision dans la conception architecturale des espaces. Les travaux menés dans les années 1990 sur l'auralisation ont tenté de répondre à ce problème, sans vraiment apporter de solutions concrètes pour les architectes (Kleiner, 1993). De façon générale, on peut classer les outils de simulation acoustique pour l'architecture en trois catégories :

- La première catégorie s'articule autour de méthodes géométriques. Celles-ci ont été les premières, et perdurent encore, à être implémentées dans les logiciels car elles s'adaptent bien à toutes les géométries et donnent rapidement des résultats. On retrouve parmi elles : la méthode des images (présentée et utilisée dans la suite ce rapport), le lancer de rayons, la radiosité, le lancer de particules sonores. La théorie repose sur l'analogie décelée très tôt entre le comportement du son et celui de la lumière. En outre, les lois de la réflexion du son suivent la loi de Descartes : d'une part le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan avec la normale à la surface au point d'incidence, d'autre part l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux entre eux. Ces lois permettent notamment d'observer certains phénomènes acoustiques tels que la focalisation (Figure 19).
- La deuxième s'appuie sur la théorie des champs diffus, parmi lesquelles on retrouve la théorie statistique de la réverbération dont les fondements remontent aux travaux de Wallace Clément Sabine (1868-1919). Ces travaux ont donné lieu à la formule du temps de réverbération (Formule 8). La méthode statistique décompose la densité d'énergie du champ sonore en la somme du champ direct et du champ réverbéré. Proche de la source, le champ direct est prépondérant et se caractérise par une décroissance inversement proportionnelle au carré de la distance à la source. Au-delà de ce qu'on appelle distance critique, le champ réverbéré domine, il est considéré comme quasi-stationnaire et ne varie pas avec la distance à la source (Picaut, 2006).
- La troisième regroupe les approches ondulatoires, basées sur la résolution de l'équation de propagation, dont les méthodes éléments finis. Bien que ces méthodes permettent la prise en compte de géométries complexes, leur champs d'application se limite à l'études des basses fréquences, ou sur des petites géométries comme les habitacles de voitures (Petyt, 1983). Les calculs sont appliqués sur un maillage de l'environnement étudié. En acoustique, ce maillage peut rapidement devenir très lourd si l'on discrétise le volume d'air contenu dans le modèle. À 1000 Hz par exemple, la longueur d'une onde sonore λ est d'environ 30 cm. Le théorème de Shannon préconise que la fréquence d'échantillonnage soit au moins égale au double de la fréquence maximale du signal (Tahon, 2014), c'est-à-dire qu'à 1000 Hz, il faudrait mailler l'air avec des petits cubes de 15 cm de côté. Sachant que l'oreille peut percevoir les sons jusqu'à 20 000 Hz (soit $\lambda = 1,7$ cm), on comprend la difficulté de traiter les hautes fréquences et les grandes géométries avec les méthodes ondulatoires.

Avec le développement récent des capacités de calculs des ordinateurs, les méthodes des éléments finis sont principalement exploitées pour les applications à l'échelle urbaine (Kang, 2006). Ces méthodes peuvent traiter toutes les bandes de fréquences, modéliser les phénomènes ondulatoires, et résoudre les équations dans les milieux hétérogènes, trois problèmes qui peuvent survenir en milieu urbain (Hornikx, 2015). Des applications ont notamment permis d'évaluer l'influence de la géométrie de la rue, des coursives et des éléments de façades sur les niveaux sonores pour les piétons et les résidents juxtaposant une route à faible vitesse (Sanchez, 2015).

Les méthodes géométriques et statistiques restent les méthodes les plus couramment utilisées car elles présentent l'avantage de donner des résultats rapidement et assez précis pour les sons dont les longueurs d'ondes n'excèdent pas la taille des obstacles présents dans la scène. Les méthodes géométriques ont cependant l'avantage de ne pas évacuer la géométrie du problème. L'absence de la représentation des phénomènes ondulatoires représente l'une des principales limites de ces méthodes. Ces dernières années, des travaux ont cependant permis d'inclure le phénomène de diffraction sonore des bords dans le calcul géométrique (Svensson, 2005).

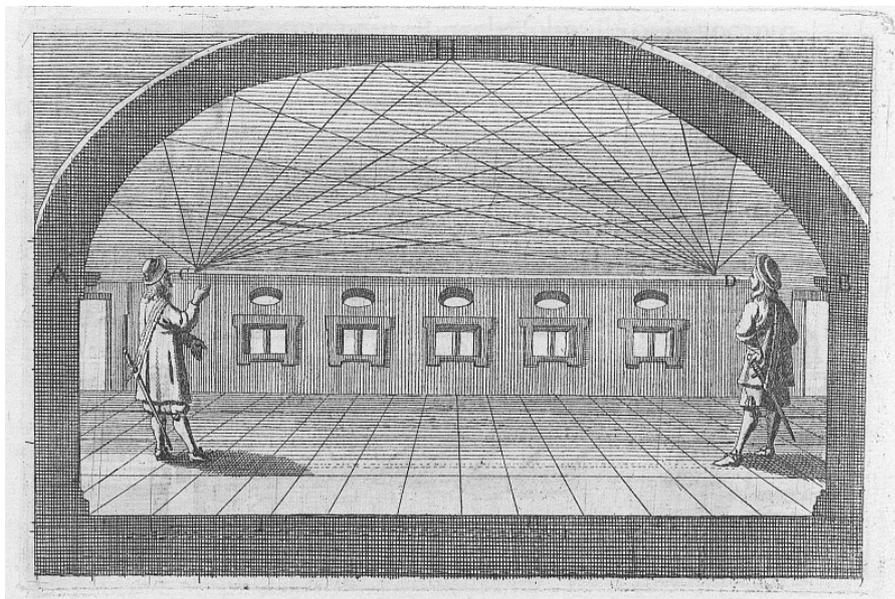


Figure 19 : Focalisation d'une voûte elliptique par Athanasius Kircher, "Phonurgia Nova", 1673 (Concrete Acoustics, 2020).

2.3.2. Outils de calculs et logiciels courants

En pratique, les logiciels d'acoustique associent bien souvent les méthodes géométriques pour le traitement des premières réflexions et les méthodes statistiques pour le calcul de la réverbération. Le Tableau suivant synthétise les outils de simulation acoustique des salles, du bâtiment et environnementale que l'on retrouve principalement dans la littérature.

Outils	Date de création	Développeur(s) initiaux	Utilisation	Méthodes de calcul	Spécificité
AcouBAT	Début des années 2000	CSTB (France)	Conception de l'isolement et du conditionnement acoustique réglementaire	Calculs à partir de la performance acoustique des éléments.	
AcMus	2008	Music Department of the University of São Paulo (Brésil)	Acoustique des salles	Géométriques	Logiciel libre
CadnaA	Inconnue	DataKustik (Allemagne)	Cartes sonores urbaines	Non renseigné	
CATT-Acoustic	1998	CATT (Suède)	Acoustique des salles	Moteur de calcul TUTC (The Universal Cone Tracer)	
Code_TYMPAN	2000	EDF (France)	Acoustique environnementale	Géométriques	Code en Open-Source
I-SIMPA	2011	LCPC puis IFFSTAR (France)	Acoustique architecturale et urbaine	Géométriques Statistiques	Logiciel Open-Source
ITA-Tool Box sur MATLAB	2010	Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University (Allemagne)	Acoustique des salles, traitement des mesures et du signal	Eléments finis pour les milieux extérieurs Méthode des images pour les enceintes convexes	Code des principaux composants en Open-Source
ODEON	1984	Université Technique du Danemark	Acoustique des salles	Géométriques	
RADIT2D	2002	Benoit Beckers et Luc Masset (Espagne)	Acoustique des Salles	Géométriques	Logiciel libre

Il existe aussi des procédures disponibles en ligne et rédigées sur des outils de programmations. Dans la suite de ce rapport on utilise le *Calcul par la méthode des images de la réflexion spéculaire dans des enceintes prismatiques convexes* (Beckers, 2017) écrit sous MATLAB.

3. Ressources employées

3.1. Modèle géométrique et hypothèses

Le local étudié (Figure 20) est un hangar de la Zone Artisanale Ambroise situé à Saint-Martin-de-Seignanx dont les dimensions sont illustrées en Figure 21. Avec une surface au sol d'environ 95m², ce local fait partie d'un complexe de hangars destinés à accueillir des activités industrielles et artisanales.



Figure 20 : Photographie de l'intérieur du local.

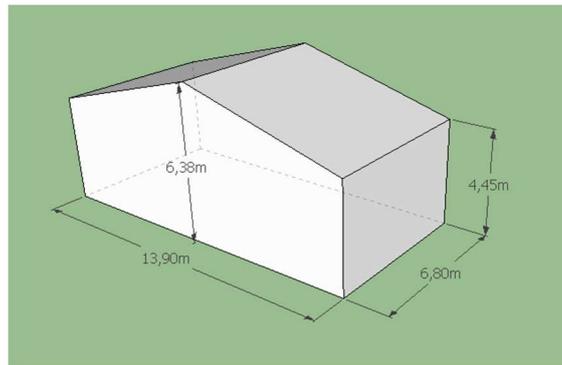


Figure 21 : Dimensions principales de la géométrie sur SKETCHUP.

Les mesures ont été effectuées dans le local vide, fermé, et en dehors des horaires d'activités et de circulation routière de la zone artisanale. L'endroit était très calme pendant toute la durée de la campagne, les mesures ont pu être réalisées dans des conditions favorables. Les dimensions ont été relevées à l'aide d'un télémètre LASER Dexter 30m. L'implantation de la source et du récepteur ont été relevées à l'aide du même instrument. La température n'a pas été relevée mais peut être estimée à environ 20°C.

Le hangar se présente sous la forme d'un polyèdre convexe, compatible avec la procédure MATLAB présentée dans le chapitre suivant. Trois parois verticales sont composées de parpaings peints, la quatrième ainsi que les deux pans de toiture sont en ossature métallique, le sol est en béton lissé. Le local ne présente pas d'obstacle important, et sa surface permet de maintenir des distances suffisantes entre la source, le récepteur et les parois. Dans la simulation, on néglige la présence des luminaires, du petit lavabo et des variations ponctuelles de géométrie, qui n'ont d'impact que sur les hautes fréquences.

