

30 août 2021 - 11 février 2022

Rapport de stage

Assistant ingénieur chez
Altia Acoustique

.....

- Etude des solutions bois
- Assistance aux ingénieurs sur les opérations en cours



Altia Acoustique

5 rue de Cléry 75002 Paris
Tuteur : Erwan GOUEROU



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage. Un remerciement particulier aux membres d'Altia pour leur accueil chaleureux et mon intégration immédiate au sein de l'équipe.

En premier lieu, je tiens à remercier Erwan GOUEROU, mon tuteur de stage en entreprise durant ces six mois, pour son accompagnement et sa patience qui m'ont permis de découvrir le monde de l'acoustique du bâtiment.

Je tiens également à remercier Fatima NGUYEN, Directrice Générale d'Altia, pour m'avoir accueillie au sein du bureau d'étude et accompagné dans mon étude des solutions bois au cours de ces six mois.

Aussi, je remercie Guillaume BOURDIN, Axelle BOISSIERE, Nathan JOUSSEAUME et Richard DENAYROU, Ingénieurs chez Altia, pour avoir répondu à mes multiples questions et accompagné sur les projets sur lesquels j'ai pu les assister.

Je remercie Gautier CHENEAU, technicien chez Altia, pour sa patience et sa bienveillance au cours des multiples mesures que nous avons effectuées ensemble. Un remerciement également pour les explications concises et les démonstrations complètes des utilisations de tous les logiciels que j'ai pu utiliser au cours de mon stage ainsi que pour toutes les questions à leur suite.

Je tiens à remercier Charlotte RAMBOZ, assistante de direction chez Altia pour la partie administrative de mon stage.

Enfin, je remercie mon suiveur de stage à l'Université de Technologie de Compiègne, Gautier LEFEBVRE, pour avoir veillé à distance au bon déroulement de mon stage ainsi que Nicolas DAUCHEZ pour m'avoir permis de décrocher ce stage chez Altia Acoustique en m'aiguillant dans mes recherches.

Sommaire

Table des figures	p.5
Glossaire	p.7
Introduction	p.8
Sujet de stage	p.9
I- Présentation de l'entreprise	p.10
I- 1) Le bureau d'études acoustiques	p.10
I- 2) Organigramme	p.10
I- 3) Les différentes étapes d'un projet public	p.11
II- Mission d'assistance aux ingénieurs	p.13
II- 1) Théorie de l'acoustique du bâtiment	p.13
II- 1) a- Théorie des isolements aux bruits aériens et aux bruits de chocs	p.13
II- 1) b- Théorie de l'acoustique interne : les matériaux	p.14
II- 1) c- Quelques critères de l'acoustique du bâtiment	p.15
II- 2) Rapports techniques et modélisations	p.17
II- 2) a- Classement sonore	p.17
II- 2) b- Objectifs d'isolements de façades	p.18
II- 2) c- Modèles de prédiction acoustique	p.19
II- 3) Mesures in-situ	p.23
II- 3) a- Mesures d'isolement au bruit aérien	p.23
II- 3) b- Mesures d'isolement de façade	p.24
II- 3) c- Mesures d'isolement aux bruits de chocs	p.24
II- 3) d- Mesures de bruits d'équipements	p.25
II- 3) e- Récapitulatif de la réglementation	p.25
II- 3) f- Stations de mesures	p.26
II- 3) g- Mesures de vibrations	p.27
II- 3) h- Rapports de mesures	p.27
III – L'étude des solutions bois	p.29
III- 1) Études menées et projets existants	p.29
III- 1) a- Études ACOUBOIS	p.29
III- 1) b- Problèmes rencontrés dans les solutions bois	p.30
III- 1) c- Les constructions existantes	p.31
III- 2) Construction d'une base de données automatisée	p.33
III- 2) a- Construction de la base de données	p.33
III- 2) b- Zoom sur les composants d'une paroi séparative	p.36
III- 2) c- Création d'un outil de recherche	p.38
III- 2) d- Modélisation des parois séparatives sous AcouS STIFF	p.42
Conclusion	p.45
Bibliographie	p.46

Annexe 1 : Base de données des parois séparatives/murs

p.47

Annexe 2 : Programme VBA de l'outil de recherche

p.51

Table des figures

Figure n°1	<i>Organigramme de l'entreprise Altia Acoustique</i>	p.11
Figure n°2	<i>Schéma récapitulatif des différentes phases d'un projet</i>	p.12
Figure n°3	<i>Schéma du principe masse-ressort-masse</i>	p.13
Figure n°4	<i>Schéma représentant les types de transmissions sonores</i>	p.14
Figure n°5	<i>Schéma représentant la transmission du son par un matériau réfléchissant</i>	p.14
Figure n°6	<i>Schéma représentant la transmission du son par un matériau absorbant</i>	p.15
Figure n°7	<i>Schéma représentant la transmission du son par un matériau diffusant</i>	p.15
Figure n°8	<i>Tableau issu de la réglementation du 23 juillet 2013 pour les infrastructures routières et les lignes ferroviaires</i>	p.17
Figure n°9	<i>Valeurs des isolements de façade en fonction de la distance par rapport à la voie classée</i>	p.17
Figure n°10	<i>Isolement de façade en fonction de la zone aérienne</i>	p.18
Figure n°11	<i>Classement sonore d'un projet impacté par des infrastructures classées</i>	p.18
Figure n°12	<i>Exemple d'isolation de façade réalisé à l'aide d'IsoFac</i>	p.19
Figure n°13	<i>Légende des objectifs d'isolation de façade sous IsoFac</i>	p.19
Figure n°14	<i>Extrait de l'arrêté du 25 avril 2003 concernant les temps de réverbération dans les locaux d'enseignement</i>	p.20
Figure n°15	<i>Formule de Sabine</i>	p.20
Figure n°16	<i>Modélisation d'un réfectoire de groupe scolaire à l'aide du logiciel Sketch Up</i>	p.21
Figure n°17	<i>Modélisation du réfectoire sous le logiciel CATT, en rouge la source, en bleu les récepteurs</i>	p.21
Figure n°19	<i>Résultats d'une simulation CATT : temps de réverbération d'un réfectoire</i>	p.22
Figure n°19	<i>Source sonore</i>	p.23
Figure n°20	<i>Transmissions directes, latérales et parasites à travers une cloison entre deux logements</i>	p.24
Figure n°21	<i>Transmissions directes, latérales et parasites à travers une façade</i>	p.24
Figure n°22	<i>Machine à chocs normalisée</i>	p.24
Figure n°23	<i>Transmissions acoustiques des bruits de chocs</i>	p.25
Figure n°24	<i>Réglementation acoustique pour les logements</i>	p.25
Figure n°25	<i>A gauche : Sonomètre sur pied pour point de mesure de dix minutes ; A droite : Station de mesure</i>	p.26
Figure n°26	<i>Accéléromètre connecté à l'ordinateur pour une mesure de vibration</i>	p.27
Figure n°27	<i>Rapport de bruit d'équipement</i>	p.28
Figure n°28	<i>Rapport d'isolation au bruit aérien</i>	p.28
Figure n°29	<i>Diapositive de la présentation de l'étude ACOUBOIS</i>	p.29
Figure n°30	<i>Panneau de CLT</i>	p.30
Figure n°31	<i>Formule de $K_{i,j}$</i>	p.31
Figure n°32	<i>Pose de bande Sylodyn sur plancher</i>	p.31

Figure n°33	<i>Tour Mjøstårnet en Norvège, 2019</i>	p.32
Figure n°34	<i>Tour Sensation à Strasbourg, 2019</i>	p.32
Figure n°35	<i>Salle de sport et une des chambres de la caserne de pompier</i>	p.33
Figure n°36	<i>Tour W350 au Japon, 2041</i>	p.33
Figure n°37	<i>Extrait du tableau récapitulatif des essais sur les murs (parois séparatives)</i>	p.34
Figure n°38	<i>Extrait du rapport RQA pour un Mur à Ossature Bois (MOB) Simple.</i>	p.35
Figure n°39	<i>Extrait du Manuel Bois Massif pour un Mur à Ossature Bois (MOB) Simple.</i>	p.35
Figure n°40	<i>Extrait de la base de données concernant les parois séparatives</i>	p.36
Figure n°41	<i>Exemple de paroi séparative ACOUBOIS quadruple</i>	p.36
Figure n°42	<i>Exemple de paroi séparative Binder Holz multicouches</i>	p.37
Figure n°43	<i>Outil de recherche de la feuille de recherche de Murs à ossature bois (MOB)</i>	p.38
Figure n°44	<i>Types de murs contenus dans la feuille « Construction » du fichier de recherche de Murs à ossature bois (MOB)</i>	p.39
Figure n°45	<i>Extrait de la recherche du type de mur : ossature primaire à double contreventement extérieur</i>	p.39
Figure n°46	<i>Extrait de la recherche du type de mur : panneaux de bois massif avec plaquage intérieur à un isolement supérieur ou égal à 51dB</i>	p.40
Figure n°47	<i>Extrait de l'affichage des schémas</i>	p.41
Figure n°48	<i>Schéma de la paroi séparative de l'essai n°2 du rapport ACOUBOIS avec son PV</i>	p.42
Figure n°49	<i>Configurations de parois possibles sous AcouS STIFF</i>	p.43
Figure n°50	<i>Définition des liaisons de l'essai n°2 sous AcouS STIFF</i>	p.43
Figure n°51	<i>Définition des composants et de leurs caractéristiques de l'essai n°2 sous AcouS STIFF</i>	p.43
Figure n°52	<i>Courbe de l'affaiblissement acoustique de la modélisation de l'essai n°2 sous AcouS STIFF et de son PV</i>	p.44

Glossaire

Mot	Définition
AVI	<i>Acoustique et Vibrations pour l'Ingénieur (filière de l'UTC)</i>
Auralisation	<i>Procédé visant à recréer un environnement acoustique à partir de données mesurées ou simulées.</i>
BA13 Std	<i>Plaque de plâtre standard figée entre deux feuilles de carton d'épaisseur 13mm</i>
BA13 dB	<i>Similaire au BA13 standard avec un indice d'affaiblissement plus élevé</i>
BBS	<i>Bois Brut Sec</i>
BRS	<i>Bois Raboté Sec</i>
BMA	<i>Bois Massif Abouté</i>
BMR	<i>Bois Massif Reconstitué</i>
BLC	<i>Bois Lamellé-Collé : matériau qui s'obtient par collage de plusieurs lamelles en bois dont le fil est essentiellement parallèle</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber : Terme anglais du BLC</i>
CSTB	<i>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment</i>
dB	<i>Décibel : Unité permettant de quantifier le niveau sonore</i>
dB(A)	<i>Décibel pondéré avec la pondération A : la pondération permet de se rapprocher du niveau sonore perçu par l'oreille humaine</i>
DDE	<i>Direction Départementale de l'Équipement</i>
DGALN	<i>Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature</i>
DHUP	<i>Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages</i>
ENSIM	<i>École Nationale Supérieure des Ingénieurs du Mans</i>
FCBA	<i>Institut technologique : Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber : matériau composite constitué de couches de placage de bois stratifié avec un adhésif. Les fibres du placage sont principalement orientées dans la même direction (orientation parallèle)</i>
Macro	<i>Ensemble de lignes de code qui contiennent des instructions</i>
MBM	<i>Manuel Bois Massif du fabricant Binderholz</i>
Mousse PU	<i>Mousse polyuréthane</i>
M2 AETVB	<i>Master Acoustique de l'Environnement : Transports, Bâtiment, Ville</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board : matériau constitué de plusieurs couches de lamelles de bois compressées puis encollées à l'aide de résine et de cire</i>
PEB	<i>Plan d'Exposition au Bruit</i>
RQA	<i>Référentiel Qualitel Acoustique : Document indiquant les systèmes constructifs, matériaux et produits à prévoir en phase de conception de bâtiments d'habitation pour se conformer aux exigences environnementales du référentiel NF Habitat</i>
UTC	<i>Université de Technologie de Compiègne.</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications : Langage de programmation du logiciel Excel</i>

Introduction

Au cours de la formation ingénierie à l'UTC, chaque étudiant doit effectuer deux stages en entreprise d'une durée de six mois. Au cours du premier, appelé « Stage assistant ingénieur » (TN09), l'étudiant découvre le métier d'ingénieur en utilisant et en enrichissant les connaissances acquises au cours de sa formation théorique. Cette première expérience professionnelle offre également la possibilité de découvrir l'entreprise dans ses aspects sociaux, technico-économiques et organisationnels.

Dans le cadre de ma formation d'ingénierie mécanique UTC, mon stage s'est déroulé au sein de l'entreprise Altia Acoustique, située en plein cœur de Paris. Il s'agit d'un bureau d'étude spécialisé dans l'acoustique du bâtiment. Il s'est déroulé du 30 août 2021 au 11 février 2022

En effet, j'ai choisi de réaliser mon stage dans l'acoustique du bâtiment dans le cadre de ma spécialisation au sein de la filière Acoustique et Vibrations pour l'Ingénieur de l'UTC. A la suite de mon semestre d'études au printemps 2021, j'ai acquis des compétences théoriques et techniques en acoustiques des salles et du bâtiment, qui ont suscité ma curiosité. C'est pourquoi j'ai contacté Altia Acoustique pour réaliser mon premier stage en entreprise au sein de leur bureau d'étude.

Ma mission principale a été d'étudier les solutions bois utilisées dans l'acoustique du bâtiment. Dans un premier temps, j'ai donc effectué des recherches sur les solutions bois existantes et sur l'avancement des connaissances en matière d'isolation acoustique. Grâce à ces recherches et aux recommandations de mes collègues, j'ai choisi trois catalogues regroupant des solutions bois afin de créer une base de données conséquente sur le sujet. Cette base de données regroupe tous les murs, façades, toitures et planchers en bois des trois catalogues qui ont été testés en laboratoire et/ou sont disponibles à la vente. A l'aide de cette base de données, j'ai créé quatre fichiers de recherche Excel séparés (murs, façades, toitures et planchers), automatisés à l'aide de code VBA. Ces fichiers permettent de rechercher l'élément bois que l'on désire en fonction de son type et de son indice d'isolation au bruit aérien ou bruit de choc pour les planchers.

En parallèle de mes recherches sur les solutions bois, j'ai assisté les ingénieurs dans leurs missions et réalisé de nombreuses mesures sur les chantiers.

Le présent rapport présentera donc ma mission d'assistance aux ingénieurs, les différents types de mesures sur chantier et l'étude des solutions bois pour l'acoustique du bâtiment.

Sujet de stage

Le stage se décompose selon 2 axes : deux missions sont menées de front, selon un partage de temps variable en fonction des opérations en cours.

- L'assistance aux ingénieurs sur les opérations en cours ;
- Un sujet « fil rouge » concernant l'étude des solutions bois.

Dans le cadre de la mission d'assistance aux ingénieurs, j'ai réalisé des mesures acoustiques sur les chantiers, appelées mesures in-situ. Également, j'ai épaulé les ingénieurs et le technicien dans leurs calculs, études diverses, rédaction de rapports et notes de calculs pour des projets de tous types de bâtiments incluant des équipements culturels et publics de manière générale (établissements d'enseignement, de santé...), des logements, des études ponctuelles...

Pour réaliser cette mission, l'usage de plusieurs logiciels a été nécessaire comme Sketch Up, CATT-Acoustic, Excel, AcouS-STIFF...

Le sujet « fil rouge » concernant les solutions bois est un travail en autonomie au cours duquel il m'a fallu rassembler les connaissances nécessaires à l'élaboration d'une aide pour les ingénieurs. En effet, les évolutions dans le domaine du bâtiment et dans les moyens constructifs amènent les différents bureaux d'études techniques à étudier de manière pointue des solutions que l'on souhaite plus respectueuses de l'environnement. Parmi elles, les solutions bois sont de plus en plus sollicitées, et de plus en plus mises en œuvre.

Le bois, particulièrement utilisé dans les façades et les séparatifs entre espaces (horizontaux ou verticaux), est décomposé en plusieurs grandes catégories : les complexes composés de parement en bois aggloméré (OSB), les complexes composés de bois lamellé croisé (CLT) ... Le principe du sujet « fil rouge » était d'établir un état des lieux des solutions existantes et déployées en France et en Europe, et d'étudier de manière approfondie ces solutions pour les intégrer dans les modèles de calcul et de rapport d'Altia.