3.2. Procédure MATLAB du calcul de la réflexion spéculaire par la méthode des images

Parmi les méthodes de simulation acoustiques présentées au chapitre 2.3, nous proposons d'utiliser un programme de calcul par la méthode des images. Le code choisi est celui décrit dans le document *Calcul par la méthode des images de la réflexion spéculaire dans des enceintes prismatiques convexes* (Beckers, 2017) qui permet de calculer les réflexions d'ordre n entre deux points dans un local en 3D.

Le problème illustré dans la Figure 22 consiste à déterminer le trajet d'un rayon qui part de la source S et se réfléchit de façon spéculaire sur la paroi n°1 avant d'attendre le récepteur R . La première étape consiste à calculer la position de l'image de la source ($I1$) par rapport à la paroi n°1. Ensuite on relie ce point au récepteur pour trouver le point d'intersection entre la paroi et le rayon sonore envoyé. Le trajet final emprunté par le rayon est représenté par les flèches bleu. Géométriquement la distance parcourue peut être obtenue en calculant la distance qui sépare l'image de la source au récepteur. Dans le cadre de deux réflexions, c'est-à-dire si le rayon se réfléchit sur deux parois avant d'atteindre le récepteur, l'image suivante à calculer est l'image de $I1$ par rapport à une autre paroi du local. Le programme utilisé permet de calculer ces réflexions à l'ordre n , en pratique, il n'est pas possible d'excéder huit réflexions à cause de la taille des matrices générées.

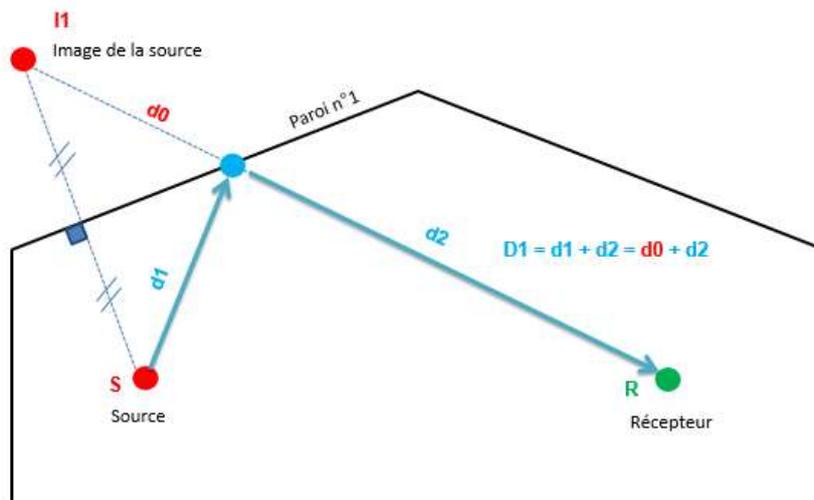


Figure 22 : Création du parcours du rayon depuis la source vers le récepteur avec une réflexion sur la paroi n°1 par la méthode des images.

Ce programme permet de définir la géométrie et l'implantation de la source et du récepteur par rapport aux manipulations faites au cours de la mesure, de calculer et visualiser les réflexions d'ordre n ainsi que les délais d'arrivée de chaque rayon sur le récepteur.

Dans le cadre de ce rapport, les opérations suivantes ont été implémentées :

- Prise en compte du rayon sonore direct entre la source et le récepteur.
- Calcul et visualisation des réflexions jusqu'à l'ordre n , par l'ajout d'une boucle `for` dans la procédure de base *Proprin.m*.
- Calcul des distances parcourues par chaque rayon (Annexe 3).
- Reconstitution d'un échogramme en pression au carré (Annexe 0).
- Calcul des paramètres à partir des courbes : EDT, T_{10} , T_{20} , T_{30} , C_{50} et C_{80} (Annexe 0).

3.3. Réalisation d'une réponse impulsionnelle et traitement des résultats.

Comme nous l'avons présenté au chapitre 2.2.3, la réalisation d'une réponse impulsionnelle consiste à émettre une impulsion en un point source, et à enregistrer le signal reçu en un point récepteur. L'impulsion utilisée lors de la mesure effectuée le 3 août 2020 a été créée par l'éclatement de ballons de baudruche. L'implantation des points source et récepteur ainsi que la description des manipulations effectuées sont en Annexe 1. Le signal a été enregistré à l'aide d'un sonomètre analyseur type 2250 de Brüel & Kjær puis analysé sur le logiciel DIRAC, fourni avec le sonomètre. Tous les ballons ont éclaté au point S, la mesure a été effectuée deux fois en R1 et deux fois en R2 (Figure 23).

Précautions pour la mesure de la durée de réverbération décrites dans le *Guide des mesures acoustiques* (Ministère de l'écologie, 2014) :

- Mesure de la durée de réverbération lorsque le local est inoccupé (maximum deux personnes).
- Mesure pour deux positions de microphone si le local le permet (2 m au moins entre les deux positions).
- Distance entre le microphone et la source supérieure à 1 m.
- Distance entre le microphone et les surfaces réfléchissantes supérieure à 0,5 m.
- Aucune saturation du sonomètre n'est admise.
- Une alternative au signal de bruit interrompu est possible (ballon de baudruche).
- Le port de protections auditives est obligatoire pour tous les opérateurs.

Ces précautions ont été appliquées dans le cadre de la campagne réalisée pour ce rapport.

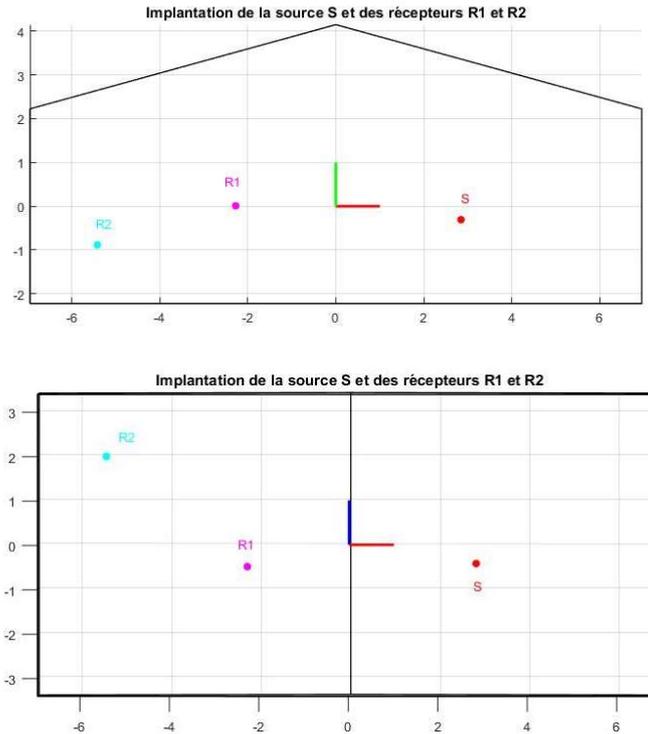


Figure 23 : Implantation de la source S et des récepteurs R1 et R2 (vue transversale en haut et vue en plan en bas).

Pour chaque ballon éclaté, on obtient par ouverture du fichier .wav sur le logiciel DIRAC un échogramme en pression (Figure 24). La courbe prend l'allure d'un sapin et se présente comme une série d'impulsions décroissantes. On identifie un premier pic qui représente le son direct. Les pics suivants sont formés par les premières réflexions, dont l'amplitude décroît à partir de l'excitation. Visuellement, on observe en moyenne que les intervalles entre deux pics tendent ensuite à se réduire jusqu'à former un ensemble continu : c'est la réverbération. L'analyse de l'échogramme dans le logiciel permet d'obtenir les valeurs des paramètres présentés en chapitre 2.1, à savoir : EDT, T_{10} , T_{20} , T_{30} , C_{50} et C_{80} .

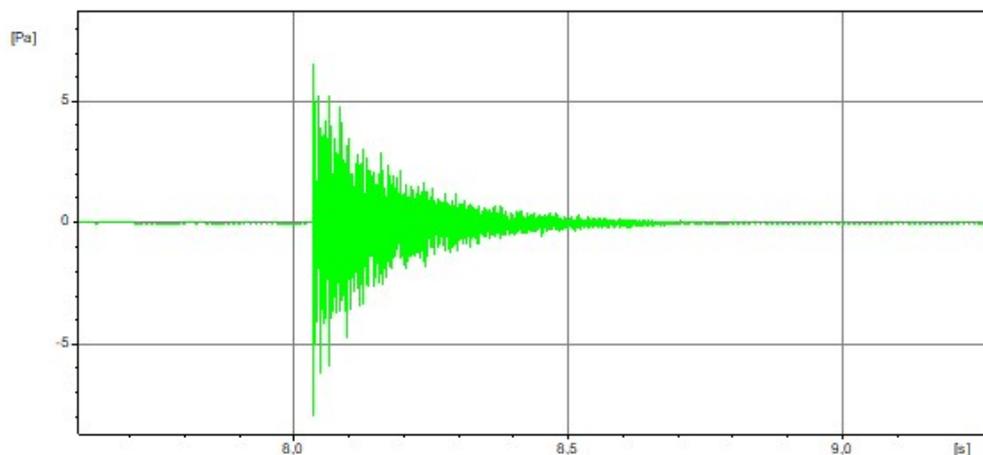


Figure 24 : Échogramme en pression du Ballon1 (récepteur en R1).

4. Résultats

4.1. Réponses impulsionnelles

4.1.1. Validation des mesures

Les résultats analysés dans ce chapitre doivent permettre de qualifier les opérations réalisées lors de la campagne. La campagne de mesure a été réalisée en dehors des horaires d'occupation et de circulations routières dans la zone Artisanale, l'environnement était très calme. Sur la Figure 25, la différence entre le niveau sonore maximal généré par l'éclatement du ballon et le bruit qui le précède atteint presque 60 dB. Cet écart est appelé INR (*Impulse Response to Noise Ratio*), et permet de vérifier la qualité de la mesure (DIRAC, 2020). Selon la norme ISO 3382, l'INR doit être d'au moins 35 dB ou 45 dB pour une détermination précise de T_{20} ou T_{30} respectivement. Avec de bonnes mesures, la plupart des valeurs pratiques de l'INR se situent entre 35 et 60 dB (DIRAC, 2020). Sur les trois intervalles de fréquences (grave, medium, aigus) présentés en Tableau 2, les valeurs d'INR sont satisfaisantes, le ballon de baudruche est une source suffisamment puissante. Dans un environnement plus bruyant comme une ville, l'éclatement d'un ballon pourrait s'avérer insuffisant pour générer un tel écart sonore.

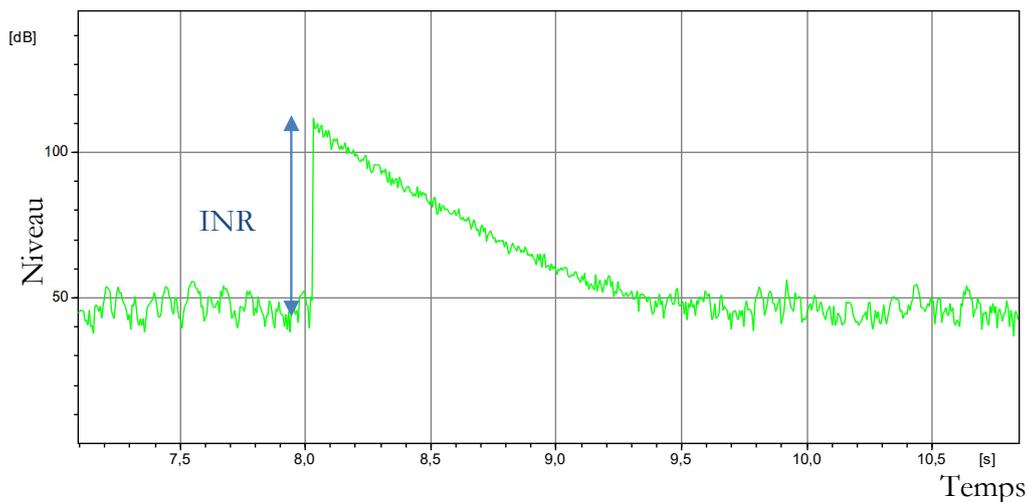


Figure 25 : Réponse logarithmique en énergie du Ballon1 (récepteur en R1).

	250 Hz (Graves)				1000 Hz (Medium)				4000 Hz (Aigus)			
Ballon n°	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
INR [dB]	69	67	61	71	68	70	71	76	73	70	72	76

Tableau 2 : Valeurs de l'INR mesuré sur trois bandes de fréquence centrées sur les valeurs indiquées.

Le bruit du ballon qui éclate n'émet pas la même énergie sur toutes les fréquences comme le fait un bruit rose (Figure 26). Néanmoins, les écarts obtenus par rapport à l'énergie émise à 1000 Hz sont de l'ordre de 10 dB dans les basses fréquences et plus ou moins 5 dB dans les hautes fréquences. À titre de comparaison, la densité spectrale d'un pistolet d'alarme peut présenter une chute de 35 dB pour les bandes centrées autour de 4000 et 8000 Hz (Figure 27). On ne montre ici que la densité spectrale du Ballon 1, les graphiques obtenus sur les autres ballons (Annexe 2) donnent des résultats similaires. Le ballon de baudruche peut être considéré comme une bonne source impulsive sur les fréquences qui nous intéressent.

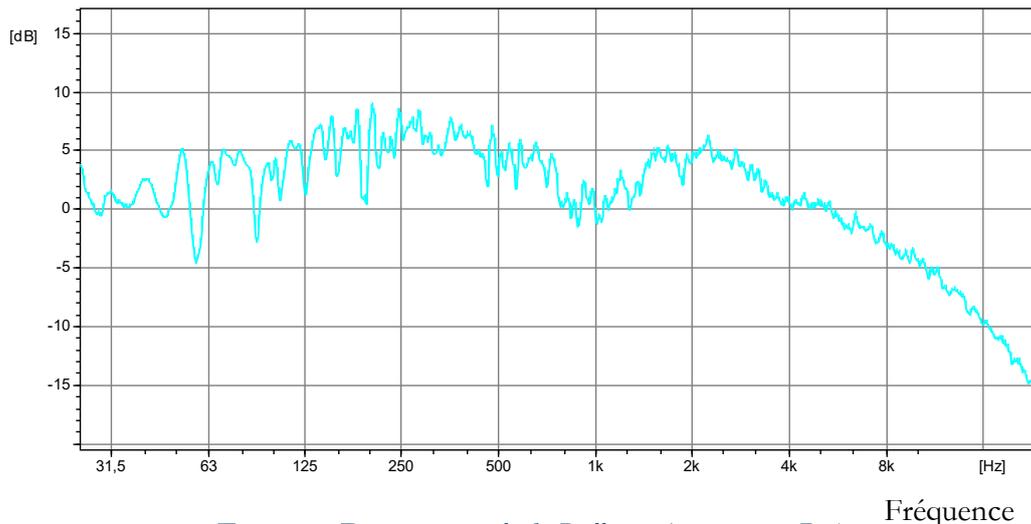


Figure 26: Densité spectrale du Ballon 1 (récepteur en R1).

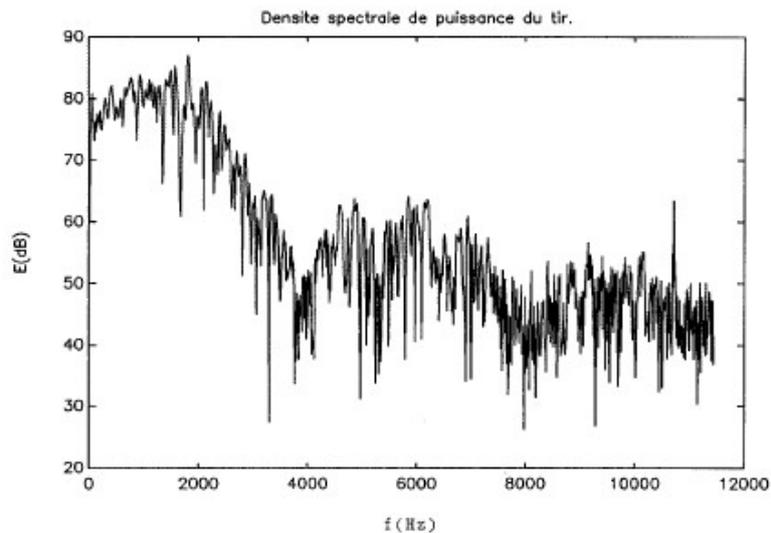


Figure 27 : Densité spectrale d'un tir par pistolet d'alarme (Beckers, 1992).

4.1.2. Paramètres acoustiques mesurés

Le Tableau 3 synthétise les résultats des paramètres obtenus après analyse des signaux enregistrés sur logiciel, pour une fréquence de 1000 Hz. Les valeurs couramment mesurées en bâtiment sont présentées dans le Tableau 4 et utilisé dans la suite de l'analyse.

	Récepteur en R1		Récepteur en R2	
	Ballon n°1	Ballon n°2	Ballon n°3	Ballon n°4
EDT [ms]	1012	890	945	910
T ₁₀ [ms]	1238	1175	1294	1357
T ₂₀ [ms]	1213	1187	1317	1400
T ₃₀ [ms]	1324	1268	1380	1433
C ₅₀ [dB]	4,31	5,23	5,08	4,41
C ₈₀ [dB]	2,06	1,64	2,67	1,75

Tableau 3 : Valeurs obtenu sur logiciel DIRAC sur l'intervalle de fréquence centré à 1000 Hz.

Paramètre	Valeurs courantes (DIRAC, 2020)
EDT [ms]	[50 ; 5000]
T ₁₀ [ms]	[5 ; 10 000]
T ₂₀ [ms]	[100 ; 10 000]
T ₃₀ [ms]	[100 ; 10 000]
C ₅₀ [dB]	[-10 ; 20]
C ₈₀ [dB]	[-10 ; 20]

Tableau 4 : Intervalles des valeurs courantes des paramètres acoustiques (DIRAC, 2020).

L'analyse des données du Tableau 3 permet de dégager les éléments suivants :

- De façon générale, les résultats varient peu entre les mesures effectuées en R1 et en R2. Les points R1 et R2 sont peut-être trop rapprochés (implantation en Figure 23) pour générer des différences significatives dans les résultats.
- Les paramètres de réverbération varient d'environ 60 ms entre deux mesures, ce qui paraît suffisamment représentatif par rapport à l'amplitude des valeurs courantes (Tableau 4). Ces mesures permettent de dire que le temps de réverbération mesuré dans le hangar d'environ

1,2 s. La formule de Sabine (Formule 8) appliquée au hangar avec les hypothèses de calcul présentée en Tableau 5 donne un temps de réverbération de 1,15 s.

Éléments	Surface [m ²]	Matériaux	Coefficient d'absorption α à 1000 Hz	Surface d'absorption équivalente [m ²]
Parois longitudinales	150,46	Parpaings	0,04 ¹	6,02
Pans de toiture	98,08	Laine de verre	0,60 ²	58,85
Paroi transversale	30,26	Parpaings	0,04 ³	1,21
Façade sur extérieur	30,26	Tôle lisse en acier	0,14 ⁴	4,24
Sol	75,23	Béton lisse	0,02 ⁵	1,50
Volume total V [m³]	511,58		Surface totale [m²]	71,82
			TR [s] =	1,15

Tableau 5 : Hypothèses de calcul du temps de réverbération du hangar avec la formule de Sabine.

- Les valeurs d'EDT sont de l'ordre de 0,9 s. À titre indicatif, l'EDT établi pour les salles de concert s'élèvent entre 1,8 et 2,2 secondes (Barron, 1993). On peut ici supposer qu'une pièce musicale jouée dans ce hangar manquerait un peu de résonance mais serait perçue assez distinctement, et ce, sur les deux points mesurés.

Comme le ballon de baudruche n'est pas une source calibrée, il n'est pas possible de connaître directement son niveau sonore lorsqu'il éclate. Pour réaliser le calcul géométrique, il est nécessaire d'avoir sa valeur (L_w). Nous proposons la méthode suivante pour retrouver une valeur approchée, à partir de l'échogramme du Ballon 1 (présenté précédemment en Figure 24) :

- On relève la pression sonore du premier pic correspondant au son direct : $p = 6,573$ Pa.
- Calcul du niveau sonore en pression correspondant (Formule 2) : $L_p = 110,3$ dB.
- Connaissant la distance entre la source et le récepteur R1, $r = 5,127$ m, on déduit le niveau sonore de la source par la Formule 6 : $L_w = 135$ dB.