I – Présentation de l’entreprise

Pour commencer, nous allons nous intéresser à la création de l’entreprise Altia Acoustique, à ses réalisations passées et aux membres qui la compose. Seront ensuite présentées les différentes étapes de la réalisation d’un projet public, qui permettront de mieux appréhender le travail des ingénieurs acousticiens pour la suite du rapport.

1) Le bureau d’études acoustiques

Créé en 1996, Altia est un bureau d’études acoustiques situé dans le centre de Paris et exerçant dans l’acoustique du bâtiment au sens large. Spécialisé dans la conception des lieux d’écoute, la société Altia présente aujourd’hui des compétences permettant de répondre autant à des projets de grande complexité (théâtres, lieux culturels, salles de concerts) qu’à des programmes plus classiques (logements, bureaux, gymnase). Les projets sont principalement situés en région parisienne mais Altia intervient de manière générale dans la France entière et plus rarement à l’étranger.

Le bureau d’étude possède un accord-cadre avec la société foncière Altarea Cogedim. Les projets réalisés dans le cadre de cette collaboration concernent principalement des bâtiments d’habitation de type immeubles et maisons individuelles et représentent environ 40% du chiffre d’affaires d’Altia.

En collaboration avec la maîtrise d’œuvre, les ingénieurs du bureau d’étude mettent à profit leurs expériences pour répondre aux exigences du programme acoustique (isolements, acoustique interne, maîtrise des bruits d’équipements), tout en intégrant les contraintes architecturales. Au cours des années, Altia a pu étoffer ses compétences sur des notions liées à certains projets : expertise dans le domaine des vibrations, études environnementales, prescriptions audiovisuelles…

Ouverte sur les marchés nationaux et internationaux, Altia propose des prestations dans le cadre général des missions de l’acousticien conseil :

- Études d’orientation des principes de solution, faisabilité technique, ergonomique et financière.
- Simulations informatiques de l’efficacité attendue de ces solutions, recommandations générales.
- Études de réalisation des ouvrages, suivi et contrôle final des résultats.

2) Organigramme

L’entreprise Altia compte actuellement huit employés (figure 1). Un stagiaire est toujours recruté aux semestres d’automne et de printemps. La direction est partagée entre Fatima NGUYEN, directrice générale, diplômée de l’école nationale supérieure des ingénieurs du Mans (ENSIM) intégrant l’entreprise en 2004 et Richard DENERYROU, président et expert judiciaire en acoustique, qui dirige Altia depuis sa création en 1996. L’équipe directive est épaulée d’une assistante de direction, Charlotte RAMBOZ qui intègre la société en 2017.

L’équipe se compose également de quatre chefs de projet, Guillaume BOURDIN, diplômé de l’Université Paris VI en Acoustique Architecturale et Urbaine, il intègre Altia en 2012 ; Axelle BOISSIERE, diplômée du CNAM en acoustique, elle intègre la soc été en 2009 ; Erwan GOUEROU, diplômé de l’école nationale supérieure des ingénieurs du Mans (ENSIM), il intègre l’entreprise en 2018 et Nathan JOUSSEAUME, Diplômé de l’Université du Mans en 2021 : " Master Acoustique de

l'Environnement : Transports, Bâtiment, Ville - M2 AETBV ". Le technicien de l'entreprise, Gautier CHENEAU, diplômé de l'université de Montpellier en acoustique et environnement sonore, intègre l'entreprise en 2017.

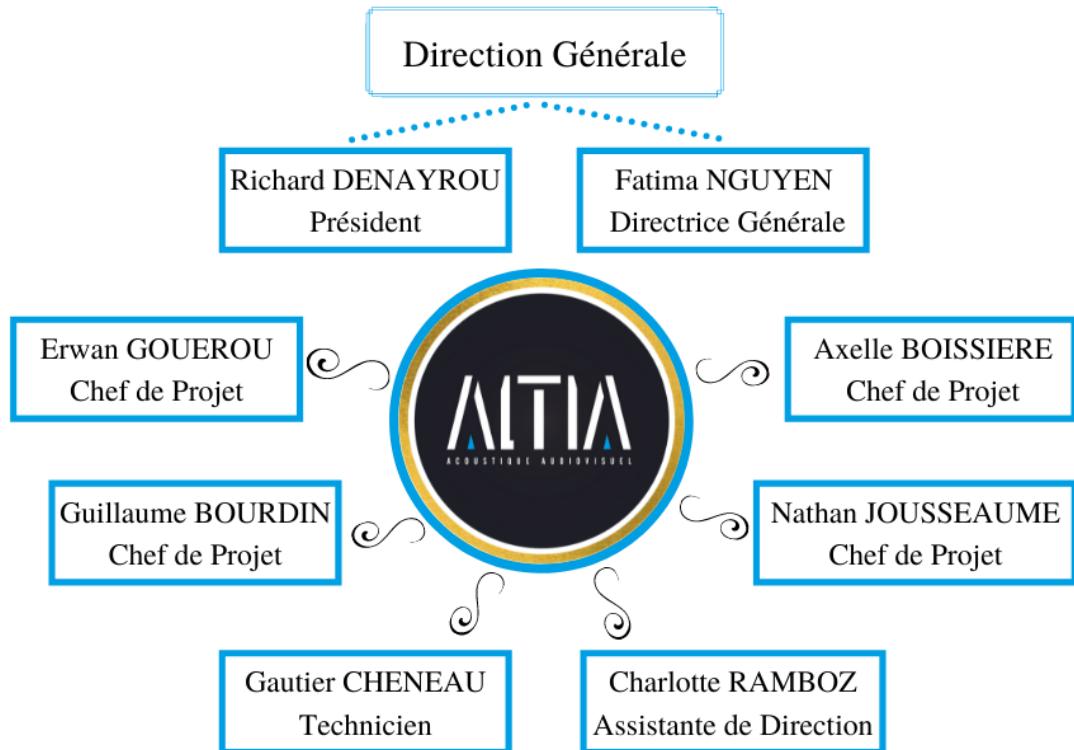


Figure 1 : Organigramme de l'entreprise Altia Acoustique

3) Les différentes étapes d'un projet public

Une mission acoustique dans un projet public se décompose généralement en plusieurs phases (figure 2). Avant toute chose, le bureau d'études acoustiques, en collaboration avec une équipe de maîtrise d'œuvre (bureau d'architectes et autres bureaux d'étude technique), va répondre à un appel d'offre pour participer à un concours. Cette première phase est appelée étude d'esquisse (**ESQ**). Dans cette phase, l'acousticien va définir une démarche alliant respect des réglementations, confort acoustique, intégration du bâtiment dans son environnement sonore et cohérence vis-à-vis des autres corps de métier et des contraintes architecturales. La détermination des isolements de façade (cf. II-2 a)) est le plus souvent réalisée au cours de cette première phase.

Si l'équipe de maîtrise d'œuvre gagne le concours, elle va donc suivre le projet de sa création à sa construction. Cependant, avant de se lancer dans la construction, trois phases d'études de conception sont le plus souvent prévues : l'étude avant-projet sommaire (**APS**), l'étude avant-projet détaillée (**APD**) et l'étude de projet (**PRO**). Au cours de ces phases, il faut définir les objectifs et les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre dans le but d'établir la Notice Acoustique Générale du projet. Cette notice inclut également les prescriptions lot par lot à intégrer au Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

Lors des études de conception, il est parfois nécessaire de réaliser un diagnostic acoustique initial (**DIAG**), que ce soit pour une réhabilitation ou la création d'un nouveau bâtiment, il permet de connaître avec précision les contraintes environnementales propres à chaque projet et les éventuelles caractéristiques acoustiques du bâtiment à rénover en vue de l'optimisation des solutions préconisées. Au cours de mon stage j'ai pu participer à la réalisation d'un diagnostic dans les locaux de Radio-France. Ce dernier avait pour but de constater les performances acoustiques actuelles des bureaux et studios dans lesquels des premiers travaux de rénovation avaient été effectués afin que les travaux suivants ne détériorent pas l'état acoustique actuel des locaux.

Une fois les études de conception terminées, le chantier est lancé. Au cours de cette phase, le bureau d'études acoustiques va effectuer des suivis de chantier. L'acousticien va faire partie de la Direction de l'Exécution des Travaux (**DET**). En effet, la garantie des performances acoustiques d'un bâtiment dépend des solutions et matériaux finalement retenus et de leur mise en œuvre. Le suivi d'exécution va donc prendre plusieurs formes : réunions, visites sur sites, mesures in-situ (cf. II-3) ... Dans les bâtiments d'habitations, des logements définis appelés logements témoins sont terminés plus rapidement que le reste du chantier afin de pouvoir réaliser des essais à l'intérieur. En fonction du résultat de ces essais, l'acousticien va pouvoir donner la marche à suivre pour la suite du chantier (modifications ou continuation). Tout au long du chantier, une mission **VISA** permet également de valider l'ensemble des documents d'exécution des entreprises (plans, détails, fiches techniques, PV acoustiques).

Enfin, une fois le chantier terminé, il faut effectuer les mesures permettant d'attester de la conformité acoustique du projet au niveau des performances acoustiques internes et environnementales. Pour cela, on réalise une réception acoustique intitulée Assurances aux Opérations de Réception (**AOR**).

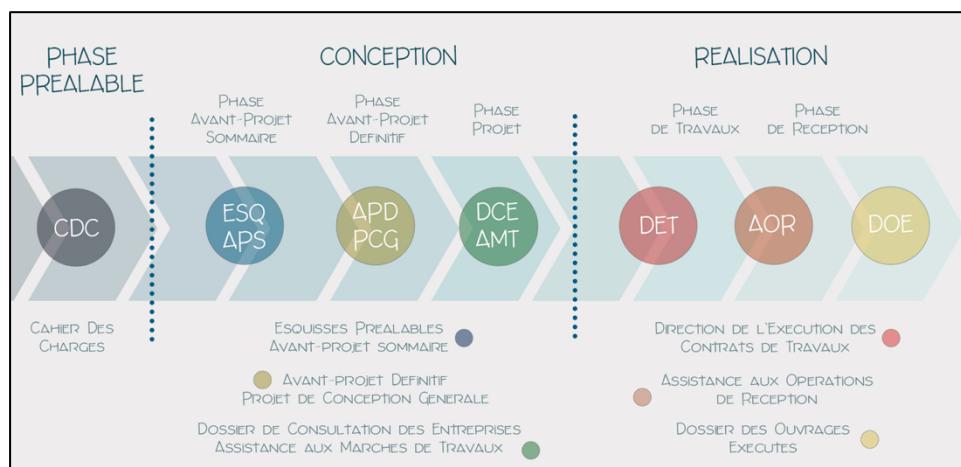


Figure 2 : Schéma récapitulatif des différentes phases d'un projet

II- Mission d'assistance aux ingénieurs

Au cours de cette seconde partie, nous allons dans un premier temps introduire quelques notions de théorie puis nous nous intéresserons à l'utilisation des logiciels acoustiques et à la rédaction des rapports techniques qui leurs sont associés. Enfin, nous balayerons tous les types de mesures acoustiques que j'ai pu effectuer dans le cadre de mon stage.

1) Théorie de l'acoustique du bâtiment

Les principales problématiques acoustiques du bâtiment sont les suivantes :

- Isolement entre locaux (aériens et chocs) ;
- Isolement vis-à-vis de l'extérieur ;
- Acoustique interne ;
- Maîtrise du bruit des équipements du projet.

Concernant l'isolation entre locaux, la manière dont se transmettent les ondes sonores au travers des éléments est importante pour comprendre de quelle manière il va être possible d'obtenir un local bien isolé phoniquement. Ces isolements sont principalement pilotés par les affaiblissements acoustiques des éléments de construction, eux même régit par différentes lois et principes physiques. Plusieurs manières existent pour dimensionner les isolements entre locaux et les affaiblissements acoustiques d'éléments de construction mais des formules normalisées permettent d'homogénéiser les calculs dans le monde de l'acoustique.

Pour l'acoustique interne, on utilise des matériaux avec des propriétés particulières (absorbantes, diffusantes...) qui ont pour but d'améliorer les critères d'acoustique interne des locaux, notamment la réverbération.

a- Théorie des isolements aux bruits aériens et aux bruits de chocs

De manière générale, on évalue le comportement acoustique d'éléments de construction à l'aide de deux principes : le principe Masse-Ressort-Masse et la loi de Masse. Sont également considérés les types de transmissions acoustiques (figure 4) pour isoler correctement un local qui sont au nombre de trois : les transmissions directes, latérales et parasites. Observons plus en détail, en quoi consiste ces notions.

Le **principe masse-ressort-masse** (figure 3) consiste à utiliser des parois doubles comme des plaques de plâtre ou des cloisons en briques désolidarisées qui sont séparées par de l'air lui-même rempli par une matière isolante qui吸 et dissipe l'énergie sonore. Le son va provoquer des vibrations dans la première paroi. Ensuite, les ondes sonores vont être amorties dans l'air ou l'isolant qui joue le rôle de ressort. Finalement, le son est transmis amorti et donc moins fort à la deuxième paroi. D'un point de vue physique, le principe général du système masse-ressort-masse est de déphasier les ondes. En effet, des ondes déphasées ont une amplitude plus faible que des ondes en phase, ce qui réduit leur intensité sonore.

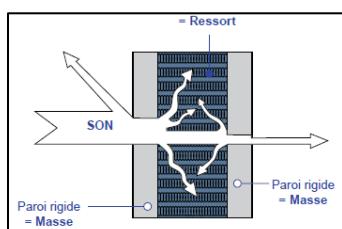


Figure 3 : Schéma du principe masse-ressort-masse

La **loi de masse** permet quant à elle d'estimer le comportement acoustique d'une paroi simple en fonction de sa masse surfacique : plus la paroi est **lourde**, plus elle isole du bruit.

La **transmission directe** est la transmission due au bruit incident sur un élément de séparation et directement rayonné par lui (transmission solide) ou transmis par certaines de ses parties (transmission aérienne) comme des fentes, des éléments aérauliques ou des persiennes. Dans le cas où la transmission se fait par des éléments aérauliques comme des coffres de volets roulants, des gaines techniques ou des boîtiers électriques, on parle de **transmissions parasites**.

La **transmission indirecte** correspond à la transmission du bruit d'un local d'émission vers un local de réception, via des chemins de transmission autres que le chemin de transmission directe. Elle peut être divisée en transmission de bruits aériens et transmissions de bruits solides. Elle est aussi appelée **transmission latérale**. Pour les bruits aériens, la transmission indirecte de l'énergie acoustique se fait principalement par l'intermédiaire d'un chemin de transmission de bruits aériens comme les systèmes de ventilation, les plafonds suspendus et les couloirs alors que pour les bruits solides, la transmission latérale se fait principalement via des chemins structuraux (vibratoires) dans la construction comme les murs, planchers et plafonds.

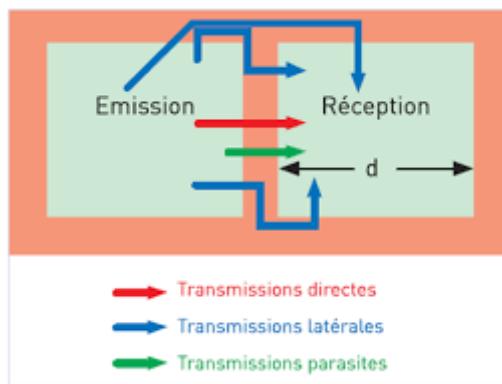


Figure 4 : Schéma représentant les types de transmissions sonores

b- Théorie de l'acoustique interne : les matériaux

Pour modifier et améliorer l'acoustique interne d'une salle en fonction de la demande du client ou de la réglementation, on utilise trois types de matériaux :

- Les matériaux **réfléchissants** : Lisses, non poreux et rigides tel que le bois, le plâtre et le béton (figure 5).

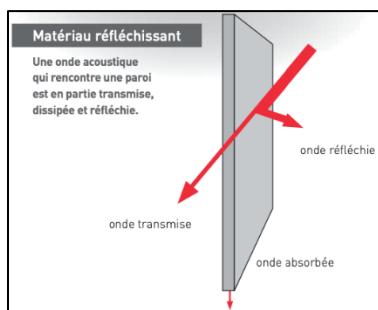


Figure 5 : Schéma représentant la transmission du son par un matériau réfléchissant

- Les matériaux **absorbants** : Poreux ou perforés tels que la laine de roche. Leur coefficient d'absorption est noté α (figure 6).

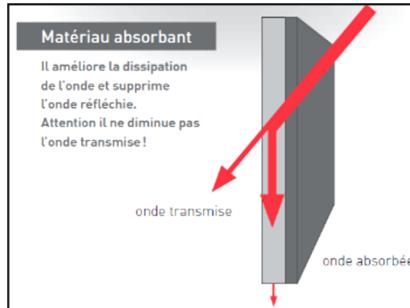


Figure 6 : Schéma représentant la transmission du son par un matériau absorbant

- Les matériaux **diffusants** : Pas parfaitement plans, ils permettent de renvoyer le son dans toutes les directions pour le diffuser de manière homogène (figure 7).

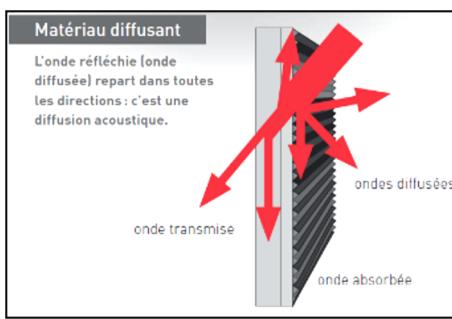


Figure 7 : Schéma représentant la transmission du son par un matériau diffusant

c- Quelques critères de l'acoustique du bâtiment

En acoustique du bâtiment, on utilise régulièrement les critères qui vont suivre. Ces différents critères seront récurrents au cours du rapport, c'est pourquoi il était important de les définir.

Indice d'ffaiblissement acoustique R_w (C ; C_{tr}) en dB : Cet indice caractérise l'aptitude d'un matériau ou d'une paroi à atténuer la transmission directe du bruit. Il donne la performance de la paroi séparative testée entre deux locaux. Il est calculé par rapport à une courbe de référence. En France, la prise en compte de l'ffaiblissement aux bruits intérieurs (mesuré à l'aide de bruit rose) se fait en calculant l'indice $R_w + C$, et l'ffaiblissement aux bruits extérieurs en calculant l'indice $R_w + C_{tr}$.

Isolement acoustique standardisé $D_{nT, A}$ pondéré en dB(A) : Cet indice quantifie l'atténuation acoustique entre deux locaux. Il est généralement pondéré par la pondération 'A' qui est la pondération standard des fréquences audibles : elle a été conçue pour se rapprocher de la réaction de l'oreille humaine au bruit. Plus sa valeur est grande, plus l'isolation aux bruits aériens est grande.

$$D_{nT,w} = L_E - L_R + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

Avec L_E le niveau de bruit mesuré dan la salle d'émission et L_R le niveau de bruit mesuré dans la salle de réception, T le temps de réverbération du local et $T_0 = 0,5s$.

Niveau du bruit de choc standardisé $L_{nT,w}$ pondéré en dB(A) : Cet indice permet d'évaluer les performances d'un système d'isolation contre les bruits de chocs transmis par le plancher. Plus sa valeur est petite, plus l'isolement aux chocs est grand.

$$L_{nT,w} = L_R - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

Niveau de bruit d'équipements standardisé L_{nAT} pondéré en dB(A) : Cet indice permet de connaître le niveau sonore produit par un bruit d'équipement tel qu'un système de ventilation ou un coffre de volets roulants.

$$L_{nAT} = L_E - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

Durée de réverbération T_{R60} : Le temps de réverbération est le temps mis par un son pour décroître de 60 dB après un bruit impulsionnel.

2) Rapports techniques et modélisation

Au cours de mon stage, j'ai pu assister les ingénieurs à différentes étapes des projets. De la recherche de l'environnement sonore d'un projet à sa modélisation 3D, j'ai également réalisé diverses simulations. Les différents travaux que j'ai effectués seront détaillés dans cette partie.

a- Classement sonore

Dans le cadre de la réalisation de bâtiments (logements, bureaux, écoles, commerces, salles de spectacle...), il est nécessaire de connaître l'environnement sonore qui entoure le projet. En effet, il faut déterminer s'il existe des voies de transport terrestres ainsi que des couloirs aériens qui affecteraient le confort acoustique des occupants.

Les voies de transport terrestres telles que les voies ferrées et les routes sont classées par la DDE (Direction Départementale de l'Équipement) de chaque département. Les départements mettent ensuite à disposition de tous des cartes de classement sonore qui recensent toutes leurs voies classées. Les zones impactées par le trafic aérien sont quant à elles recensées par le PEB (Plan d'Exposition au Bruit) qui est destiné à encadrer l'urbanisation dans les zones de bruit au voisinage des aéroports. L'arrêté du 23 juillet 2013 définit les objectifs d'isolement de façade réglementaires à respecter pour les bâtiments d'habitation, les groupes scolaires et les hôtels pour chaque catégorie de voie classée et également pour les zones de trafic aérien classées. Les autres types de bâtiments ne sont pas soumis à la réglementation mais l'arrêté précédent est pris en référence dans un grand nombre de documents normatifs et référentiels environnementaux.

Les voies de transport terrestre sont classées en cinq catégories (figure 8). Plus leur niveau sonore de référence est élevé, plus la zone d'impact de la voie sera grande : la figure 9 donne ainsi les valeurs d'isolement de façade à respecter en fonction de la distance par rapport à la catégorie de la voie classée.

Catégorie de classement de l'infrastructure	Niveau sonore de référence Laeq(6h-22h) en dB (A)	Niveau sonore de référence Laeq(22h-6h) en dB(A)	Largeur maximale des secteurs affectés par le bruit de part et d'autre de l'infrastructure
1	L > 81	L > 76	d = 300 m
2	76 < L < 81	71 < L 76	d = 250 m
3	70 < L < 76	65 < L 71	d = 100 m
4	65 < L < 70	60 < L 65	d = 30 m
5	60 < L < 65	55 < L < 60	d = 10 m

Figure 8 : Tableau issu de l'arrêté du 23 juillet 2013 pour les infrastructures routières et les lignes ferroviaires

Distance horizontale (m)	0	10	15	20	25	30	40	50	65	80	100	125	160	200	250	300
Catégorie de l'infrastructure	1	45	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32
2	42	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30		
3	38	38	37	36	35	34	33	32	31	30						
4	35	33	32	31	30											
5	30															

Figure 9 : Valeurs des isolments de façade en fonction de la distance par rapport à la voie classée

L'article 10 de l'arrêté (figure 10) préconise quant à lui les valeurs d'isolation de façade en fonction des zones de bruit générées par les aéroports.

Art. 10. – L'article 8 est remplacé par les dispositions suivantes :

« Dans les zones définies par le plan d'exposition aux bruits des aérodromes, au sens de l'article L. 147-3 du code de l'urbanisme, l'isolation acoustique standardisé pondéré D_{NTA} , tr minimum des locaux vis-à-vis de l'espace extérieur est de :

- en zone A : 45 dB ;
- en zone B : 40 dB ;
- en zone C : 35 dB ;
- en zone D : 32 dB. »

Figure 10 : Isolation de façade en fonction de la zone aérienne

Pour illustrer mon propos, voici le classement sonore d'un projet que j'ai pu effectuer (figure 11). On constate que le projet est impacté par deux infrastructures terrestres classées (voie bleue de catégorie 1 et voie orange de catégorie 4). Étant de catégorie 1, la voie bleue a une largeur d'impact de 300 mètres alors que la voie de catégorie 4 n'impacte son environnement que sur une largeur de 30 mètres. À la suite du classement sonore, on peut déterminer les objectifs de façade à respecter. Notons que ce projet n'était pas impacté par le trafic aérien.

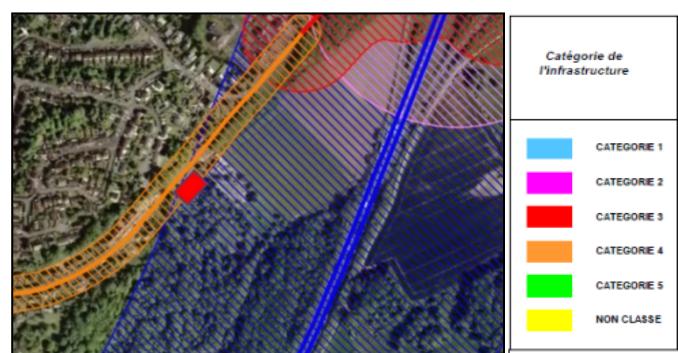


Figure 11 : Classement sonore d'un projet impacté par des infrastructures terrestres classées

b- Objectifs d'isolesments de façade

A l'aide du classement sonore réalisé précédemment et des plans du bureau d'architectes, il est possible de modéliser le projet ainsi que son environnement pour déterminer les objectifs d'isolesments de façades.

Les voies bruyantes ayant été repérées avec le classement sonore, il faut calculer les isolesments de façades requis en fonction.

Pour commencer, le calcul des isolesments de façades est réalisé en fonction de la catégorie de la voie classée et de sa distance par rapport au bâtiment. Une correction lui est appliquée en fonction de l'angle entre le projet et la voie. Également, si d'autres bâtiments provoquent un masquage entre la voie et le bâtiment, l'isolement s'en voit diminué. Cela explique pourquoi il ne faut pas modéliser uniquement le projet mais aussi les bâtiments qui l'entourent.

Ensuite, si plusieurs voies classées impactent le projet, on effectue une addition logarithmique des isolesments réalisés pour chaque voie et chaque façade.

Enfin, si le bâtiment est impacté par un couloir aérien, il faut vérifier que les valeurs d'isolement déterminées précédemment respectent bien l'arrêté pour la zone aérienne concernée. Si ce n'est pas le cas et que l'isolement de façade est inférieur à l'arrêté, on réalise à nouveau une addition logarithmique de la valeur souhaitée par la norme avec l'isolement de façade déterminé précédemment.

Pour automatiser ce calcul, mon tuteur de stage, Erwan GOUEROU a développé IsoFac, une extension au logiciel Sketch Up permettant de simplifier le calcul des isolements de façade. Ce plugin permet à l'utilisateur de configurer les infrastructures terrestres (routes et voies ferroviaires) et aériennes ainsi que leurs catégories de bruit, puis d'en déduire les isolements minimums pour chaque façade. Il est également nécessaire de dessiner les bâtiments existants autour du projet pour prendre en compte le masquage qu'ils apportent par rapport aux voies classées.



Figure 12 : Exemple d'isolement de façade réalisé à l'aide d'IsoFac

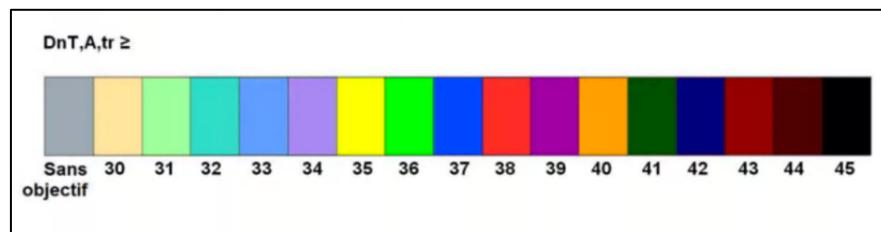


Figure 13 : Légende des objectifs d'isolement de façade sous IsoFac

La figure 12 présente un exemple d'isolement de façade réalisé au cours de mon stage. On distingue les quatre voies classées, de teinte rouge. Plus l'intensité du rouge est forte, plus la catégorie de la voie classée est élevée. Les couleurs présentent sur le bâtiment correspondent à un objectif d'isolement allant de 30 dB à 38 dB selon la légende de la figure 13.

A la suite de la modélisation, l'ingénieur en charge du projet homogénéise les objectifs afin de ne pas multiplier les moyens à mettre en œuvre. Une fois les calculs terminés, un rapport est rédigé pour synthétiser les résultats de la modélisation et transmettre les instructions au maître d'œuvre.

c- Modèles de prédiction d'acoustique interne

Dans le cadre de ma mission d'assistance aux ingénieurs, j'ai utilisé le logiciel CATT-Acoustic à plusieurs reprises. J'ai également eu la chance d'assister en partie à une formation sur ce logiciel. CATT-Acoustic est un outil d'aide à la conception des lieux destinés à l'écoute et de tout local dont on veut maîtriser l'acoustique interne (salles de concert, locaux d'enseignement ...). Basé sur les principes de l'acoustique géométrique, le logiciel est également doté de fonctionnalités étendues en termes d'écoute (auralisation ou audiospatialisation) des modèles et s'interface avec les outils de conception architecturale. Pour calculer les temps de réverbération numériquement, CATT-Acoustic utilise la simulation par tirs de rayons en prenant en compte la diffusion.

L'objectif des simulations que j'ai pu réaliser était de déterminer la quantité de matériaux absorbants nécessaire pour atteindre le temps de réverbération exigé par la réglementation. En effet, l'arrêté du 25 avril 2003 (figure 14) relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement, de santé et dans les hôtels prévoit des exigences relatives à la durée de réverbération des locaux. Ces exigences correspondent à la moyenne des durées de réverbérations (T60) dans les intervalles d'octave centrés sur 500, 1000 et 2000 Hz. Des référentiels environnementaux et d'autres normes spécifiques encadrent les temps de réverbération pour les salles de spectacles, les bureaux et autres lieux publics ou privés.

Locaux meublés non occupés	Durée de réverbération moyenne (exprimée en secondes)
Salle de repos des écoles maternelles ; salle d'exercice des écoles maternelles ; salle de jeux des écoles maternelles	
Local d'enseignement ; de musique ; d'études ; d'activités pratiques ; salle de restauration et salle polyvalente de volume ≤ 250 m ³	0,4 ≤ Tr ≤ 0,8 s
Local médical ou social, infirmerie ; sanitaires ; administration ; foyer ; salle de réunion ; bibliothèque ; centre de documentation et d'information	
Local d'enseignement ; de musique ; d'études ; d'activités pratiques d'un volume > 250 m ³ , sauf atelier bruyant (3)	0,6 ≤ Tr ≤ 1,2 s
Salle de restauration d'un volume > 250 m ³	Tr ≤ 1,2 s
Salle polyvalente d'un volume > 250m ³ (1)	0,6 ≤ Tr ≤ 1,2 s et étude particulière obligatoire (2)
Autres locaux et circulations accessibles d'un volume > 250 m ³	Tr ≤ 1,2 s si 250 m ³ < V ≤ 512 m ³ Tr ≤ 0,15 √V s si V > 512 m ³
Salle de sports	Définie dans l'arrêté relatif à la limitation du bruit dans les établissements de loisirs et de sports pris en application de l'article L.111-11-1 du code de la construction et de l'habitation

Figure 14 : Extrait de l'arrêté du 25 avril 2003 concernant les temps de réverbération dans les locaux d'enseignement

En théorie, la formule de Sabine pourrait être utilisée (figure 15) pour calculer les temps de réverbération des salles. Cependant, les conditions d'utilisation de cette formule supposent que l'on se trouve en champ diffus et que les matériaux absorbants, que l'on cherche généralement à quantifier, soient répartis de manière homogène dans la salle : ces conditions ne sont pratiquement jamais réunies. Des objectifs réglementaires ont donc été fixés pour correspondre à un confort acoustique et standardiser les temps de réverbération dans les locaux particuliers cités précédemment.

$$T_{r60} = \frac{0,16 V}{A}$$

T_{r60} , temps de réverbération en seconde ;
 V , volume du local en m³ ;
 A , aire d'absorption équivalente en m², égale à la surface des matériaux composant les parois multiplié par leur coefficient alpha Sabine.

Figure 15 : Formule de Sabine

Voici le déroulement d'une simulation que j'ai effectué pendant mon stage. Pour commencer, avant d'utiliser le logiciel CATT-Acoustic, on modélise la salle dont on souhaite optimiser le temps de réverbération, parfois aussi son mobilier, le tout à l'aide du logiciel Sketch Up (figure 16). Une fois la modélisation du bâtiment terminée, il faut déterminer quels matériaux seront utilisés (murs, sol, plafond, panneaux muraux, mobilier...). Le choix du matériau à une importance non négligeable puisque chaque matériau possède des propriétés d'absorption qui lui sont propres et qui vont influencer le résultat final. Sous Sketch Up, les matériaux sont définis par leur couleur. Enfin, nous ajoutons une à deux sources omnidirectionnelles à un tiers et deux tiers de la diagonale de la salle modélisée et à environ 1m40 de hauteur (hauteur d'un humain debout) afin de correspondre aux directives des normes de mesure in situ (NF S 31 057). Il est aussi nécessaire d'ajouter des récepteurs, dont le nombre dépend de la surface au sol de la salle, à 1m20 de hauteur (humain assis).