¹ Fiche B2 Performances acoustiques de divers éléments de construction - CidB ([lien](#))

² Fiche Coefficient d'absorption acoustique (2016)- <http://www.acoustique-materiaux.net/>

³ Fiche B2 Performances acoustiques de divers éléments de construction - CidB ([lien](#))

⁴ Acoustique des locaux industriels – suvaPro (2006)

⁵ Fiche B2 Performances acoustiques de divers éléments de construction - CidB ([lien](#))

4.2. Simulations et comparaisons avec la mesure

4.2.1. Similitudes des pics de la réponse impulsionnelle

Le programme de calcul par la méthode des images permet d'obtenir un premier graphique des pressions au carré des rayons incidents (Figure 28) dont la forme commence à se rapprocher de l'allure des échogrammes mesurés (Figure 29). L'analyse directe entre la simulation et la mesure n'est pas immédiate. Une première observation permet d'identifier six pics qui semblent communs à la simulation et au ballon n°1, repérés de A à F sur la Figure 28 et Figure 29. En considérant le pic A comme référence pour le calcul du retard des autres pics, on peut rassembler les données relevées en simulation et en mesure (Figure 30).

On observe dans un premier temps que les pics mesurés sont en avance sur les pics simulés. Cette différence peut être liée à des erreurs de précision lors de l'implantation des points dans le local : les rayons ne parcourent pas exactement la même distance et arrivent plus tôt. On remarque aussi une différence de pression qui peut être liée à la qualité de la mesure. On ne connaît pas directement le niveau sonore du ballon à son éclatement, ni son mode de propagation, sa valeur est estimée pour le calcul géométrique. Ce problème pourrait être résolu par la réalisation d'une mesure plus précise avec le haut-parleur dodécaédrique dont le signal envoyé est connu.

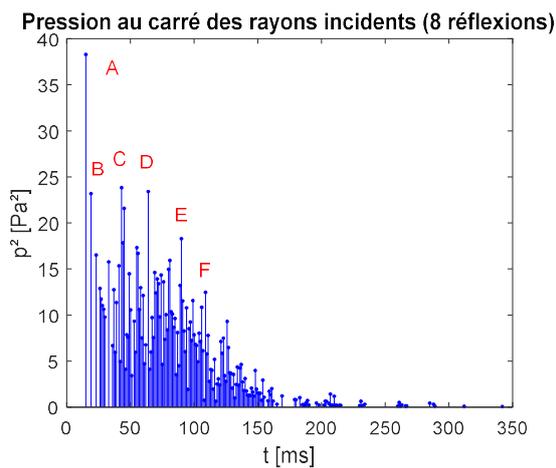


Figure 28 : Pression au carré et délais des rayons incidents pour 8 réflexions calculées sur MATLAB

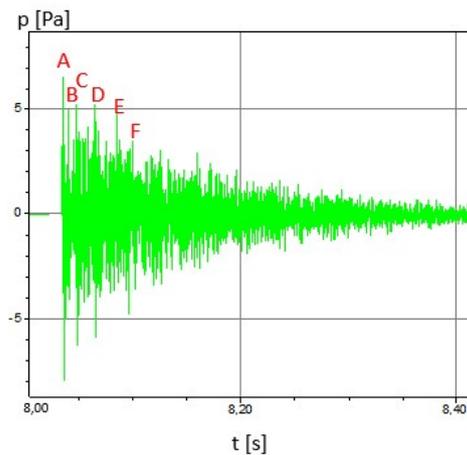


Figure 29 : Échogramme en pression enregistré avec le sonomètre lors de l'éclatement du Ballon 1.

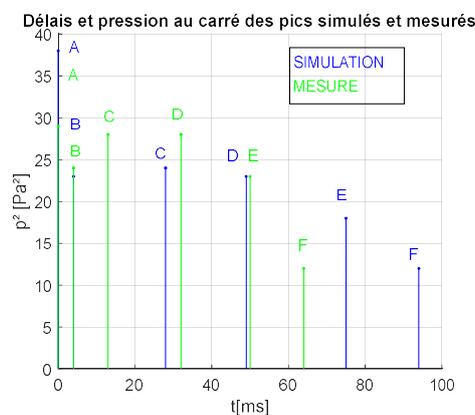


Figure 30 : Comparaison des pics identifiés en mesure (en vert) et en simulation (en bleu).

4.2.2. Influence du nombre de réflexions simulés sur les paramètres acoustiques

La méthode des images ne permet pas de simuler un grand nombre de réflexions à cause du temps de calcul. Dans ce rapport, des simulations ont été lancées jusqu'à la dixième réflexion, ce qui représente environ 30 minutes de calcul par simulation. La Figure 31 montre que les valeurs des paramètres augmentent avec le nombre de réflexions prises en compte, et semblent se stabiliser entre la neuvième et dixième réflexion. L'EDT₁₀ tend vers la valeur mesurée moyenne de 0.95 seconde (Tableau 3), mais les temps de réverbération sont bien inférieurs aux valeurs expérimentales.

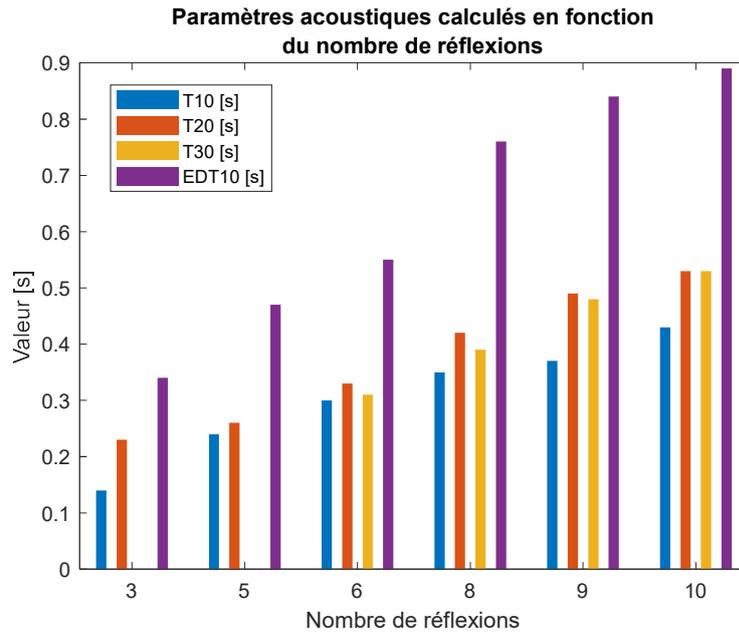


Figure 31 : Valeur des paramètres acoustiques simulés par la méthode des images

4.3. Influence de la disposition d'une surface absorbante

L'objectif consiste à modifier l'implantation d'une même surface de panneaux absorbants selon plusieurs configurations illustrées en Figure 32 et d'évaluer l'impact de leur répartition :

- Configuration 0 : toutes les parois sont en béton.
- Configuration 1 : les deux pans du plafond sont absorbants (98 m^2), les autres parois sont en béton.
- Configuration 2 : une ceinture verticale absorbante de même surface (98 m^2) de 2,36 m de hauteur est placée sur le pourtour du local à 1,20 du sol, les autres parois sont en béton.
- Configuration 3 : le sol et les plinthes (environ 9 cm de haut) sont absorbants de même surface (98 m^2), les autres parois sont en béton.

Dans les résultats, des valeurs indicatives sont données pour une Configuration 4 dans laquelle toutes les parois sont en absorbant.

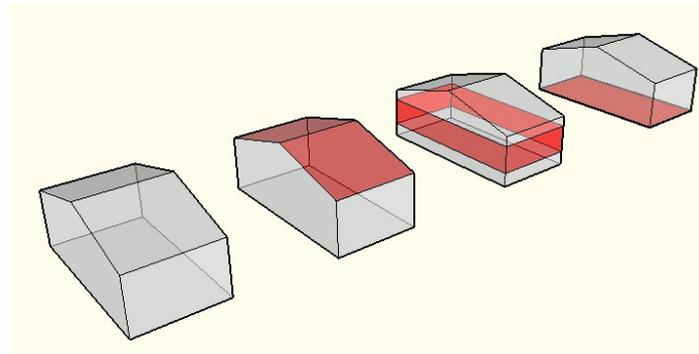


Figure 32 : Configurations simulées de 0 à 3 (de la gauche vers la droite) avec les parois absorbantes en rouge et les parois en béton en gris.

Autres hypothèses de calculs :

- La source sonore vaut 135 dB et se place en R1 (Figure 23).
- Les calculs sont effectués jusqu'à la dixième réflexion, ce qui représente un temps de calcul d'environ 30 minutes par simulation.
- Les surfaces en béton ont un coefficient d'absorption acoustique $\alpha_{\text{béton}}=0,03$ à 1000 Hz.
- Les surface absorbantes ont un coefficient d'absorption $\alpha_{\text{absorbant}} = 0,90$ à 1000 Hz.

La présence de l'absorbant génère une réduction du niveau sonore du local d'environ 1 à 2 dB (Figure 33). La valeur de la réduction change selon l'implantation de la surface absorbante. La diminution est de 1 dB lorsque les plafonds sont absorbants contre 2 dB lorsqu'il s'agit du sol. En pratique, l'installation de matériau aussi absorbant au sol est difficilement envisageable. Dans le cadre de la réduction du niveau sonore du local étudié, la solution de la ceinture périphérique semble, sensiblement, être la plus intéressante.

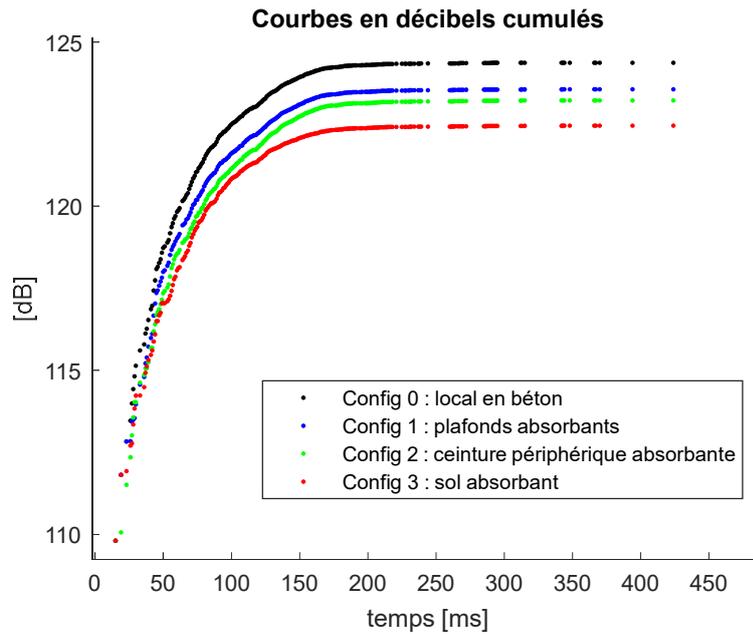


Figure 33 : Comparaison des courbes en décibels cumulés entre les différentes configurations.

La configuration initiale du local en béton présente une clarté d'environ -4 dB (Tableau 6), qui, d'après la Figure 7 est considérée comme mauvaise. Les différentes positions de l'absorbant ont très peu d'impact sur les valeurs de clarté pour la parole C_{50} . Les variations de clarté C_{80} sont aussi assez faibles, de l'ordre de 0,5 dB. Bien que les variations soient faibles, la configuration dont les valeurs de clarté sont les plus favorables correspond à la ceinture périphérique absorbante.

Clarté [dB]	Config 0 : local en béton	Config 1 : plafonds absorbants	Config 2 : ceinture périphérique absorbante	Config 3 : sol absorbant	Config 4 : local en absorbant
C_{50}	-4,26	-4,15	-3,93	-4,57	27
C_{80}	0,15	0,11	0,62	-0,29	35

Tableau 6 : Valeurs de clarté calculées par la méthode des images avec 10 réflexions.

De la même façon, les variations obtenues sur les temps de réverbérations sont très faibles, de l'ordre de 0,03 ms (Tableau 7). Ces résultats semblent surprenants puisque la présence d'absorbant devrait permettre de réduire les temps de réverbération.

Paramètre	Config 0 : local en béton	Config 1 : plafonds absorbants	Config 2 : ceinture périphérique absorbante	Config 3 : sol absorbant	Config 4 : local en absorbant
T_{10} [s]	0.43	0.42	0.44	0.40	0.14
T_{20} [s]	0.53	0.53	0.56	0.52	0.09
T_{30} [s]	0.53	0.52	0.54	0.52	0.13
EDT_{10} [s]	0.89	0.90	0.87	0.91	0.16
EDT_{20} [s]	0.64	0.64	0.64	0.65	0.13
EDT_{30} [s]	0.62	0.63	0.63	0.63	0.12

Tableau 7 : Valeurs des temps de réverbérations par la méthode des images avec 10 réflexions.

Le diagramme de la pression au carré des rayons incidents pour le local en béton (Figure 34) présente les éléments suivants :

- Un premier grand pic correspondant au rayon incident direct, identifié par la lettre A.
- Une succession de six pics principaux au cours des 150 premières millisecondes, identifiés de B à G en Figure 34. Ces pics correspondent aux rayons issus des premières réflexions.

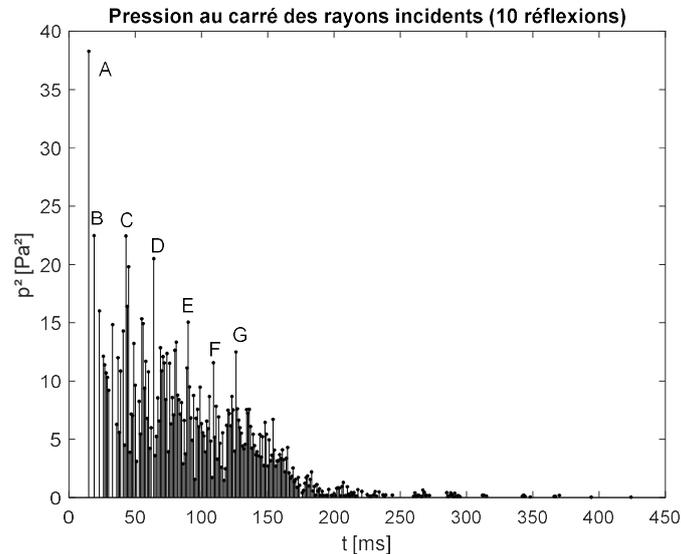


Figure 34 : Pression au carré des rayons incidents dans le local en béton avec identification des pics principaux.

La disposition de l'absorbant modifie l'intensité des pics principaux relevés sur le premier graphique. Cette étude est intéressante car elle permet de retrouver l'origine des rayons sonores : le rayon B semble principalement issu des réflexions sur le sol, alors que les rayons D et F semblent issus des parois verticales. De façon générale les plafonds ont peu d'influence sur les pics principaux qui ont été relevés. La configuration qui apparaît être la plus intéressante du point de vue de la diminution de l'intensité des rayons sonores est la configuration 2 (ceinture périphérique absorbante). En réalité, une différence de 5 Pa² représente une variation de 1 dB.

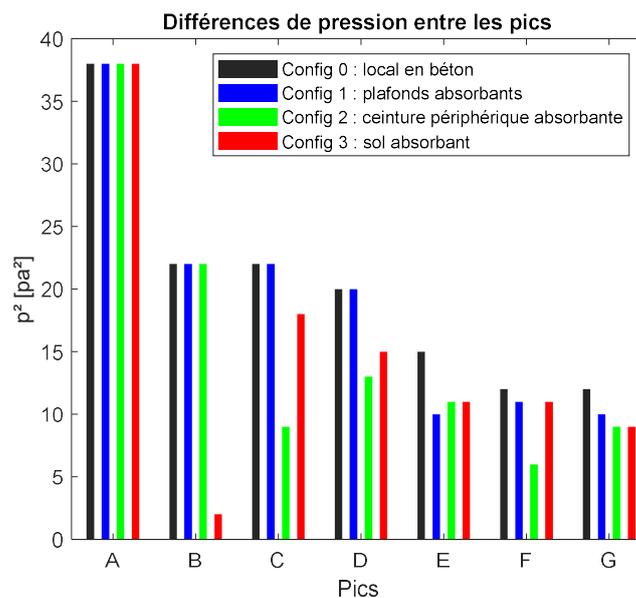


Figure 35 : Comparaison des valeurs en pression au carré des pics relevés sur les diagrammes.

4.4. Conclusion des résultats

Des mesures de réponses impulsionnelles dans un hangar vide ont été réalisées avec l'explosion de ballons. Les résultats montrent que le ballon est une bonne source impulsive : son énergie sonore est suffisamment élevée et son spectre varie peu sur les fréquences étudiées. C'est aussi une source sonore peu coûteuse, facile et rapide à mettre en place. Dans un environnement plus bruyant qu'un local isolé, comme une rue, la puissance sonore du ballon pourrait s'avérer insuffisante.

Il est d'ailleurs difficile de déterminer le niveau sonore de l'explosion du ballon, donnée nécessaire pour réaliser une simulation comparative. Ce problème ne se poserait plus si la source était calibrée comme un haut-parleur omnidirectionnel. Cette solution rendrait l'expérience plus complexe à mettre en place pour une application en extérieur car elle nécessite l'accès à une prise électrique.

Les simulations ont été générées à partir d'une routine existante, écrite sous MATLAB, qui effectue le calcul des réflexions spéculaires avec la méthode des images. L'implémentation de nouvelles fonctionnalités a donné lieu à la génération des échogrammes et des courbes pour le calcul des temps de réverbération et de la clarté.

La comparaison entre la mesure et la simulation a mis en évidence des premières similitudes entre le modèle géométrique et la réalité comme les pics d'un échogramme. L'influence de la géométrie a par ailleurs été explorée au travers de l'étude numérique de l'implantation d'une surface absorbante sur différentes surfaces (au plafond, au sol, en ceinture périphérique). Les variations obtenues sur les pics des échogrammes ont permis d'attribuer la provenance de certains rayons sonores à certaines surfaces.

Les paramètres de réverbération et de clarté calculés par la routine ont peu varié lors de l'étude numérique de l'implantation de surfaces absorbantes. Leurs valeurs sont par ailleurs bien en dessous de celles obtenues par la mesure. En conclusion, les résultats ne permettent pas encore de réaliser une comparaison complète entre la mesure et la simulation par la méthode des images.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail de fin d'études était d'introduire de façon générale les aspects de la mesure et de la simulation acoustique à travers la réalisation d'une réponse impulsionnelle.

La prise en main d'une chaîne de mesures qui pourrait être appliquée au milieu urbain a mis en évidence le problème du choix de la source sonore. Celle-ci doit concilier les besoins de la simulation et les contraintes du terrain. Les expériences présentées dans ce travail ont été réalisées en éclatant des ballons. L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, rapide et peu coûteuse et peut être réalisée dans n'importe quel endroit. Les résultats ont montré que l'impulsion générée était satisfaisante pour le calcul des paramètres acoustiques courants, mais insuffisamment précise pour sa modélisation sur logiciel. Pour répondre à ce problème, les conclusions des résultats suggèrent l'utilisation d'une source sonore calibrée comme un haut-parleur omnidirectionnel. L'application en milieu urbain d'un tel outil soulève d'autres problèmes d'ordre logistique notamment celui de l'accès à une prise électrique.

Il existe trois catégories de méthodes de calcul acoustique : ondulatoire, statistique et géométrique. Cette dernière offre la possibilité d'obtenir des résultats simplement tout en intégrant l'architecture dans le calcul. Ici, la méthode des images a été expérimentée à partir d'un code existant de calcul de la réflexion spéculaire rédigé sous MATLAB. L'enrichissement de ce code a rendu possible l'édition des échogrammes et le calcul de paramètres acoustiques. La méthode des images est simple et élégante mais rapidement limitée par le nombre de réflexions que l'on souhaite obtenir : au-delà de la dixième réflexion, les temps de calculs sont trop longs pour l'application que l'on souhaite en avoir. L'utilisation de la méthode du lancer de rayon pourrait résoudre ce problème dans les prochains travaux.