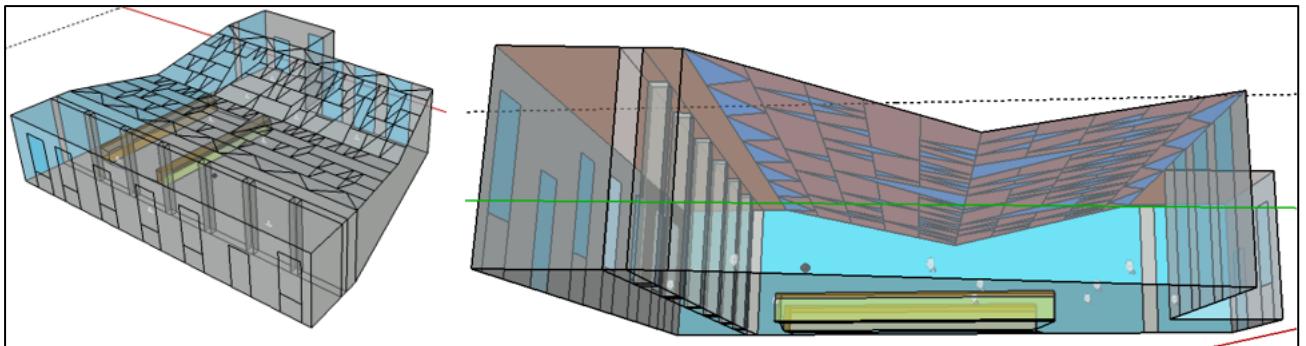


Figure 16 : Modélisation d'un réfectoire de groupe scolaire o-à l'aide du logiciel Sketchup

Euphonia, la société en charge de la distribution de CATT-Acoustic et des formations, a également développé un plug-in intégrable à Sketch Up s'intitulant Sk2Geo et permettant d'exporter la géométrie du modèle, ses matériaux (repéré dans le code grâce à leur couleur), la position des sources et celle des récepteurs. Ces fichiers exportés sont composés de lignes de codes permettant de contrôler les différents paramètres de la simulation.

Dans le fichier matériaux (.MAT) par exemple, on peut ajouter de nouveau matériaux au besoin, renseigner un coefficient de diffusion pour tel ou tel matériaux... Au sein de l'entreprise, nous avons un fichier matériau que nous modifions selon les besoins de chaque projet. En effet, le type de matériau choisi dépend de la demande de l'architecte et du cahier des charges à respecter pour atteindre les exigences des textes pris en référence. En mural, par exemple, on peut utiliser des panneaux de bois micro-perforés ou de laine de bois associée à de la laine minérale.

Une fois ces fichiers exportés dans un nouveau dossier, on peut lancer le logiciel CATT-Acoustic qui nous présente le local modélisé (figure 17). Les points rouges représentent les sources et les points bleus correspondent aux récepteurs. Dans un premier temps, il faut régler les paramètres de l'environnement (température, humidité...) ainsi que les coefficients de diffusion par défaut. Passés les réglages pour faire fonctionner le modèle, on peut lancer un premier calcul qui consiste en une réponse impulsionnelle sur un petit nombre de tir de rayon (environ 3000). Le résultat du temps de réverbération ainsi obtenu donne une première approximation du résultat final et permet de déterminer le nombre de rayons à utiliser pour la simulation suivante.

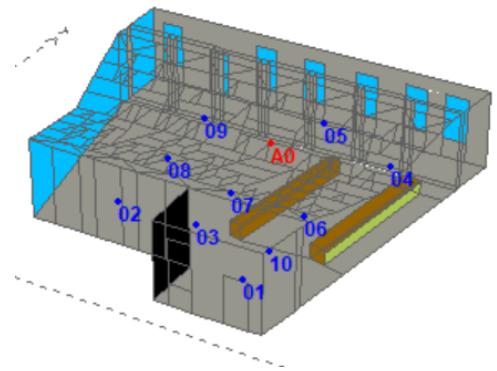


Figure 17 : Modélisation du réfectoire sous le logiciel CATT, en rouge la source, en bleu les récepteurs

Au lancement de la simulation s'ouvre une deuxième fenêtre. Dans cette fenêtre, trois types de simulations s'offrent à nous : un calcul rapide avec une auralisation basique, un calcul de longueur moyenne avec une auralisation détaillée et un troisième calcul encore plus long et détaillé. On choisit généralement le deuxième calcul qui est un bon compromis pour obtenir un résultat proche des conditions réelles.

Voici le type de graphique (figure 18) qu'il est possible d'obtenir après simulation. Les textes réglementaires et normatifs ainsi que les référentiels environnementaux prennent en compte les valeurs des temps de réverbération (T30) pour les fréquences 500, 1000 et 2000 Hz. C'est pourquoi nous nous y intéressons plus particulièrement. Cette simulation traitait un réfectoire dont l'objectif de temps de réverbération fixé par la réglementation est 1,2 secondes.

La simulation a donc permis de définir les quantités de matériaux absorbants nécessaires pour respecter la réglementation qui seront transmises au bureau d'architectes.

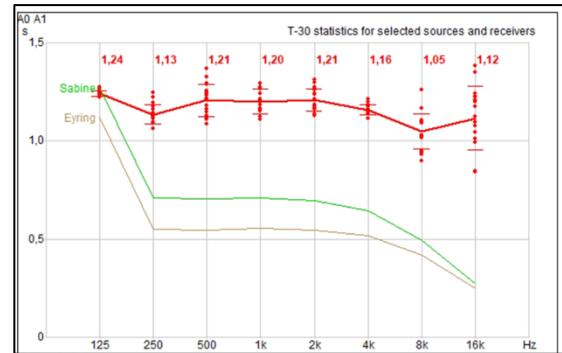


Figure 18 : Résultats d'une simulation CATT : temps de réverbération d'un réfectoire

Dans le cas où le résultat de la simulation aurait donné un temps de réverbération moyen trop éloigné de la réglementation, il aurait fallu ajouter ou retirer des matériaux absorbants. Dans l'exemple ici présent, la majorité des murs étaient des baies vitrées. Le plafond quant à lui était également en verre avec un design particulier, ce qui ne permettait pas de le recouvrir entièrement de matériau absorbant. Il a donc fallu trouver une solution alternative pour diminuer le temps de réverbération. Mon tuteur a donc proposé de traiter une partie du mobilier, notamment les selfs, présents dans le réfectoire. Cela a permis d'atteindre l'objectif souhaité sans dénaturer la volonté architecturale.

3) Mesures in-situ

Pour attester de la conformité d'un bâtiment au regard des référentiels acoustiques ou simplement effectuer un diagnostic pour caractériser l'état acoustique actuel d'un bâtiment, des mesures in-situ (sur site) sont réalisées. Ces mesures sont réalisées dans le cadre des mesures avant-travaux, des suivis de chantier, des réceptions de chantier et des diagnostics. Par exemple, les bâtiments d'habitation ont besoin d'une attestation acoustique après travaux pour valider la conformité des logements.

Pour le **suivi de chantier** des bâtiments d'habitation, les mesures sont réalisées dans les logements témoins, qui sont des logements finalisés avant la réception du bâtiment pour y effectuer des tests et des visites. Ces mesures dans les logements témoins permettent soit de valider les travaux encore en cours au regard des normes acoustiques, soit de déceler des anomalies et de les faire modifier avant la réception des logements. Elles sont également applicables aux projets concernant des bureaux.

Au cours des **réceptions de chantiers** de bâtiments d'habitation, un certain nombre de logements sont choisis pour leurs caractéristiques (présence d'un écoulement de chasse d'eau, cuisine ouverte, VMC...). Elles sont réalisées lorsque les bâtiments sont pratiquement finis car la pose des joints au niveau des portes palières et des extensions sur les entrées d'air des coffres de volets roulants sont des travaux de fin de chantier et jouent un rôle déterminant dans les mesures d'isolation.

La réglementation fixe des valeurs d'isolation à respecter en fonction de la position de la pièce dans l'appartement (séparée par une porte palière par exemple) mais également en fonction du type de pièce.

Au cours de mon stage, la majorité des mesures auxquelles j'ai participé se sont déroulées dans des bâtiment d'habitation du fait du partenariat du bureau d'étude avec le promoteur immobilier Altarea COGEDIM.

a- Mesures d'isolation au bruit aérien

Les mesures d'isolation au bruit aérien sont réalisées entre des locaux mitoyens ou superposés. Pour réaliser des mesures d'isolation au bruit aérien (figure 19), on place la source sonore dans la salle d'émission, à un tiers de la diagonale de la pièce, en direction de l'angle opposé à la salle de réception. Le bruit émis est un « bruit rose » qui est un signal aléatoire dont la densité spectrale est constante par bande d'octave.

La personne avec le sonomètre fait une première mesure de quinze secondes dans la salle d'émission (niveau sonore « L1 ») puis se déplace dans la salle de réception pour répéter l'opération (niveau sonore « L2 »).

La source est ensuite éteinte pour pouvoir réaliser une mesure du temps de réverbération de la salle de réception : pour cela, on explose un ballon afin de mesurer la durée que met le son à décroître de 30dB par rapport à son niveau d'origine, au perçage du ballon (« T30 »).

Enfin, toujours dans la salle de réception, on mesure le niveau sonore du bruit de fond qui sera utile pour le calcul de l'isolation acoustique standardisé au bruit aérien du local de réception. La figure 20 schématise la propagation du bruit entre deux locaux et les mesures qui y sont effectuées.



Figure 19 : Source sonore

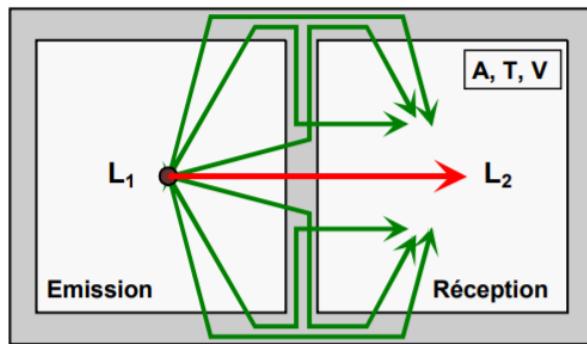


Figure 20 : Transmissions directes, latérales et parasites à travers une cloison entre deux logements

b- Mesures d’isolation de façade

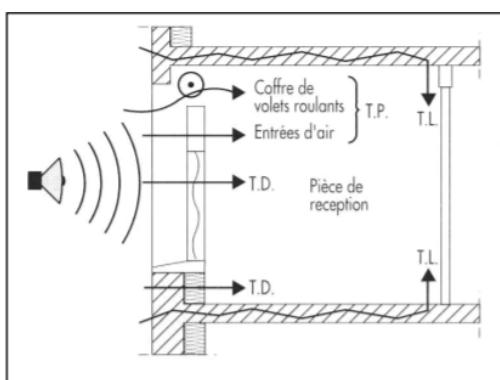


Figure 23 : Transmissions directes, latérales et parasites à travers une façade

Les mesures d’isolation de façade sont similaires aux mesures d’isolation au bruit aérien (figure 21). En effet, on place la source à l’extérieur du local à une distance de sept mètres de la façade inclinée d’un angle de 45°. Le microphone du sonomètre doit être placé à deux mètres de la façade pour réaliser la mesure du premier niveau sonore L1. On se place ensuite au milieu du local de réception pour mesurer le second niveau sonore L2. On effectue, comme précédemment, des mesures de temps de réverbération et de bruit de fond à l’intérieur du local de réception.

Les objectifs d’isolation de façade à respecter sont déterminés au début du projet en fonction du classement sonore : ils dépendent de l’impact des voies classées à proximité du projet (cf. Classement sonore 2)a) et Objectifs d’isolation de façade 2)b)).

c- Mesures d’isolation aux bruits de chocs



Figure 22 : Machine à chocs normalisée

Les bruits de chocs sont simulés à l’aide d’une machine à chocs normalisée. Cette machine est composée de cinq marteaux qui frappent le sol à tour de rôle (figure 22).

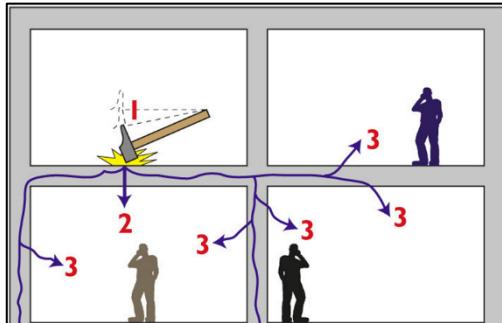


Figure 23 : Transmissions acoustiques des bruits de chocs

La machine à chocs est placée au centre du local d'émission (figure 23). Contrairement aux mesures d'isolement au bruit aérien entre logements, on ne mesure que le niveau sonore dans le local de réception (L2). Après l'arrêt de la machine, on mesure à nouveau le temps de réverbération du local ainsi que le niveau sonore du bruit de fond.

d- Mesures des bruits d'équipements

Au sein des logements, les bruits d'équipement comme la chaudière, la VMC ou les écoulements d'eau sont réglementés. En fonction du type d'équipements et de la pièce de réception, l'objectif acoustique diffère.

Pour effectuer une mesure de bruit d'équipement, on réalise une mesure du niveau de bruit lorsque l'équipement est en fonctionnement puis on mesure le temps de réverbération de la pièce dans laquelle on a effectué la mesure afin de pouvoir calculer notre niveau sonore de bruits d'équipements L_{nAT} .

e- Récapitulatif de la réglementation sur les bâtiments d'habitation

Bruit Aériens Isolement acoustique standardisé pondéré (en Décibels) $D_{nT,A}$	Local d'Émission	Local de Réception	
		Chambre et Séjour	Cuisine Salle d'eau
		$D_{nT,A}$ (dB)	
Bruit de chocs Niveau de pression standardisé pondéré $L'_{nT,A}$	Locaux d'un logement à l'exclusion des garages individuels & Circulation commune intérieure au bâtiment	53	50
		55	52
		58	55
Bruit d'équipements	Tous les Locaux	$L'_{nT,A}$ (dB)	
		58	58
Bruit d'équipement individuel	Autre Logement	30	35
	Même Logement	35	50
Bruit d'équipement collectif	Ventilation mécanique	30	35
	chaufferies, Ascenseurs,....	30	38

Figure 24 : Réglementation acoustique pour les logements

f- Stations de mesures

Dans le but de caractériser l'environnement sonore du projet, il est parfois nécessaire de mesurer le niveau de bruit à proximité du projet pendant plusieurs jours (figure 25, droite). On utilise ainsi des stations de mesures composées d'une batterie, à laquelle est branchée le sonomètre afin qu'il reste allumé pendant deux à trois jours. Le sonomètre est lui-même relié à l'aide d'un câble à son microphone, placé à l'intérieur d'une bonnette tout-temps pour le protéger de la pluie, à une hauteur environ égale à 1m40. La batterie et le sonomètre sont placés dans une mallette étanche qui est cadenassée à un élément de l'environnement pour éviter tout vol.

L'objectif de ces mesures est de déterminer quels sont les niveaux sonores à respecter afin que les futures installations ou les chantiers ne perturbent pas de manière trop importante le voisinage. La réglementation fixe, pour les installations classées, des niveaux sonores limites admissibles par le voisinage et un niveau maximal d'émergence du bruit des installations par rapport au bruit résiduel. L'émergence est une modification temporelle du niveau ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier. Il s'agit de la différence arithmétique entre le bruit ambiant et le bruit résiduel. Cette émergence globale doit être de 5dB(A) maximum en journée (3dB(A) pour les établissements diffusant de la musique amplifiée) et de 3dB(A) maximum la nuit. Pour les établissements diffusant de la musique amplifiée, comme les bars, une étude d'impact décrivant les niveaux maximums à l'émission permettant le respect de la réglementation est obligatoire. Les émergences réglementaires sont, en plus de l'exigence globale, définies par bande de fréquence.



Figure 25 : A gauche : Sonomètre sur pied pour point de mesure de trente minutes ; A droite : Station de mesure

Lorsqu'il n'est pas possible de poser une station de mesure (par exemple lorsque l'accès au lieu souhaité est impossible), on réalise des points de mesures ponctuels d'une durée approximative de trente minutes chacun (figure 25, gauche). L'objectif de ces points de mesure est le même que celui des stations de mesure mais il est moins représentatif de l'environnement sonore en raison de sa courte durée.

g- Mesures de vibrations

Lorsqu'un projet est situé proche d'une ligne de tramway, train, métro ou d'un axe routier important, on réalise des mesures de vibrations pour étudier l'impact de la voie concernée sur le sol du projet à venir.