La comparaison entre la simulation et la mesure s'est basée sur l'étude de pics similaires entre l'échogramme enregistré et calculé mais n'a pas abouti à de réelles conclusions sur la pertinence du modèle géométrique. L'étude numérique de l'implantation d'une surface absorbante selon plusieurs configurations a néanmoins pu établir un premier lien entre l'échogramme et la géométrie du local. Ceci n'aurait pas été possible avec les méthodes statistiques, et trop compliqué à mettre en œuvre avec les méthodes ondulatoires pour le temps dont on disposait.

La géométrie joue un rôle important dans l'acoustique d'un environnement, positivement ou non. Les phénomènes de focalisation en sont un bon exemple. Dans les rues très réverbérantes en ville où les parois sont lisses, parallèles et longues, la géométrie devient un problème intéressant. Être capable de représenter l'influence d'éléments architecturaux comme des coursives sous arcades, des avancées de toiture ou des reliefs en façade, permet d'envisager la conception d'espaces plus calmes et favorables à l'habitat en milieu urbain.

Bibliographie

- (Aflalo, 2005) Erik Aflalo, Patrick Luquet, *L'évolution de l'instrumentation : Les outils de la mesure acoustique*, Acoustique & Techniques n°42-43, pp 4-8, CidB, **2005**.
- (Barron, 1993) Michael Barron, *Auditorium Acoustic and Architectural Design*, Second Edition, Taylor & Francis, **1993**.
- (Beckers, 1992) Benoit Beckers, *Acoustique des salles, étude numérique et expérimentale de l'aspect temporel*, Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées, **1992**.
- (Beckers, 2013) Benoit Beckers, *Notions d'acoustique technique*, Rapport Acou_001_fr sur le site Heliodon.net, Université de Compiègne, **2013**.
- (Beckers, 2014) Pierre Beckers et Benoit Beckers, *Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, **2014**.
- (Beckers, 2017) Benoit Beckers, *Calcul par la méthode des images de la réflexion spéculaire dans des enceintes prismatiques convexes*, Rapport Acou_003_fr sur le site Heliodon.net, Chaire Architecture et Physique Urbaine, Université de Pau et des Pays de l'Adour, **2017**.
- (Brüel & Kjær, 2013) Brüel & Kjær, DIRAC Room Acoustics Software –Type 7841, User Manual: Version 6.0, Chapter 4 : Impulse Response Measurements. Technical Documentation Technique, Novembre **2013**.
- (Brüel & Kjær, 2017) Brüel & Kjær, Manuel de l'utilisateur : Sonomètre-analyseurs types 2250 et 2270, juillet **2017**.
- (Concrete Acoustics, 2020) Concrete Acoustics, site internet, section: *Teaching*, image : *Athanasius Kircher, "Phonurgia Nova", 1673*, **2020**.
- (DIRAC, 2020) DIRAC software, *User Help*, **2020**.
- (Guillemin, 1882) Guillemin Amédée, *Petite Encyclopédie Populaire des Sciences et de leurs applications*, Volume : Le Son, notions d'acoustique physique et musicale, troisième édition, Librairie Hachette et C^{ie}, Paris, **1882**.
- (Hornikx, 2015) Marteen Hornikx, *Acoustic modelling for indoor and outdoor spaces*, Journal of Building Performance Simulation, 8:1, 1-2, **2015**.
- (Jacobsen, 2011) Finn Jacobsen, Torben Poulsen, Jens Holger Rindel, Anders Christian Gade, Mogens Ohlrich, *Fundamentals of Acoustics and Noise Control*, Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering, **2011**.
- (Kang, 2006) Jian Kang, *Urban Sound Environment*, 305 pages, Taylor & Francis, **2006**.
- (Kleiner, 1993) Kleiner Mendel, Dalenbäck Bengt-Inge, Svensson Peter, *Auralization-An Overview*, Chalmers Room Acoustics Group, Department of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, JAES Volume 41 Issue 11 pp. 861-875, **1993**.
- (Marshall, 1995) *Speech intelligibility prediction from calculated C₅₀ values*, Acoustical Society of America, 98 (5), Pt. 1, November, **1995**.

(Martellotta, 2019) Francesco Martellotta, Ettore Cirillo, Antonio Carbonari, Paola Riccardi, *Guidelines for acoustical measurements in churches*, Technical Note, Applied Acoustics n°70, Elsevier, **2019**.

(Ministère de l'écologie, 2014) Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Ministère du logement et de l'égalité des territoires, *Guide de Mesures Acoustiques*, version août **2014**.

(Papadakis, 2019) Nikolaos M. Papadakis, Georgios E. Stavroulakis, *Review of Acoustic Sources Alternatives to a Dodecahedron Speaker*, MDPI, Applied Sciences, Special Issue: Advances in Architectural Acoustics, **2019**.

(Petyt, 1983) Petyt M., *Finite Element Techniques for Acoustics*, Theoretical Acoustics and Numerical Techniques, International Centre for Mechanical Sciences, vol 277. Springer, Vienna, **1983**.

(Picaut, 2006) Judicaël Picaut, *Modélisation des champs « diffus » en acoustique architecturale et urbaine par un processus de diffusion de l'énergie sonore*, Acoustique, Université du Maine, Le Mans, **2006**.

(Picaut, 2007) Judicaël Picaut, *Calcul prévisionnel du bruit en milieu urbain : limites des approches actuelles et perspectives*, Acoustique & Technique n°51, pp 32-41, CidB, **2007**.

(Picaut, 2012) Judicaël Picaut, Gwénaél Guillaume, Guillaume Dutilleux, *Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment* dans RéférenceS, Modélisation urbaine : de la représentation au projet, pp.34-50, Commissariat général au développement durable, **2012**.

(RADIT2D, 2003) Radit2D, *Guia del usuario, Version 2003*, sur le site Heliodon.net, **2003**.

(Sanchez, 2015) Gemma Maria Echevarria Sanchez, Timothy Van Renterghem, Pieter Thomas, Dick Botteldoorn, *The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads*, Building and Environment 97, **2015**.

(Seetharaman, 2012) Prem Seetharaman, Stephen P. Tarzia, *The Hand Clap as an Impulse Sound for Measuring Room Acoustics*, Convention Paper, Audio Engineering Society 132^{ème} édition, Budapest, Hongrie, **2012**.

(Svensson, 2005) U. Peter Svensson, *Numerical aspects of edge diffraction impulse response*, Acoustic Sciences & Techniques, n°26, 2, pp 218-220, **2005**.

(Tahon, 2014) Marie Tahon, *Traitement du signal*, Laboratoire d'Acoustique, Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Paris, **2014**.

(Templeton, 1987) Duncan Templeton et David Saunders, *Acoustic Design*, 156 pages, Architectural Press Library of Design and Detailing, The Architectural Press: London, **1987**.

Annexes

1. Informations relatives à la campagne de mesure de réponses impulsionnelles.

L'implantation de la source et du récepteur dans le hangar a été réalisée par rapport à un repère local pris sur place.

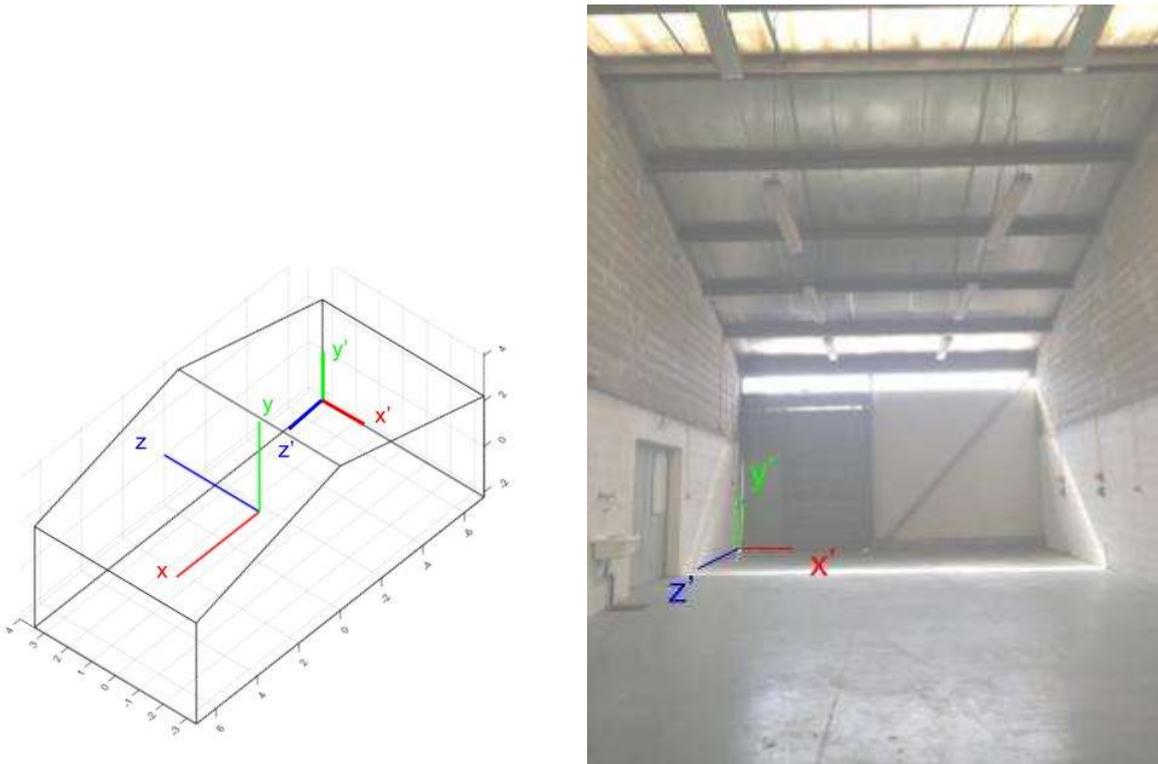


Figure 36 : Repère utilisé dans MATLAB (x,y,z) et repère d'implantation des points sur place (x',y',z')

Abréviation	Signification
BB	Bruit Blanc
BR	Bruit Rose
Imp.	Type d'impulsion
Id.	Identification du signal enregistré dans le sonomètre