L'appareil de mesure est un accéléromètre composé de 3 axes (figure 26). A chaque fois que les vibrations dépassent un palier, l'accéléromètre enregistre une mesure à un temps donné. Parallèlement, les techniciens réalisant la mesure notent l'horaire de chaque événement pouvant provoquer des vibrations afin de pouvoir analyser correctement les mesures fournies par l'accéléromètre et mettre en évidence les facteurs aggravants. Dans le cas où les mesures révèleraient que les vibrations provoquées par la voie proche du projet sont gênantes vis-à-vis des normes de référence, une désolidarisation du projet sera proposée sans être obligatoire, en utilisant par exemple des plots anti-vibratiles. En effet, aucune réglementation ne traite des vibrations, il n'y a donc aucune prescription obligatoire.



Figure 26 : Accéléromètre connecté à l'ordinateur pour une mesure de vibration

Au cours de mon stage, nous avons effectué une mesure de vibrations au niveau d'une maison située non loin d'une ligne de tramway. Cette maison allait être démolie pour y construire à la place un immeuble. Une première mesure de vibrations a donc été effectuée dans la cour intérieure de la maison puis une deuxième à quelques mètres de la ligne de tramway, là où allait se construire la deuxième partie du projet. A chaque passage de tramway, nous notions l'heure et la direction du train afin de corrélérer l'évènement avec les mesures réalisées et évincer les vibrations produites par autre chose que le tramway (camions, voitures ...) qui perturbent la mesure et n'impacte en réalité pas vraiment le projet. De manière générale, les vibrations provoquent une gêne qui est due à la sensation de vibration dans le logement, mais également au bruit occasionné par cette vibration qui s'intensifie en montant dans les étages.

h- Rapports de mesures

A chaque session de mesure, il est nécessaire d'extraire les résultats du sonomètre et de faire des rapports qui permettront à l'ingénieur de juger de la qualité acoustique du projet et d'en informer le client. Il existe différents types de dépouillement en fonction du type de mesure. On distinguera les bruits d'équipements (VMC, chaudières, ascenseurs...), les mesures d'isolements entre locaux (bruit aérien, façade, bruit de choc), les temps de réverbérations et les stations de mesure. Pour toutes ces mesures, on commence par exporter les mesures enregistrées sur la carte SD du sonomètre à l'aide du logiciel NorXfer. Ce logiciel permet également d'exporter les mesures des temps de réverbération réalisées dans un rapport Excel.

Pour les mesures de **bruits d'équipement**, on utilise ensuite le logiciel NorReview qui est directement relié à un rapport Excel pré rempli par l'entreprise. Après avoir sélectionné les mesures de niveau de bruit de chaque équipement et après leur avoir associés leurs temps de réverbération respectifs exportés lors de la première étape, on obtient le L_{nAT} et le graphique correspondant (figure 27).

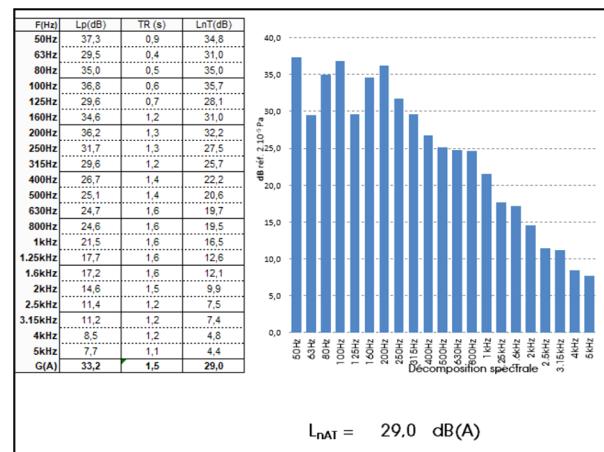


Figure 27 : Rapport de bruit d'équipement

Pour les mesures d'**isolement aérien entre locaux**, on utilise le logiciel NorBuild. Au cours des mesures d'isolement normalisé entre locaux, il est nécessaire de réaliser quatre mesures différentes : une mesure dans la salle d'émission (L1), une mesure dans la salle de réception (L2), une mesure du temps de réverbération de la pièce de réception (Tr) et une mesure du bruit de fond, toujours dans la pièce de réception (Lb). A la fin de chaque mesure d'isolement, une commande sur le sonomètre permet directement de stocker ces quatre mesures simultanément dans un nouveau fichier. En exportant ce fichier dans le logiciel NorBuild, et grâce aux rapports Excel construits par l'entreprise et directement reliés au logiciel, on obtient l'isolement acoustique standardisé $D_{nT,A}$ (figure 28).

Les mesures d'**isolement au bruit de choc** sont similaires mais ne nécessitent pas la mesure dans la salle d'émission car les chocs produits par la machine à chocs sont déjà normalisés.

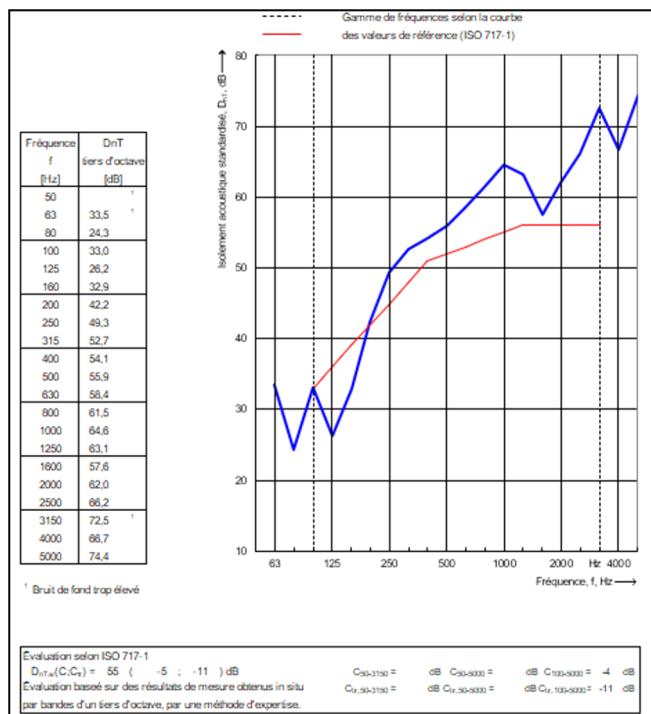


Figure 28 : Rapport d'isolement au bruit aérien

Enfin, les mesures obtenues grâce aux **stations** s'étendent sur plusieurs jours. Pour pouvoir les exploiter, il faut partitionner la mesure en fonction des périodes diurnes (7h-22h) et des périodes nocturnes (22h-7h). L'objectif est ensuite de déterminer la demi-heure la plus silencieuse parmi les périodes diurnes et parmi les périodes nocturnes. Comme pour les autres types de mesures, un rapport est ensuite rédigé.

III – Étude des solutions bois

Avec la révolution écologique en cours, le marché français de la construction bois s'est largement développé. Depuis le début des années 2000, l'essor du bois d'ingénierie a permis d'augmenter sensiblement le nombre de projets réalisés en bois. Plus récemment, le chiffre d'affaires réalisé en construction bois en 2018 était en hausse de 13% par rapport à 2016.

Une réduction des coûts grâce à des temps de construction courts et une préfabrication précise, une utilisation de matières premières renouvelables avec un bilan carbone négatif et un faible poids des matériaux sont autant de caractéristiques de la construction bois qui ne peuvent pas être négligées.

Néanmoins, les caractéristiques acoustiques du bois sont bien différentes de celles des matériaux habituels (béton, plâtre...). En basses fréquences notamment, le bois est problématique car il ne permet pas à lui seul d'obtenir une bonne isolation aux bruits de chocs. De plus, les exigences imposées aux projets de construction n'ont cessé de croître ces dernières années, les constructions bois étant particulièrement innovantes.

Dans un premier temps, nous chercherons donc à détailler la théorie utilisée pour calculer les indices d'isolement acoustique pour des bâtiments en bois et nous constaterons son application. Nous détaillerons ensuite la construction de la base de données avec la création et l'automatisation d'un outil de recherche associée et terminerons par la présentation de la modélisation d'un bon nombre de références bois dans le logiciel AcouS-STIFF.

1) Études menées et projets existants

a- Étude ACOUBOIS

Alertée par de nombreuses remontées de terrain relatives à des difficultés pour prescrire des solutions constructives bois, la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP), en partenariat avec la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN), ont lancé, courant 2009, une analyse normative et réglementaire afin d'identifier les freins existants. Cette analyse, mise en œuvre par Synerbois (rassemblant FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)), a permis de définir des actions prioritaires à étudier dans les rapports ACOUBOIS (figure 29).

L'étude propose aux concepteurs une approche prédictive pour estimer la performance d'un bâtiment en termes d'isolement au bruit aérien et au bruit d'impact à l'intérieur des édifices. Une partie de l'objectif de l'étude ACOUBOIS est d'élaborer des méthodes simplifiées d'évaluation de la qualité acoustique intérieure des bâtiments en bois au regard de la réglementation en vigueur et des exigences de qualité (thermique, feu, structure...).

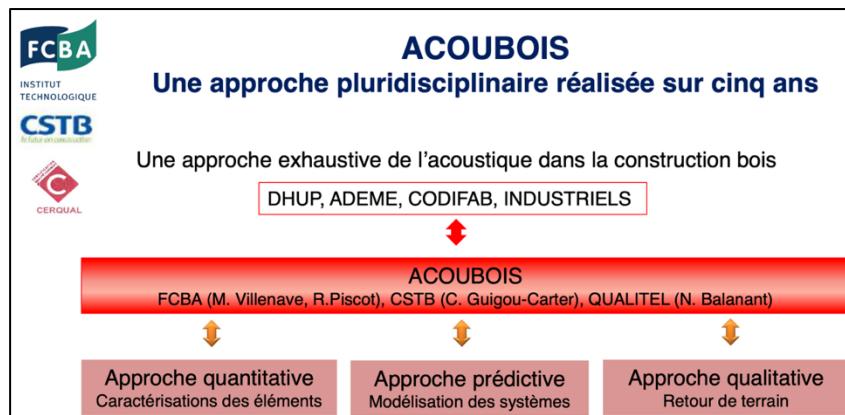


Figure 29 : Diapositive de la présentation de l'étude ACOUBOIS

Les résultats de ce travail ont été restitués dans cinq rapports et une synthèse établissant une cartographie précise des performances acoustiques de la construction bois.

Au cours de mon stage, j'ai pu parcourir l'ensemble des rapports ACOUBOIS et trois d'entre eux ont attiré mon attention.

Le rapport de mesure en laboratoire, sur lequel nous reviendrons plus en détail, est composé d'un grand nombre d'essais sur des configurations de planchers, façades, parois séparatives et toitures différentes. Le rapport de mesures in-situ est similaire au précédent. Cependant, il ne m'a pas servi dans la construction de la base de données. En effet, il regroupe les performances d'isolement entre locaux ($D_{nT,w}$ et $L_{nT,w}$) et non les indices d'affaiblissement acoustiques de chaque solution ($R_w(C; C_{tr})$). Il n'était donc pas intéressant dans le cadre de mon étude car les mesures in-situ dépendent de la géométrie des locaux, de leur acoustique interne et des différentes transmissions qui sont difficilement quantifiables alors que la base de données ne regroupait que les performances d'affaiblissement des éléments de construction.

Enfin, le rapport de méthodes et prédictions a été particulièrement intéressant. Ce rapport traite de la théorie utilisée pour quantifier les indices d'affaiblissement acoustique des solutions et sa partie sur l'influence des jonctions entre les panneaux de bois m'a permis de comprendre l'importance de leur influence. Elle introduit un problème majeur rencontré dans les constructions bois lié aux transmissions latérales. L'indice R_A caractérisant l'indice d'affaiblissement d'un élément, l'indice $K_{i,j}$ est comparable à cet indice pour les jonctions entre plusieurs éléments. Cet indice est ainsi particulièrement intéressant dans le cadre des transmissions latérales, problème traité dans le paragraphe suivant.

b- Problèmes rencontrés dans les constructions en bois

De manière générale, les solutions bois pour l'isolation sonore présentent des faiblesses acoustiques en basses fréquences. En dessous de 100 Hz, les bruits de chocs, et plus particulièrement les chocs mous tels que les bruits de pas, provoquent des transmissions élevées à la structure. De même, les bruits structuraux d'équipements sont plus audibles dans les constructions en bois. Aujourd'hui, les exigences en matière de bruit de choc ne prennent en compte que les fréquences comprises entre 100 et 3150 Hz soit une plage que l'oreille humaine perçoit et il n'existe aucune méthode de calcul standardisé pour quantifier le bruit de choc en dessous de 100 Hz.

Pour pallier au problème d'isolation en basse fréquences, la première initiative d'un acousticien est d'augmenter l'épaisseur du plancher. En effet, d'après la loi de masse, cela permettrait d'augmenter drastiquement l'isolement en basses fréquences. Cependant, il n'est pas permis de faire des planchers trop épais, qui provoqueraient notamment la perte d'un étage sur un projet multi-étage. Des innovations techniques tel que le CLT (Cross Laminage Timber, figure 30), un bois reconstitué collé à 90°, ont ainsi fait leur apparition. Combiné à des éléments de désolidarisation, le CLT, qui est un matériau léger et fin, a permis d'envisager des constructions de grande ampleur. Le CLT est principalement utilisé pour les planchers, les murs et les toitures des bâtiments de moyennes et grandes hauteurs. D'autres innovations dans les produits en bois ont fait leur apparition. On pourra citer : les poutres en bois massif abouté (BMA), les poutres en bois massif reconstitué (BMR), le bois brut sec (BBS), le bois raboté sec (BRS) dont les utilisations sont plutôt concentrées sur les charpentes et les ossatures car elles mobilisent essentiellement des poutres, des solives, des montants...



Figure 30 : Panneau de CLT

L'évocation du CLT permet d'aborder le second problème majeur rencontré lors des constructions en bois : les transmissions latérales. En effet, en plus de la transmission directe par le séparatif lui-même, une partie non négligeable de l'énergie acoustique est également transmise par les composants adjacents, appelés jonctions mur-plancher. Les transmissions filantes sont difficilement quantifiables au sein des bâtiments en bois et particulièrement amplifiées par les éléments filants.

La valeur d'isolation par zones de choc $K_{i,j}$ (figure 31) joue ainsi un rôle décisif dans la transmission par les voies latérales. Plus sa valeur est élevée, moins le son est transmis par la jonction

$$K_{ij} = D_{v,ij} + 10 \log \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right)$$

$D_{v,ij}$ différence de niveau de vitesse moyenne entre le composant récepteur et le composant émetteur, en dB
 l_{ij} longueur du côté commun des composants récepteur et émetteur, en m
 a_i longueur d'absorption équivalente du composant récepteur, en m
 a_j longueur d'absorption équivalente du composant émetteur, en m

Figure 31 : Formule de $K_{i,j}$

De fait, pour désolidariser un bâtiment en bois, deux solutions sont couramment utilisées. La première consiste à réaliser des coupures physiques avec des doublages de paroi pour améliorer les isolements aux bruits de chocs. Dans le paragraphe suivant, nous constaterons que de nombreux projets en bois sont préfabriqués puis assemblés sur le chantier, pour atteindre une isolation acoustique satisfaisante. Ce type de fabrication permet également de construire des bâtiments de grande hauteur.

La seconde, consiste à utiliser des solutions désolidarisantes anti-vibratiles. Le leader dans le domaine, Getzner, propose différents produits. Par exemple, la gamme de bandes Sylodyn (figure 32) est constituée de matériau polyuréthane à cellules fermées doté de propriétés élastiques exceptionnelles. Ces propriétés les rendent particulièrement adaptés au découplage des vibrations et du bruit.



Figure 32 : Pose de bande Sylodyn sur plancher

c- Les constructions existantes

Comme nous allons le voir, quelques bâtiments en bois ont déjà vu le jour ces dernières années. Le taux d'opérations en bois présentant des non-conformités avant la réception est d'environ 30%, ce qui est équivalent aux autres types de constructions en matériaux standards. De manière générale, les opérations à ossatures bois ne présentent pas plus de non-conformités que les bâtiments courants à structures lourdes. Les bâtiments en bois, même s'ils sont plus chers à la construction et nécessitent plus d'études en amont sont donc destinés à se faire une place importante dans le monde du bâtiment du fait de leur indice carbone bas et de leur durabilité.