Tableau 8 : Tableau des abréviations employées pour la mesure

Campagne du : 03/08/2020			Implantation sur place						Coordonnées dans MATLAB						Id.
n°	Heure	Imp.	Source			Récepteur			Source			Récepteur			
			x'	y'	z'	x'	y'	z'	x	y	z	x	y	z	
1	21:02	BB	2,98	1,918	4,108	2,909	2,236	9,225	2,842	-0,31	-0,42	-2,28	0,011	-0,49	Project003
2	21:04	BB	2,98	1,918	4,108	2,909	2,236	9,225	2,842	-0,31	-0,42	-2,28	0,011	-0,49	Project005
3	21:14	BR	2,98	1,918	4,108	2,909	2,236	9,225	2,842	-0,31	-0,42	-2,28	0,011	-0,49	Project006
4	21:19	BB	2,98	1,918	4,108	5,397	1,342	12,37	2,842	-0,31	-0,42	-5,42	-0,88	1,997	Project008
5	21:20	BB	2,98	1,918	4,108	5,397	1,342	12,37	2,842	-0,31	-0,42	-5,42	-0,88	1,997	Project009
6	21:28	BB	5,397	1,342	12,37	2,98	1,918	4,108	-5,42	-0,88	1,997	5,741	0,029	-2,27	Project010
7	21:31	Ballon 1	2,98	1,918	4,108	2,909	2,236	9,225	2,842	-0,31	-0,42	-2,28	0,011	-0,49	Project011
8	21:34	Ballon 2	2,98	1,918	4,108	2,909	2,236	9,225	2,842	-0,31	-0,42	-2,28	0,011	-0,49	Project012
9	21:35	Ballon 3	2,98	1,918	4,108	5,397	1,342	12,37	2,842	-0,31	-0,42	-5,42	-0,88	1,997	Project013
10	21:36	Ballon 4	2,98	1,918	4,108	5,397	1,342	12,37	2,842	-0,31	-0,42	-5,42	-0,88	1,997	Project014
11	21:37	Ballon 5	2,98	1,918	4,108	5,397	1,342	12,37	2,842	-0,31	-0,42	-5,42	-0,88	1,997	Project015

Tableau 9 : Mesures réalisées lors de la campagne, avec implantation de la source et du récepteur

2. Courbes obtenues sur les Ballons 1, 2, 3, 4 – Densité spectrale

Ce rapport présente le fait que la densité spectrale d'un ballon peut être assimilée à un bruit rose, avec le graphique obtenu sur le Ballon 1. Cette annexe présente les résultats sur les quatre ballons afin de montrer que les résultats obtenus sont similaires.

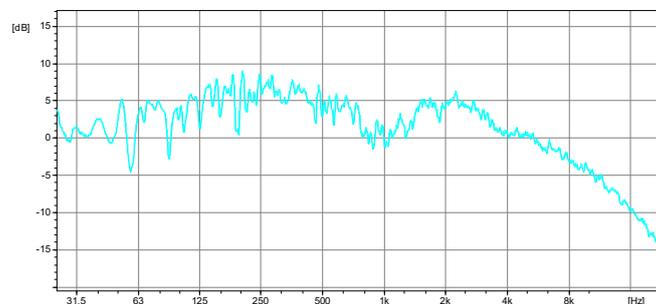


Figure 37 : Densité spectrale du Ballon 1 (Récepteur en R1)

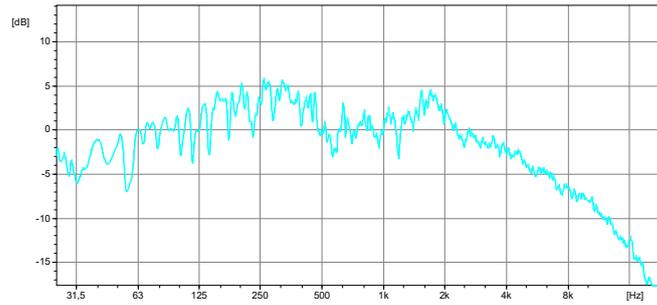


Figure 38 : Densité spectrale du Ballon 2 (Récepteur en R1)

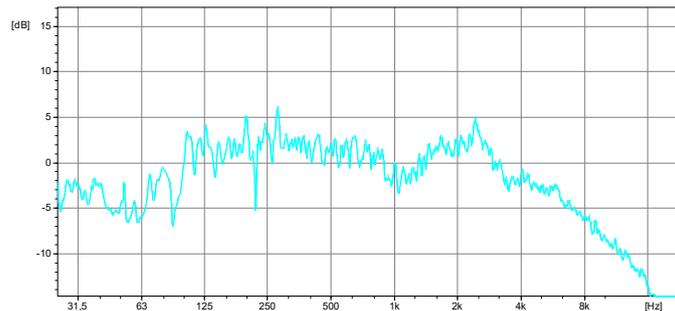


Figure 39 : Densité spectrale du Ballon 3 (Récepteur en R2)

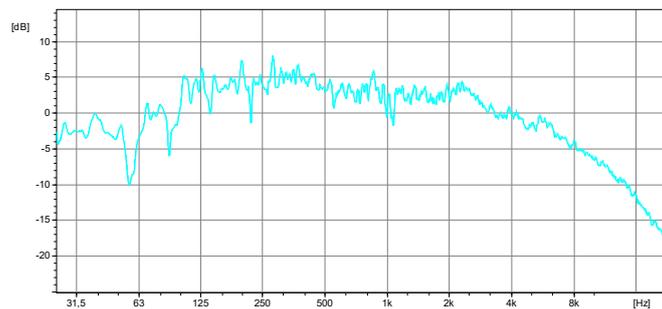


Figure 40 : Densité spectrale du Ballon 4 (Récepteur en R2)

3. Code MATLAB dessin du hangar étudié

```

if Sa == 16;
    l = 13.9 ;    % longueur
    L = 6.8 ;    % largeur
    h = 4.45 ;  % petite hauteur
    H = 6.375 ; % grande hauteur

    A = [1/2 h/2 +L/2];
    B = [0 H-(h/2) +L/2 ];
    Ap = [1/2 h/2 -L/2];
    P = A;
    Q = B;
    R = Ap;
    T = [P;Q;R;P]; % Plan par 3 points
    S = [0 0 0]; % Répétition du premier point pour le tracé
    n = cross (P-Q, P-R) /norm(cross (P-Q, P-R)); % Origine des coordonnées
    M = [(Q-P)' (R-P)' -n']; % Normale au plan
    % Matrice du système linéaire à
résoudre

```

```

sm = (S-P)'; % Second membre du système linéaire à résoudre
uvt = M\sm; % Solution du système: 2 param. du plan et celui de la
droit
W1 = S + n*uvt(3); % Point de percée de la normale dans le plan

A = [-1/2 h/2 +L/2];
B = [0 H-(h/2) +L/2 ];
Ap = [-1/2 h/2 -L/2];
P = A;
Q = B;
R = Ap; % Plan par 3 points
T = [P;Q;R;P]; % Répétition du premier point pour le tracé
S = [0 0 0]; % Origine des coordonnées
n = cross(P-Q,P-R)/norm(cross(P-Q,P-R)); % Normale au plan
M = [(Q-P)' (R-P)' -n']; % Matrice du sys linéaire à
résoudre
sm = (S-P)'; % Second membre du système linéaire à résoudre
uvt = M\sm; % Solution du système: 2 param. du plan et celui de la
droit
W2 = S + n*uvt(3); % Point de percée de la normale dans le plan

W = [ -1/2 0 0 ; 0 -h/2 0; +1/2 0 0 ; W1 ; W2; 0 0 +L/2; 0 0 -L/2];
S = [2.842 -0.307 -0.42]; % Implantation source
R1 = [-2.275 0.011 -0.491]; % Implantation récepteurs (2 positions)
R2 = [-5.418 -0.883 1.997];
R = R1; % Remplacer par R2 pour l'analyse sur l'autre récepteur

```

4. Code MATLAB *proprin.m* modifié

```

% Calcul spéculaire par la méthode des images

h = 16; % Numéro de la Halle dessinée
nr = 1; % Nombre de réflexions

tini = tic;
epsil=0.001; % Tolérance
vattot = 0; % Nombre de trajectoires valides
deltot=[]; % Délais
imftot=[]; % Images
alphatotx=[]; % Coefficients d'absorption
qtot=[]; % Contient tous les points de contact

disp(['==== Local étudié n°: ',num2str(h),' ====='])

for b=1:nr;
[S,R,W,images,seq,X,Y,Z,vat,q,alphas,alphatot] = Rechem(h,b,epsil);

suite = seq(1:vat,:);
imf = images(1:vat,:);
del = zeros(1,size(imf,1));
Cx= X(1:vat,:);
Cy= Y(1:vat,:);
Cz= Z(1:vat,:);

```

```

for i=1:vat;
    del(i)=round(norm(imf(i,:)-R)/340*1000); %[ms]
end;

delais=sort(del);

vattot=vattot+vat;
deltot=[deltot, del];
imftot=[imftot; imf];
alphanotx=[alphanotx;alphanot];

Signature (S,R,imf,vat) % Représentation des directions d'arrivées
sur le receteur
disp(['CPU.....: ',num2str(toc(tini))])

end

nf = size(W,1); % Nombre de parois

disp(['Nombre de réflexion(s) .....: ',num2str(nr)])
disp(['Position de la source S .....: ',num2str(S)])
disp(['Position du récepteur R .....: ',num2str(R)])
disp(['Nombre de parois.....: ',num2str(nf)])
disp(['Distance (m) Source-Recepteur : ', num2str(round(norm(S-
R)))]])
disp(['Délais (ms) Source-Recepteur : ', num2str(round(norm(S-
R)/340*1000))])
disp(['Délais minimum et maximum (ms) : ',num2str([min(delais)
max(delais)])]])
disp(['Délais (ms).....: ',num2str(delais)])

% Reconstitution des courbes et calculs des paramètres acoustiques
vat=vattot;
del=deltot;
imf=imftot;
[Lw]=Echogrammeetparametre(vat,del,b,imf,R,S,alphanotx)

% Dessin de la géométrie et implantation du repère
figure;
Desal(W);grid on;axis equal;hold on;la=4;
title(['Géométrie et emplacement du repere']);
plot3([0 la],[0 0],[0 0],'r','LineWidth',2)% 3 axes x-r,y-g,z-b
plot3([0 0],[0 la],[0 0],'g','LineWidth',2)
plot3([0 0],[0 0],[0 la],'b','LineWidth',2)

%Dessin des chemins valides
figure;
Desal(W);grid on;axis equal;hold on % Drawing detected valid rays
plot3(S(1),S(2),S(3),'r','MarkerSize',20);hold on % source
plot3(R(1),R(2),R(3),'g','MarkerSize',20);hold on % receuteur
plot3([S(1) R(1)],[S(2) R(2)],[S(3) R(3)],'b','LineWidth',2);hold
on %Lien RS
Rayon(S,R,Cx,Cy,Cz) % Fonction Rayon.m qui dessine les rayons
disp(['Volume de la Halle (m3).....: ',num2str(Volpri(h))])
axis([-10 10 -12 12 -2 2]); axis equal

```

5. Code MATLAB pour le calcul des longueurs de chaque rayon.

```
function [dist]=Distchem(vat,imf,R,del)
%Rappels :
% vat = nombre de chemins valides
% del = délais
% R = coordonnées du récepteur
% imf = coordonnées des dernières images ordre n
% dist = distance parcourue par chaque rayon

%Matrice des distances parcourues par chaque chemin
dist=zeros(vat,2);

for i=1:vat;
    dist(i,1)= del(i); % première colonne = délais (ms)
    dist(i,2)=sqrt((imf(i,1)-R(1))^2+(imf(i,2)-R(2))^2+(imf(i,3)-
R(3))^2); %distance dernière image et récepteur
end
```

6. Code MATLAB pour la prise en compte des coefficients d'absorption α

```
% Rappels :
% q = coordonnées de tous les points de contact
% nr = nombre de réflexions

na=length(q); % na = nombre de points de contact
alphas=zeros(na,nr);

for i=1:na;
    for r=1:nr;
        if (q(i,2) >= -1) && (q(i,2) <= 1.36); % #1 Enceinte
périphérique absorbante
            %if (q(i,2)<= -2.123); % #2 Sol absorbant
            %if (q(i,2)> 2.2) && (q(i,3) > -3.3)&& (q(i,3) < 3.3);
% #3 Plafond absorbant
            alphas(i,r)=0.90;
        else;
            alphas(i,r)=0.03;
        end
    end
end

alphatot=zeros(vat,1);
for i=1:vat;
    alphas(i)=(1-alphas(i,1));
    if nr>1;
        for r=2:nr;
```

```

        alphas(i)=alphas(i)*(1-alphas(i,r));
    end
end
end

```

7. Code MATLAB pour la reconstitution des courbes et le calcul des paramètres.

```

function [Lw]=Echogrammeetparametres(vat,del,b,imf,R,S,alphatotx);
[dist]=Distchem(vat,imf,R,del);

% Rappels :
% vat      = nombre de chemins valides
% b        = nombre de réflexions
% del      = délais
% R        = coordonnées du récepteur
% S        = coordonnées de la source
% imf      = coordonnées des dernières images
% dist     = distance parcourue par chaque rayon
% alphas   = coefficients d'absorption

Lw=135;           % dB
W0=1e-12;        % W
Watt=W0*10^(Lw/10); % W
I0=1e-12;        % J/m²
p0=2e-5;         % Pa

%MATRICE 1 : délais (ms) et intensités (J/m²) non additionnées
matricel=zeros(vat,2);
for i=1:vat;
    matricel(i,1)=dist(i,1); % [ms]
    matricel(i,2)=(Watt*alphatotx(i))/(4*pi*(dist(i,2))^2); % I =
J/m² avec les alphas
end

points = unique(del); % Abscisse des points de l'échogramme (1
valeur par délais d'arrivée)
np      = length(points); % Nombre de points sur l'échogramme

% MATRICE 2 : délais (ms) et intensités additionnées (J/m²)
matrice2 = zeros(np,2);
for i=1:np;
    valeur=0; % initialisation
    matrice2(i,1)= points(i);
    idx= matricel==points(i); % repère tous les rayons ayant le
même délais d'arrivée
    for j=1:vat;
        if idx(j,1)==true;
            valeur=valeur+matricel(j,2); % ajout de l'énergie de
tous les rayons ayant le même délais

```

```

        end
    end
    matrice2(i,2)=valeur;
end

% MATRICE 3 : délais et intensité avec ajout du signal direct
(J/m2)
delldi=round(norm(S-R)/340*1000); % délais (ms)
disdi=norm(S-R) ; % distance (m)
intldi= Watt/(4*pi*disdi^2); % J/m2
nivldi=10*log10(intldi/I0) ; % niveau sonore direct (dB)

direct=[delldi,intldi];
matrice3=[direct;matrice2];

% Echogramme en pascal 2 [Pa2]
figure;
grid on;
x=matrice3(:,1) ; % (s)
y=matrice3(:,2)*400 ; % (Pa2) [car p2 = I*400 pour les ondes
progressives]
stem(x,y, '.', '.b') ;
title(['Pression au carré des rayons incidents (' num2str(b), '
réflexions)']);
xlabel('t [ms]') ;
ylabel('p2 [Pa2]') ;

figure;
grid on;
x=matrice3(:,1) ; % (ms)
y=10*log10(matrice3(:,2)/I0) ; % (dB)
stem(x,y, '.', '.b') ;
title(['Niveau sonore et retard des rayons incidents (' num2str(b),
' réflexions)']);
xlabel('t [ms]') ;
ylabel('[dB]') ;

reponseimpt=zeros(np,2);
for i=1:np;
    reponseimpt(i,1)=matrice3(i,1);
    reponseimpt(i,2)=matrice3(i,2)/matrice3(1,2);
end

% MATRICE 4 : matrice délais (ms) et intensités additionnées (J/m2)
cumulée
matrice4=matrice3;
for i=2:np+1;
    matrice4(i,2)=matrice4(i-1,2)+ matrice3(i,2);
end

% C50 et C80 à partir de la matrice CUMULEE
matrice5=matrice4;
for i=2:np+1;
    if matrice5(i,1)>50; % on intègre sur les 50 ms

```

```

        xA= matrice5(i-1,1); % ms
        xB= matrice5(i,1);   % ms
        yA= matrice5(i-1,2); % J/m²
        yB= matrice5(i,2);   % J/m²
        t50ms=((yA-yB)/(xA-xB))*50+((xA*yB-xB*yA)/(xA-xB)); %
regression linéaire entre 2 valeurs
        int50ms=matrice5(np+1,2)-t50ms; % energie restante [J/m²]
        break
    else
        t50ms=0;
        int50ms=0;
    end
end
for i=2:np+1;
    if matrice5(i,1)>80;      % on intègre sur les 80 premières ms
        xA= matrice5(i-1,1); % ms
        xB= matrice5(i,1);   % ms
        yA= matrice5(i-1,2); % J/m²
        yB= matrice5(i,2);   % J/m²
        t80ms=((yA-yB)/(xA-xB))*80+((xA*yB-xB*yA)/(xA-xB)); %
regression linéaire entre 2 valeurs
        int80ms=matrice5(np+1,2)-t80ms; % energie restante [J/m²]
        break
    else
        t80ms=0;
        int80ms=0;
    end
end

C50=10*log10(t50ms/int50ms);
C80=10*log10(t80ms/int80ms);
disp(['C50      (dB)= ', num2str(C50)]);
disp(['C80      (dB)= ', num2str(C80)]);

% Courbe décibels cumulés
figure;
grid on;
x=matrice4(:,1)      ;           % (ms)
y=10*log10(matrice4(:,2)/I0)    ; % (dB)
scatter(x,y, '.', '.b') ;
title(['Niveaux sonores cumulés (' num2str(b), ' réflexions)']);
xlabel('t [ms]') ;
ylabel('[dB]') ;

% MATRICE 6 : matrice décumulée
matrice6=zeros(np+2,2);
matrice6(1,1)=0;
matrice6(1,2)=matrice4(np+1,2);
for i=2:np+2;
    matrice6(i,1)=matrice3(i-1,1);           % delais (ms)
    matrice6(i,2)=matrice6(1,2)-matrice4(i-1,2); % total de départ
- énergie cumulée
end

figure;
grid on;

```

```

xd=matrice6(:,1)      ;
% (ms)
yd=10*log10(matrice6(:,2)/I0) - 10*log10(matrice6(1,2)/I0)      ; %
décumulé (dB)
scatter(xd,yd, '.', '.b')      ;
title(['Courbe en décibels décumulés (' num2str(b), '
réflexions)']);
xlabel('t [ms]')      ;
ylabel('[dB]')      ;

%Calcul temps de réverbération
T = -5; % donne la référence (voir rapport calcul des T10)
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xT5= xd(i);
        break
    else
        xT5= 0; % si affiche 0 -> -5 dB non atteint, erreur
    end
end

T = -15; % pour T10
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xT10= xd(i)-xT5;
        break
    else
        xT10= 0; % si affiche 0 -> -10 dB non atteint, erreur
    end
end

T = -25; %T20
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xT20= xd(i)-xT5;
        break
    else
        xT20= 0; % si affiche 0 -> -20 dB non atteint
    end
end

T = -35; %T=30
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xT30= x(i)-xT5;
        break
    else
        xT30= 0; % si affiche 0 -> -20 dB non atteint
    end
end

T = -10; % EDT pour -10dB
for i=1:np;

```

```

    if yd(i)< T ;
        xEDT10= xd(i);
        break
    else
        xEDT10= 0;
    end
end

T = -20; % EDT pour -20dB
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xEDT20= xd(i);
        break
    else
        xEDT20= 0;
    end
end

T = -30; % EDT pour -30dB
for i=1:np;
    if yd(i)< T ;
        xEDT30= xd(i);
        break
    else
        xEDT30= 0;
    end
end

disp(['T10 (ms)= ', num2str(6*xT10)])
disp(['T20 (ms)= ', num2str(3*xT20)])
disp(['T30 (ms)= ', num2str(2*xT30)])
disp(['EDT (extrapolé de EDT10) (ms)= ', num2str(6*xEDT10)])
disp(['EDT (extrapolé de EDT20) (ms)= ', num2str(3*xEDT20)])
disp(['EDT (extrapolé de EDT30) (ms)= ', num2str(2*xEDT30)])
end

```

Note : les autres fonctions nécessaires au calcul sont disponibles sur Heliodon.net.