Mjøstårnet : Livrée le 15 mars 2019 à Brumunddal en Norvège, la tour culmine à 85,4 m (figure 33). L'objectif d'un projet en bois comme celui-ci est de s'inscrire dans une politique durable. Ainsi, un maximum de bois produit localement a été utilisé : les éléments en lamellé-croisé et en CLT viennent de Norvège tandis que le reste des panneaux bois proviennent de forêts Finlandaises. Au total, la tour contient 2600m³ de structure bois. Les sols des étages 2 à 11 sont réalisés en modules bois préfabriqués et ceux des étages 12 à 18 sont en béton de 300mm d'épaisseur pour alourdir la structure et minimiser sa prise au vent. Pour l'isolation acoustique, les sols en bois utilisent ainsi le principe masse-ressort car ils sont remplis de laine de roche alors qu'à partir du douzième étage, c'est la loi de masse qui prend le relai avec des sols remplis de béton.



Figure 33 : Tour Mjøstårnet en Norvège, 2019

Sensation : Livrée le 11 juin 2019 à Strasbourg, la tour Sensation (figure 34) est la plus haute tour de logements en bois en France. Le projet culmine à 38 mètres de hauteur et comprend 146 logements et commerces répartis en 2 immeubles de 8 à 11 étages. A l'exception du rez-de-chaussée constitué de béton, l'ensemble des trois bâtiments est totalement construit en CLT et matériaux naturels biosourcés. On compte un total de 3500m³ de bois utilisé pour ériger ce projet.



Figure 34 : Tour Sensation à Strasbourg, 2019

Caserne de pompiers : Au cours de mon stage, j'ai eu l'occasion de faire des mesures de réception dans une caserne de pompiers entièrement réalisée en bois. La réception n'a pas révélé de non-conformité particulière, une nouvelle preuve de l'essor du bois dans la construction. La salle de sport de la caserne (figure 35) avait préalablement été modélisée sous le logiciel CATT-Acoustic du fait de son architecture particulière. Ses murs et son plafond ont ainsi entièrement été recouverts de panneaux de bois micro-perforés pour assurer des performances acoustiques optimales notamment au niveau du temps de réverbération.



Figure 35 : Salle de sport et une des chambres de la caserne de pompier

W350 : Le Japon prévoit de construire une tour culminant à 350 mètres de hauteur pour 2041 (figure 36). Le défi lancé pour cette tour se trouve dans sa composition : 90% de bois pour 10% d'acier. Un ratio 9 : 1 sans aucune trace de béton et de l'acier utilisé entre autres pour les jonctions et la visserie. Avec un total de 70 étages comprenant logements, bureaux, commerces et hôtels, cette tour est un défi à toutes les échelles, autant sur les plans acoustiques et thermiques qu'architecturaux.

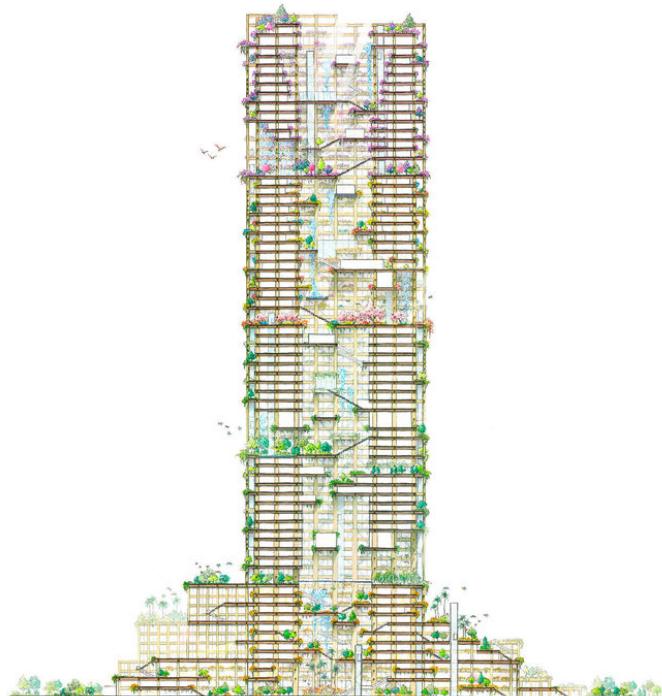


Figure 36 : Tour W350 au Japon, 2041

2) Construction d'une base de données automatisée

Au vu de l'essor des bâtiments en bois, les ingénieurs du bureau d'études Altia Acoustique souhaitaient avoir à portée de main un outil, une base de données leur permettant de consulter les solutions existantes. J'ai ainsi choisi d'utiliser le logiciel Excel pour rassembler toutes les données accumulées au cours de mes recherches. Par la suite, j'ai découvert le code VBA (Visual Basic for Applications) intégré au logiciel Excel et automatisé un outil de recherche. Afin d'optimiser les temps de recherches dans la base de données, cette dernière a été séparée en quatre fichiers Excel indépendants regroupant successivement les murs, les façades, les toitures et les planchers. Pour la présentation de ce travail, nous nous concentrerons sur le fichier Excel concernant les murs et évoquerons le codage de l'outil de recherche des planchers, plus poussé que pour les autres fichiers.

a- Construction de la base de données

Pour commencer cette base de données, de nombreuses recherches ont été nécessaires. Comme nous avons pu le voir précédemment, à l'heure actuelle, peu d'études acoustiques ont été menées sur les solutions bois. A l'aide de mes recherches et des connaissances de mes collègues, j'ai pu élire plusieurs recueils regroupant de nombreuses solutions bois en termes de façades, toitures, sols et parois séparatives.

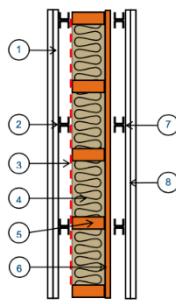
Le premier rapport est le rapport ACOUBOIS : « Mesures acoustiques en laboratoire » qui a précédemment été évoqué (figure 37). Réalisé en 2014, ce rapport liste les procédés et produits participant à la qualité acoustique des bâtiments collectifs d'habitations à ossature bois. Il détermine l'indice d'affaiblissement acoustique R_w ($C ; C_{tr}$) des différentes parois et les niveaux de bruit de choc sur les différents planchers.

Config	Date essai	Parement	Ossature	Contreventement	Ossature	Isolant	Contreventement	Ossature	Parement	Observations	R _A
PAROI SEPARATIVE - Famille 1 : Ossature primaire simple											
1	18/10/11	2 BA 13 Std	R36-M36	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	ISOCONFORT35 100 mm	-	R36-M36	2 BA 13 Std	-	58 dB
2	19/10/11	2 BA 13 dB	R36-M36	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	ISOCONFORT35 100 mm	-	R36-M36	2 BA 13 dB	-	62 dB
3	19/10/11	2 BA 13 dB	R36-M36	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	ISOCONFORT35 100 mm	-	R36-M36	2 BA 13 dB	1 prise + 1 interrupteur par salle	62 dB
4	20/10/11	2 BA 13 Std	Bois 27 x 50 mm	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	ISOCONFORT35 100 mm	-	Bois 27 x 50 mm	2 BA 13 Std	-	44 dB
5	21/10/11	2 BA 13 Std	Bois 27 x 50 mm	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	MB-ROCK 95 mm	-	Bois 27 x 50 mm	2 BA 13 Std	-	44 dB
6	21/10/11	2 BA 13 Std	Bois 27 x 50 mm	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	MB-ROCK 95 mm	-	Bois 27 x 50 mm	2 BA 13 Std	1 prise + 1 interrupteur par salle	45 dB
7	24/10/11	2 BA 13 Std	Bois 27 x 50 mm	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	MB-ROCK 95 mm	OSB 12 mm	Bois 27 x 50 mm	2 BA 13 Std	-	44 dB
8	25/10/11	2 BA 13 Std	Bois 27 x 50 mm	OSB 12 mm	Simple 100 x45 mm	ISOCONFORT35 100 mm	OSB 12 mm	Bois 27 x 50 mm	2 BA 13 Std	-	44 dB

Figure 37 : Extrait du tableau récapitulatif des essais sur les murs (parois séparatives)

Le second rapport utilisé m'a été proposé par mon tuteur Erwan GOUEROU et Axelle BOISSIERE. Il s'agit du rapport Référentiel Qualitel Acoustique 2020 (RQA) (figure 38). De manière générale, ce rapport s'appuie sur les résultats de l'étude ACOUBOIS mais il propose également d'autres configurations qui ont permis d'étoffer les données.

8.11.1 MOB 1 – Mur simple ossature : $[R_w + C]_{base} = 58 \text{ dB}$



Mur simple ossature

1. Parements constitués de 2 BA13, ou
 - 1 BA13 $\Delta[R_w+C] = -2 \text{ dB}$
 - 1 BA13 dB : $\Delta[R_w+C] = -1 \text{ dB}$
 - 1 BA15 F : $\Delta[R_w+C] = -2 \text{ dB}$
 - 1 BA18 : $\Delta[R_w+C] = +1 \text{ dB}$
 - 2 BA18 : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
 - 2 BA13 dB : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
2. Montants métalliques de 36 mm minimum indépendants de l'ossature bois ménageant une lame d'air de 40 mm minimum, ou
 - Tasseaux horizontaux en bois de 25 mm minimum : $\Delta[R_w+C] = -5 \text{ dB}$
 - Tasseaux verticaux en bois de 25 mm minimum : $\Delta[R_w+C] = -7 \text{ dB}$
 - Laine minérale ou isolant bio-sourcé de 45 mm entre des ossatures métalliques de 48 mm: $\Delta[R_w+C] = +1 \text{ dB}$
3. Pare vapeur événuel
4. Isolant semi-rigide en laine minérale ou isolant bio-sourcé d'épaisseur égale à celle de l'ossature
5. Ossature bois 100x45 mm² minimum, avec entraxe de 400 mm minimum,
 - Ossature de 120 mm : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
 - Ossature de 145 mm : $\Delta[R_w+C] = +3 \text{ dB}$
 - Entraxe de 600 mm : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
6. Panneau de contreventement OSB 12 mm minimum
7. Montants métalliques de 36 mm minimum indépendants de l'ossature bois ménageant une lame d'air de 40 mm minimum, ou
 - Tasseaux horizontaux en bois de 25 mm minimum : $\Delta[R_w+C] = -5 \text{ dB}$
 - Tasseaux verticaux en bois de 25 mm minimum : $\Delta[R_w+C] = -7 \text{ dB}$
 - Laine minérale ou isolant bio-sourcé de 45 mm entre les ossatures métalliques de 48 mm: $\Delta[R_w+C] = +1 \text{ dB}$
8. Parements constitués de 2 BA13, ou
 - 1 BA13 dB : $\Delta[R_w+C] = -1 \text{ dB}$
 - 1 BA15 F : $\Delta[R_w+C] = -2 \text{ dB}$
 - 1 BA18 : $\Delta[R_w+C] = -1 \text{ dB}$
 - 2 BA18 : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
 - 2 BA13 dB : $\Delta[R_w+C] = +2 \text{ dB}$
 - 1 BA13 : $\Delta[R_w+C] = -2 \text{ dB}$

Il est possible de cumuler trois corrections, dont la somme sera plafonnée à $\Delta[R_w+C] = +7 \text{ dB}$

Figure 38 : Extrait du rapport RQA pour un Mur à Ossature Bois (MOB) Simple.

Enfin, le dernier rapport utilisé m'a été proposé par Guillaume BOURDIN. Il s'agit du Manuel Bois Massif (MBM) (figure 39) réalisé par le leader européen des produits en bois massifs Binder Holz. Également très complet, il propose une large gamme de solutions bois indépendantes de l'étude ACOUBOIS.

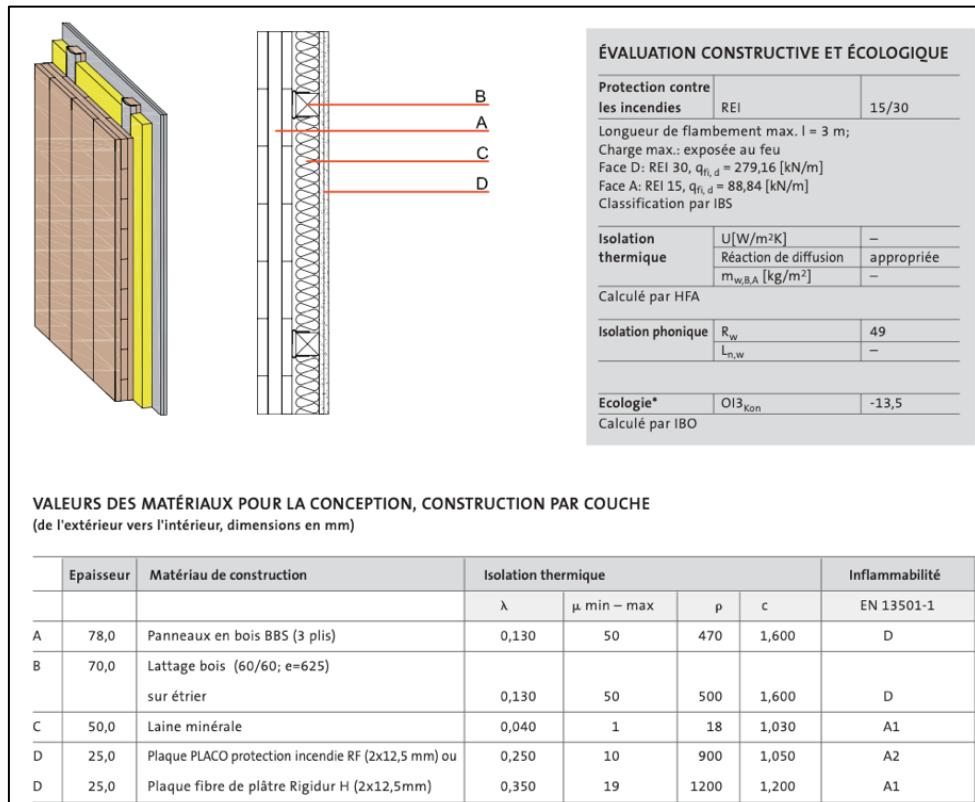


Figure 39 : Extrait du Manuel Bois Massif pour un Mur à Ossature Bois (MOB) Simple.

Les rapports étant choisis pour leur exhaustivité, chaque épaisseur de composant est précisée, parfois même la marque et le fabriquant du matériau dans le cadre de l'étude ACOUBOIS. Cela a permis de construire une base de données précise. Voici une capture d'une partie du fichier Excel concernant les murs (ou parois séparatives) (figure 40).

Catalogue	R_A	Type	Isolant	Parement int
ACOUBOIS	22	Simple_Ossature	Aucun_1	
ACOUBOIS	31	Simple_Ossature	SYLVACTIS55_FX100mm	
ACOUBOIS	31	Simple_Ossature	SYLVACTIS55_FX100mm	
ACOUBOIS	31	Simple_Ossature	ISOCONFORT35_100mm_1	
ACOUBOIS	42	Simple_Ossature	Laine de bois 100mm (SYLVACTIS55_FX 100mm)(p=50kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	43	Simple_Ossature	Laine de bois 100mm (SYLVACTIS55_FX 100mm)(p=50kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	44	Simple_Ossature	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	44	Simple_Ossature	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	44	Simple_Ossature	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm)(50kg/m3<p<70kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	44	Simple_Ossature	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm)(50kg/m3<p<70kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	58	Simple_Ossature	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	62	Simple_Ossature	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	53	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	1 BA13 Std
ACOUBOIS	54	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm)(50kg/m3<p<70kg/m3)	1 BA13 Std
ACOUBOIS	56	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	1 BA18 Std
ACOUBOIS	57	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm)(50kg/m3<p<70kg/m3)	1 BA18 Std
ACOUBOIS	58	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	59	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm)(50kg/m3<p<70kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	61	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 dB
ACOUBOIS	62	Ossature_Primaire_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA18 Std
ACOUBOIS	36	Ossature_Primaire_Double_contreventement_int	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	38	Ossature_Primaire_Double_contreventement_int	URSAFAACADE_100mm	2 BA18 Std
ACOUBOIS	49	Ossature_Primaire_Double_contreventement_int	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA18 Std
ACOUBOIS	54	Ossature_Primaire_Double_contreventement_int	Laine de verre 100mm (ISOCONFORT35 100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA18 Std
ACOUBOIS	56	Ossature_Primaire_Double_contreventement_int	Laine de verre 100mm (URSAFAACADE_100mm) (10kg/m3<p<20kg/m3)	2 BA18 Std
ACOUBOIS	34	Bois_Massif_contrecolles		
ACOUBOIS	54	Bois_Massif_contrecolles	Laine de verre 45mm (PAR_45mm) (10kg/m3<p<15kg/m3)	2 BA13 Std
ACOUBOIS	63	Bois_Massif_contrecolles	Laine de verre 45mm (PAR_45mm) (10kg/m3<p<15kg/m3)	2 BA13 Std
RQA	58	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosourcé épaisseur ossature	2BA13
RQA	56	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	1BA13
RQA	57	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	1BA13dB
RQA	56	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	1BA15F
RQA	57	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	1BA18
RQA	60	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	2BA18
RQA	69	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	2BA13dB
RQA	53	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	2BA13
RQA	51	Simple_Ossature	Semi-rigide laine minérale ou biosurcé épaisseur ossature	2BA13

Figure 40 : Extrait de la base de données concernant les parois séparatives

b- Zoom sur les composants d'une paroi séparative

Une paroi séparative peut être constituée de plusieurs manières. Nous étudierons ici deux cas principaux qui permettront de mieux comprendre comment se compose une paroi isolante d'un point de vue acoustique. Les choix des matériaux et de leur épaisseur dépendent toujours de la demande du client. De fait, il n'est pas toujours nécessaire d'avoir une solution avec un indice d'affaiblissement le meilleur possible. Cela explique pourquoi il existe de nombreux matériaux différents que nous citerons au cours de l'étude des composants et de nombreuses configurations différentes répertoriées dans la base de données.

La première paroi étudiée est une paroi quadruple extraite du rapport ACOUBOIS (figure 41). C'est-à-dire qu'elle est composée de trois compartiments contenant des matériaux poreux ou de l'air et quatre parements en BA13 et OSB.

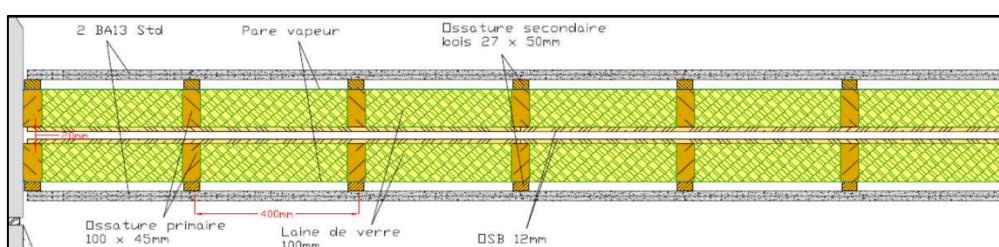


Figure 41 : Exemple de paroi séparative ACOUBOIS quadruple

Les plaques de **BA13 Std** sont des **plaques de plâtre** standard d'épaisseur 13mm qui constituent les **parements** intérieurs et extérieurs de la paroi. On peut aussi utiliser des plaques de **BA13 dB** qui sont des plaques de plâtre à hautes performances acoustiques. Ces plaques permettent un gain acoustique de +3dB par rapport au même ouvrage en plâtre standard. Elles sont utilisées sur certaines configurations mais ne sont pas toujours privilégiées car leur coût est plus élevé que les plaques de plâtre standard. Également, on constate que ces plaques de plâtre sont doublées pour augmenter l'effet de masse, ce qui n'est là encore, pas toujours le cas.

Cette configuration possède une **ossature bois primaire** et une **ossature bois secondaire**. L'ossature est un assemblage d'élément structuraux porteurs qui permet le renvoi des forces appliquées et conduit à l'équilibre de la construction. Elle confère à l'architecture le maintien des éléments non structuraux comme la toiture ou le garnissage des murs mais également sa solidité dans le temps et sa résistance aux sollicitations naturelles. Dans le cas présent, le fait d'avoir apposé deux ossatures différentes permet d'augmenter l'indice de désolidarisation. Des ossatures métalliques existent également et permettent d'obtenir un meilleur indice de désolidarisation. Il est possible d'avoir des solutions mixant les ossatures bois et les ossatures métalliques en tant qu'ossatures primaires ou secondaires.

Les **isolants** sont multiples : biosourcés (ouate de cellulose, fibres de chanvre, fibre de bois), minéraux (laine de verre ou de roche), plastique alvéolaire ou mousse PU dits isolants rigides. Les différents isolants sont choisis en fonction de leurs performances acoustiques, de leur coût et de leur durabilité. Dans le cas présent, une laine de verre a été choisie avec une masse volumique et une épaisseur spécifique. De manière générale, les isolants sont difficiles à modéliser car leurs caractéristiques mécaniques varient beaucoup en fonction du fabricant : la marge d'erreur est donc grande. Étant des matériaux poreux, l'isolant combiné à l'air jouent le rôle de ressort.

Enfin, les plaques d'**OSB** ou Oriented Strand Board sont aussi appelés panneaux de lamelles de bois orientées. Ce matériau résulte de l'assemblage de plusieurs lamelles de bois sous forme de couches successives qui sont compressées puis encollées dans le même sens à l'aide d'une résine synthétique et d'une cire. Dans la structure de la paroi, il s'agit ici de **contreventements**. Un contreventement est un système destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage en résistant aux efforts horizontaux et en s'opposant aux déformations latérales provoquées par ces efforts. L'OSB est un bon isolant phonique et permet de compartimenter la paroi quadruple en améliorant sa performance.

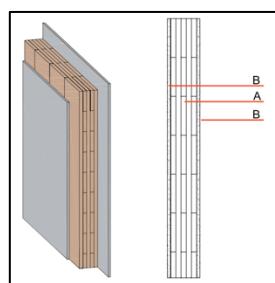


Figure 42 : Exemple de paroi séparative Binder Holz multicouches

Cette deuxième configuration est extraite du manuel bois massif et utilise la loi de masse (figure 42). En effet, un épais panneau de contrecollé ou de bois massif reconstitué constitue le centre de la paroi. Le bois massif reconstitué ou BMR est un matériau constitué d'un assemblage de deux à cinq lames de bois massif de fortes épaisseurs (de 45 à 85 mm) collées face à face par leurs côtés plats et parallèlement au sens des fibres. Même si le bois est un matériau léger, une telle épaisseur de bois

massif permet de faire jouer la loi de masse dans l'indice d'affaiblissement de la paroi. Les plaques de plâtre BA15 constituent les parements intérieurs et extérieurs de la paroi et contribuent à améliorer l'affaiblissement acoustique du fait de leurs caractéristiques mécaniques mais aussi en augmentant la masse totale de la paroi.

c- Création d'un outil de recherche

Une fois la base de données terminée et devant la quantité d'informations s'y trouvant, j'ai décidé de faciliter la recherche des solutions en codant un outil de recherche à l'aide du langage de programmation Excel VBA. Les détails de la création de cet outil de recherche vont donc être détaillés dans cette sous-partie.

Étant donné que la première feuille du fichier Excel contenait la base de données, deux nouvelles feuilles ont été créées. La première (figure 43) est destinée à afficher les résultats de la recherche effectuée : elle contient les mêmes colonnes que la base de données. Y est ajoutée une colonne pour permettre d'afficher le schéma correspondant à la solution recherchée. La seconde feuille ajoutée (figure 45) est uniquement destinée au remplissage des listes déroulantes qui vont permettre à l'utilisateur de réaliser sa recherche, elle ne sera donc pas utile à l'utilisateur.

Figure 43 : Outil de recherche de la feuille de recherche de Murs à ossature bois (MOB)

Pour plus de clarté dans l'explication du code régissant l'outil de recherche, les feuilles du classeur sont appelées « feuilles » tandis que les feuilles du code seront appelées « macros ». À savoir qu'une macro est un programme écrit en VBA.

Le programme VBA se décompose ainsi en deux macros et quatre modules qui sont disponibles en annexe : les macros s'intitulent Feuille1 et WorkBook et les modules sont numérotés de 1 à 4.

Les instructions principales se trouvent dans les deux macros. En effet, la macro « ThisWorkBook » contient des instructions qui s'exécutent à l'ouverture du fichier Excel tandis que les instructions contenues dans la macro « Listes_cascade » concernent les changements de choix dans les listes déroulantes. Ces instructions utilisent les quatre modules créés afin de remplir les listes déroulantes et d'afficher les résultats de la recherche dans le tableau prévu à cet effet. Nous allons donc détailler le fonctionnement du programme.

Dans un premier temps, il a fallu élire le critère principal de tri de la base de données. Après discussions avec les ingénieurs, j'ai décidé d'effectuer un premier tri des parois séparatives en fonction de leur type : simple ossature, ossature primaire double avec contreventement intérieur ...

Pour cela, j'ai inséré une liste déroulante affichant « Sélectionner un type de mur bois » lorsqu'aucun type n'est sélectionné. A l'affichage de ce message ou au changement de recherche de type, le tableau dans lequel s'affichent les résultats est automatiquement vidé des résultats de la recherche précédente

grâce à une sous-macro qui contrôle la liste déroulante. Dans chaque macro, des sous-macros définies par la commande « Private Sub + nom que l'on a donné à l'élément que l'on souhaite contrôler » permettent de créer un code qui automatisera l'élément choisi. En l'occurrence, ces sous-macros nous permettront ici de gérer les listes déroulantes ainsi que l'ouverture du classeur.

Pour faire afficher les différents types de parois présents dans la base de données dans la liste déroulante, nous allons utiliser la feuille « Construction ». Les lignes de code contrôlant la première liste déroulante se lancent à l'ouverture du classeur dans la macro « ThisWorkbook ». Cette dernière va chercher tous les types de murs existants dans la colonne « types » de la base de données et les recopier dans le tableau « Sources Types » de la feuille « Construction » (figure 44). Étant donné qu'il n'y a que cinq types de murs différents et une multitude de solution pour chaque type, la macro va supprimer automatiquement les doublons pour ne laisser qu'un exemplaire de chaque type. Les cinq types sont ensuite recopier dans la première liste déroulante.

Source Types	Source RA
Sélectionner un type de mur bois	Sélectionner un indice d'isolation acoustique
Simple_Ossature	
Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	
Ossature_Primary_Double_contreventement_int	
Bois_Massif_cotecalles	
Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	

Figure 44 : Types de murs contenues dans la feuille « Construction » du fichier de recherche de Murs à ossature bois (MOB)

Une fois le type de mur choisi par l'utilisateur à l'aide de la liste déroulante, la sous-macro « liste_type_change » associée la liste déroulante contenant les types va faire appel au module 2 intitulé « extraire ». Ce module permet d'aller chercher dans la base de données toutes les lignes dont le type est celui choisi par l'utilisateur. Les différents composants de chaque solution trouvée dans la base de données vont ensuite être recopier dans les colonnes correspondantes de la feuille de l'outil de recherche. La colonne ID indique un numéro qui permet d'identifier la solution si on souhaite la rechercher directement dans la base de données.

Recherche Murs Bois													
Cliquer pour afficher les schémas		Ossature_Primary_Double_contreventement_ext		Sélectionner un indice d'isolation acoustique									
ID	Catégorie	RA	Type	Isolant	Parment int	Tasseaux int	Ossature int	Contreventement int	Ossature principale	Contreventement ext	Ossature ext	Tasseaux ext	Parment ext
13	ACO/BOIS	53	Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	Laine de verre 100mm (GOCOONF0735_100mm) (10kg/m ²)=20kg/m ²	1 BA13 Std		Bos 27 x 50 mm	OSB12 mm					1 BA13 Std
899	RQA	53	Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	Semi-rigide laine minérale ou bouscoulé épaisseur ossature	1BA13	Tasseaux verticaux laine air 25mm min		OSB12 mm min					
14	ACO/BOIS	54	Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	Laine de roche 95mm (MB_ROCK_95mm) (50kg/m ²)=p=70kg/m ³	1 BA13 Std		Bos 27 x 50 mm	OSB12 mm	Double 100 x 45 mm espacé de 20 mm	OSB 12 mm	Bos 27 x 50 mm		1 BA13 Std
901	RQA	54	Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	Semi-rigide laine minérale ou bouscoulé épaisseur ossature	1BA15F	Tasseaux verticaux laine air 25mm min		OSB12 mm min					
913	RQA	54	Ossature_Primary_Double_contreventement_ext	Semi-rigide laine minérale ou bouscoulé épaisseur ossature	1BA13	Tasseaux horizontaux laine air 25mm min		OSB12 mm min					

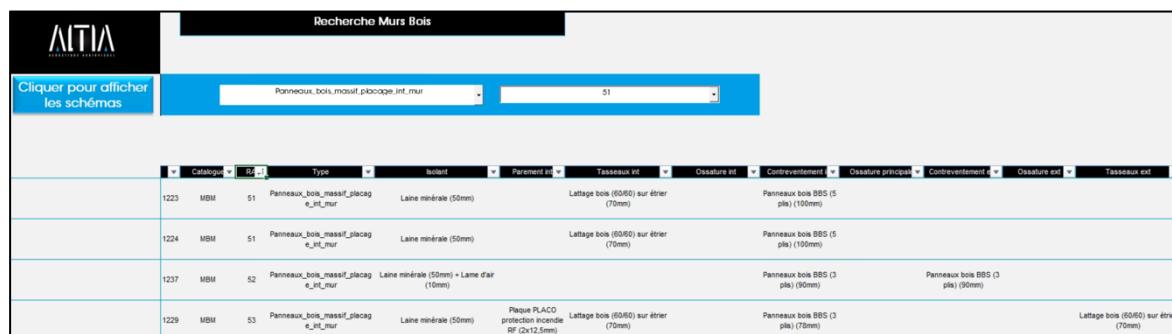
Figure 45 : Extrait de la recherche du type de mur : ossature primaire à double contreventement extérieur

Dès lors qu'un type de mur est choisi par l'utilisateur, la seconde liste déroulante affiche « Sélectionner un indice d'isolation acoustique » grâce à la sous-macro « liste_RA_change » (figure 45).

Chaque type de mur contenant un grand nombre de solutions, j'ai décidé de créer des listes en cascade. Cela signifie que les choix proposés dans la seconde liste déroulante dépendent du choix fait dans la première liste déroulante. Le second paramètre de choix s'est donc porté sur les valeurs d'affaiblissement de chaque mur. Nous allons désormais nous intéresser au remplissage de cette seconde liste déroulante et à l'affichage réalisé en fonction.

Dans un premier temps, une partie du module 1 intitulée « Charger_RA » est associée à la seconde liste déroulante et va s'assurer que la colonne « Source RA » (Figure 44) de la feuille « Construction » est vide. Si ce n'est pas le cas, elle va supprimer les valeurs qui y sont inscrites. Ensuite, si un type de mur a été choisi, le même module va aller chercher dans la base de données toutes les solutions de ce type et recopier leur valeur d'affaiblissement dans la colonne « Source RA » de la feuille « Construction ». Les lignes de code permettant de supprimer les doublons déjà utilisées pour le remplissage de la première liste déroulante vont ensuite être appliquées à cette colonne pour ne garder qu'une occurrence de chaque valeur. Enfin, une macro nommée « tri » va trier les résultats contenus dans la colonne dans l'ordre croissant. Les lignes de codes permettant de remplir les deux listes déroulantes sont ainsi similaires mais celle de la seconde liste déroulante s'appuie sur le résultat affiché dans la première liste déroulante pour effectuer sa recherche.

Lors du choix de l'indice d'affaiblissement dans la seconde liste déroulante, une partie du module 2 nommée « extraire » va faire afficher toutes les solutions ayant un indice d'affaiblissement supérieur ou égal à celui recherché par l'utilisateur (figure 46). Ce module est ainsi utilisé pour les deux listes déroulantes. En effet, que l'utilisateur n'ait choisi qu'un type ou qu'il ait choisi un type associé à un indice d'affaiblissement, le module « extraire » n'applique pas les mêmes lignes de code et permet un affichage dépendant des deux choix.



The screenshot shows a software interface for 'ALTIA' with a search bar at the top labeled 'Recherche Murs Bois'. Below the search bar, there is a button 'Cliquer pour afficher les schémas' (Click to view the schematics). The main area displays a table of search results:

ID	Catalogue	Type	Isolant	Paroi ext	Tasseaux int	Ossature int	Contreventement	Ossature principale	Contreventement ext	Ossature ext	Tasseaux ext
1223	MBM	51	Panneaux_bois_massif_placage_e_int_mur	Laine minérale (50mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (5 plis) (100mm)					
1224	MBM	51	Panneaux_bois_massif_placage_e_int_mur	Laine minérale (50mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (5 plis) (100mm)					
1237	MBM	52	Panneaux_bois_massif_placage_e_int_mur	Laine minérale (50mm) + Laine d'air (10mm)		Panneaux bois BBS (3 plis) (90mm)		Panneaux bois BBS (3 plis) (90mm)			
1229	MBM	53	Panneaux_bois_massif_placage_e_int_mur	Laine minérale (50mm)	Plaque PLACO protection incendie RF (2x12,5mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (3 plis) (70mm)			Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	

Figure 46 : Extrait de la recherche du type de mur : panneaux de bois massif avec plaquage intérieur à un isolement supérieur ou égal à 51dB

Le dernier élément à présenter dans cette base de données est l'affichage des schémas. Le choix a été fait de placer un bouton indépendant des listes déroulantes afin d'optimiser le temps de calcul du programme. En effet, lorsqu'on souhaitait afficher les schémas via l'extraction réalisée à l'aide des listes déroulantes, la recherche pouvait prendre une minute, ce qui n'est pas envisageable pour une utilisation ponctuelle. De fait, les schémas correspondant à chaque solution ont été enregistré dans un dossier indépendant. Chaque nom de schéma a été rentré dans une colonne de la base de données afin que le programme puisse aller chercher le schéma (image en format .jpeg dont le nom est le même que celui rentré dans la nouvelle colonne) associé à la solution dans le dossier correspondant. Ainsi, au clic sur le bouton « Cliquer pour afficher les schémas », l'ensemble des schémas s'affichent dans la colonne prévue à cet effet (figure 47).

Cliquer pour afficher les schémas		Panneaux_bois_massif_placage_int_mur			51			
		Type	Isolant	Parmenent int	Tasseaux int	Ossature int	Contreventement	
	1223	MBM	51	Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	Laine minérale (50mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (5 plis) (100mm)	
	1224	MBM	51	Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	Laine minérale (50mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (5 plis) (100mm)	
	1237	MBM	52	Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	Laine minérale (50mm) + Lame d'air (10mm)		Panneaux bois BBS (3 plis) (90mm)	
	1229	MBM	53	Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	Laine minérale (50mm)	Plaque PLACO protection incendie RF (2x12,5mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (3 plis) (78mm)
	1230	MBM	53	Panneaux_bois_massif_placage_int_mur	Laine minérale (50mm)	Plaque fibre de plâtre rigidur H (2x12,5mm)	Lattage bois (60/60) sur étrier (70mm)	Panneaux bois BBS (3 plis) (78mm)

Figure 47 : Extrait de l'affichage des schémas

Pour terminer la présentation de cet outil de recherche, je souhaitais évoquer celui utilisé pour la base de données des planchers. En effet, les planchers sont définis à la fois par leur indice d'affaiblissement acoustique aux bruits aériens et aux bruits de chocs. Cet outil est donc plus complexe que le précédent puisqu'il est possible de réaliser une recherche prenant en compte :

- Le type de plancher seul
- Le type de plancher et l'indice d'isolement au bruit aérien,
- Le type de plancher et l'indice d'isolement au bruit de choc
- Les trois composantes

La démarche de construction du programme est sensiblement la même que celle réalisée pour la recherche de murs. En revanche, il a été nécessaire de désolidariser les deux dernières listes déroulantes pour les recherches à deux paramètres. Le changement majeur se situe ainsi dans le module « extraire » pour lequel il a fallu créer toutes les possibilités citées dans les tirets précédents.

d- Modélisation des parois séparatives sous AcouS STIFF

Toujours dans l'objectif de faciliter le travail des ingénieurs du bureau d'étude, l'ensemble des solutions du rapport ACOUBOIS « Mesures Laboratoires » rentré dans la base de données a été modélisé au sein du logiciel AcouS STIFF.

AcouS STIFF est un outil de simulation des comportements acoustiques de parois et de prévision d'indices d'affaiblissements acoustiques au bruit aérien. Développé par l'entreprise GAMBA, ce logiciel s'adresse à tous les ingénieurs ayant à concevoir ou à prescrire des parois comme les ingénieurs chargés d'études ayant à préconiser des systèmes constructifs et s'appuie sur les normes ISO 717-1, NFS 31-051, ASTM E413... L'expérience acquise depuis plus de 20 ans et les confrontations quotidiennes avec des problèmes concrets d'isolation aux bruits aériens ont permis de dégager les caractéristiques essentielles ne nécessitant que des paramètres d'entrées accessibles à un acousticien de terrain : dimensions, module d'Young, masse volumique, facteur de perte, résistivité à l'écoulement d'air... AcouS STING est la suite logicielle de AcouS STIFF et permet de calculer l'indice d'affaiblissement acoustique de complexes de planchers. Concernant ces derniers, le niveau de bruit de chocs permet d'évaluer la performance acoustique d'un plancher.

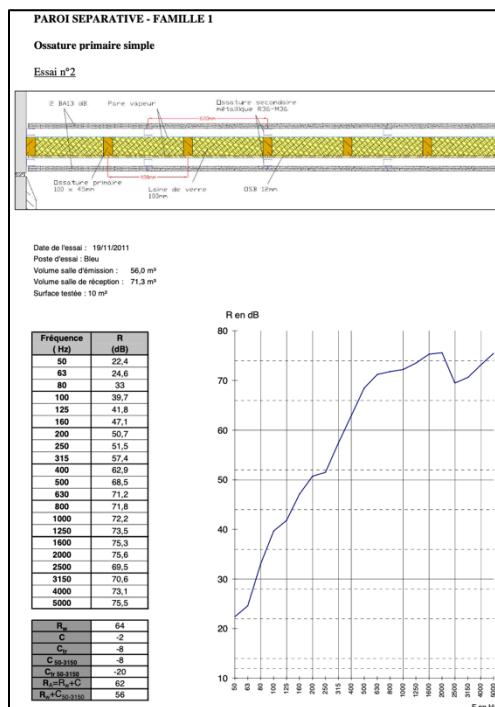


Figure 48 : Schéma de la paroi séparative de l'essai n°2 du rapport ACOUBOIS avec son PV

Parmi les trois rapports utilisés, seul le rapport ACOUBOIS a été retenu car il contient en annexe les PV acoustiques mesurés en laboratoire (figure 48), c'est-à-dire les performances acoustiques de chaque produit en fonction de la fréquence, de toutes les solutions étudiées. Pour cette partie, nous utiliserons comme exemple l'essai numéro deux des parois séparatives du rapport ACOUBOIS (figure 48).

Pour définir une paroi au sein de ce logiciel, plusieurs possibilités nous sont offertes. Dans un premier temps, il faut définir le type de paroi qui correspond à notre montage (figure 49) : paroi simple, feuillettée, multicouche, double ... Dans le cadre de mon travail, j'ai principalement modélisé des parois doubles, triples et multicouches.

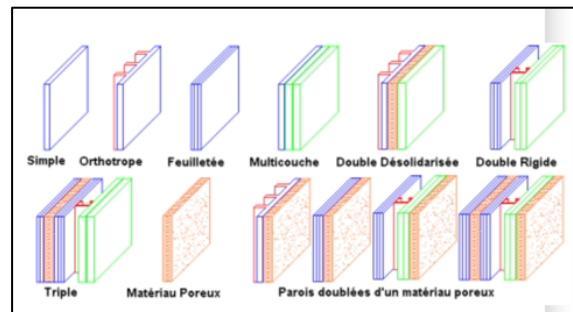


Figure 49 : Configurations de parois possibles sous Acous STIFF

Ensuite, il faut définir le type de liaison qui lie chaque parement (figure 50). Dans le cadre d'une ossature bois, il s'agira le plus souvent d'une liaison mécanique linéique dont l'indice de désolidarisation sera compris entre 1 et 3. Il faut également définir l'entraxe de l'ossature, c'est-à-dire la distance entre chaque montant maintenant le mur. Les valeurs pour une ossature métallique sont différentes, on utilisera souvent un indice de désolidarisation de l'ordre de 10. Ces valeurs sont données par les concepteurs du logiciel mais elles peuvent varier selon l'appréciation de l'utilisateur en fonction du complexe modélisé. Pour la modélisation des modèles ACOUBOIS, j'ai rajouté des liaisons périphériques qui représentent l'assise de la paroi constituant la liaison mécanique entre les parements externes. En effet, lors des mesures en laboratoire, les différentes parois séparatives doivent être maintenues par des outils, que l'on symbolise par ces liaisons périphériques.

	ACOUBOIS2M	ACOUBOIS2M
RA(dB) / delta(Rw+C) (dB)	61	61
RAtr(dB) / delta(Rw+Ctr) (dB)	55	55
STC (dB)	64	64
RwC,Ctr(dB) / delta(Rw,Ctr) dB	64 (-3;-9)	64 (-3;-9)
Intitule Liaison	linéique	périphériq.
Type Liaison	Linéique	Périphériq.
Fact. de désolidarisation	10	3
NbPointM2		
Entraxe (m)	0.6	0.4
L1.Longueur 1 de Peripherie		4.000
F1.Fact. de désol. de L1		40
I1.Largeur 1 de Peripherie		2.500
f1.Fact. de désol. de I1		40
L2.Longueur 2 de Peripherie		4.000
F2.Fact. de désol. de L2		40
I2.Largeur 2 de Peripherie		2.500
f2.Fact. de désol. de I2		40
% Solidarisation	1.4%	0.34%
Niveau désolidarisation (dB)	19	25

Figure 50 : Définition des liaisons de l'essai n°2 sous Acous STIFF

Après avoir inséré les composants constituant la paroi à modéliser, il faut définir ou modifier les caractéristiques mécaniques de chaque matériau (figure 51). Ainsi, avant de modéliser les différents éléments du rapport ACOUBOIS, j'ai effectué des recherches centrées sur les modules d'Young et les masses volumiques des matériaux utilisés que j'ai répertoriées dans un tableau. Il faut également insérer les valeurs du PV par bande de fréquence (figure 46) de la solution étudiée afin de rapprocher au plus la courbe du produit simulé à la courbe du PV acoustique.

	BA13	Air	LV Rouleau	12 mm	Air	BA13
Longueur (m)	4	4	4	4	4	4
Largeur (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Epaisseur (mm)	12.50	36.00	100.00	12.00	36.00	12.50
Masse volumique (kg/m³)	900		15	900		900
Module young (N/m²)	4E+09	1.44E+05	1E+05	3E+09	1.44E+05	3E+09
Facteur de perte	0.01				0.02	0.02
Rés. à l'écoulement d'air (...)			5000.00			
Coiff. collage de poreux			1			
Réverbération Cavité	□	☒	□	□	☒	□
Coiff. de fibrage			1.94			
Masse surfacique (kg/m²)	22.50		1.50	10.80		22.50
Fréq. critique (Hz)	2384			2867		2753
Raideur (N/m³)		4E+06	1E+06		4E+06	
Type paroi	S.Simple	A.Lame d...	P.Poreux	S.Simple	A.Lame d...	S.Simple
Nombre de plaque	2	1	1	1	1	2

Figure 51 : Définition des composants et de leurs caractéristiques de l'essai n°2 sous Acous STIFF

Pour terminer, afin d'obtenir des résultats de simulation les plus proches de ceux du PV, il faut jouer sur les caractéristiques mécaniques des matériaux et des liaisons. En gardant à l'esprit un pourcentage d'erreur maximal à ne pas dépasser, cela permet d'obtenir une simulation précise et réutilisable par les ingénieurs pour leurs projets futurs. Ci-contre (figure 52), on obtient un résultat de simulation satisfaisant. En effet, la modélisation donne un résultat légèrement plus élevé que le PV en basses fréquences mais le reste de la courbe est représentatif du PV. La modélisation de l'essai n°2 est donc validée avec un indice d'affaiblissement global de 62 dB contre 61 dB pour la modélisation, une erreur de simulation négligeable au vu de la ressemblance entre les deux courbes.

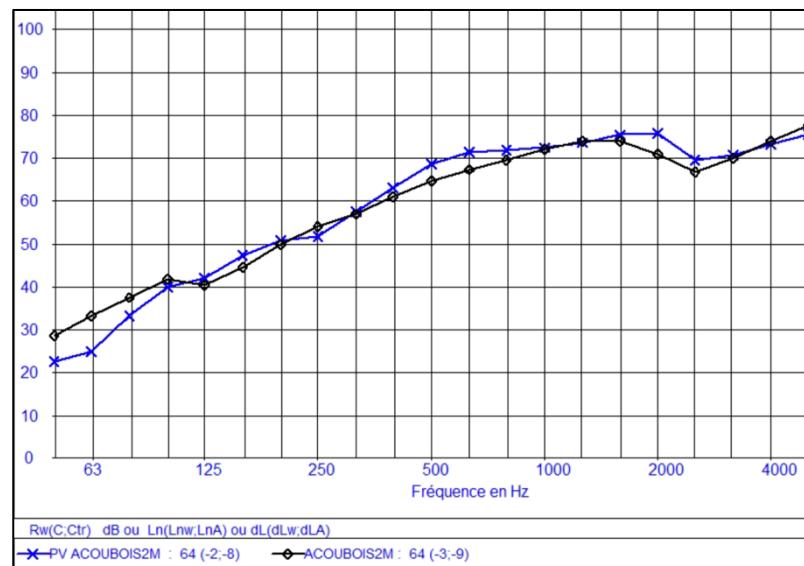


Figure 52 : Courbe de l'affaiblissement acoustique de la modélisation de l'essai n°2 sous AcouS STIFF et de son PV

Conclusion

Pour conclure, le stage que j'ai effectué au sein du bureau d'études Altia Acoustique m'a été très bénéfique. Cette première expérience professionnelle dans le monde de l'ingénierie s'est parfaitement déroulée. Ma mission d'assistante ingénierie m'a permis de découvrir le métier d'acousticien du bâtiment sous toutes ses coutures tandis que l'étude des solutions bois m'a permis d'étoffer mes connaissances dans le domaine du bâtiment et de me familiariser à la construction de base de données et au code en VBA.

Au cours de mon stage, j'ai pu appréhender plusieurs logiciels dont je ne me servais auparavant pas ou très peu. Pour commencer, j'utilise de manière beaucoup plus fluide le logiciel Sketch Up pour modéliser des bâtiments ou des salles. Également, j'ai découvert le logiciel CATT-Acoustic et appris à m'en servir avec l'aide de mes collègues mais aussi par le biais de la formation que j'ai pu suivre dans le cadre de mon stage. Sous la supervision de M. CHENEAU, j'ai rédigé plusieurs rapports de mesures en mettant en forme les résultats à l'aide des logiciels NorXfer, NorReview et NorBuild, tous associés à la marque des sonomètres utilisés par l'entreprise : Norsonic. Enfin, dans le cadre de l'étude des solutions bois, j'ai pu appréhender le logiciel AcouS-STIFF et passer plusieurs heures à modéliser toutes les solutions bois répertoriées dans le rapport ACOUBOIS afin de créer une base de données au sein même de ce logiciel de modélisation pour les acousticiens de l'entreprise.

Dans le cadre de mon sujet de stage, j'ai découvert de nombreux matériaux bois ainsi que leurs utilisations et performances. En allant au-delà de la simple étude des solutions bois, j'ai pu constater quels étaient les enjeux à la fois mécaniques et écologiques des constructions bois. Les défis à relever pour réaliser des bâtiments avec des structures presque entièrement en bois (90%) sont gigantesques autant d'un point de vue acoustique que d'un point de vue mécanique.

Au cours de mon travail sur l'automatisation de la base de données, j'ai longuement hésité sur le choix du langage de programmation pour créer mon outil de recherches car je n'avais jamais utilisé le langage VBA auparavant. Cependant, étant donné que j'avais construit ma base dans un fichier Excel, il semblait plus sage de se lancer dans l'apprentissage du VBA plutôt que de transposer la base de données dans un autre langage de programmation. Ainsi, la création de mon outil de recherche m'a permis de développer des nouvelles compétences en programmation et d'améliorer ma compréhension de la logique. En effet, il m'a semblé plus simple de programmer en ayant un objectif réel et déterminé. Le programme a subi de nombreuses améliorations jusqu'à obtenir l'outil de recherche souhaité répondant aussi aux demandes de mes collègues. Son défaut majeur étant le temps de calcul, je n'ai pas réussi à optimiser le programme pour le diminuer foncièrement, ayant déjà mis à part l'affichage des schémas.

D'un point de vue technique, savoir utiliser tous ces nouveaux logiciels ajoute de nouvelles cordes à mon arc et m'a permis de me familiariser avec des nouveaux outils de simulations diverses. De plus, le stage m'a apporté des compétences en mesurages acoustiques et en programmation sous VBA.

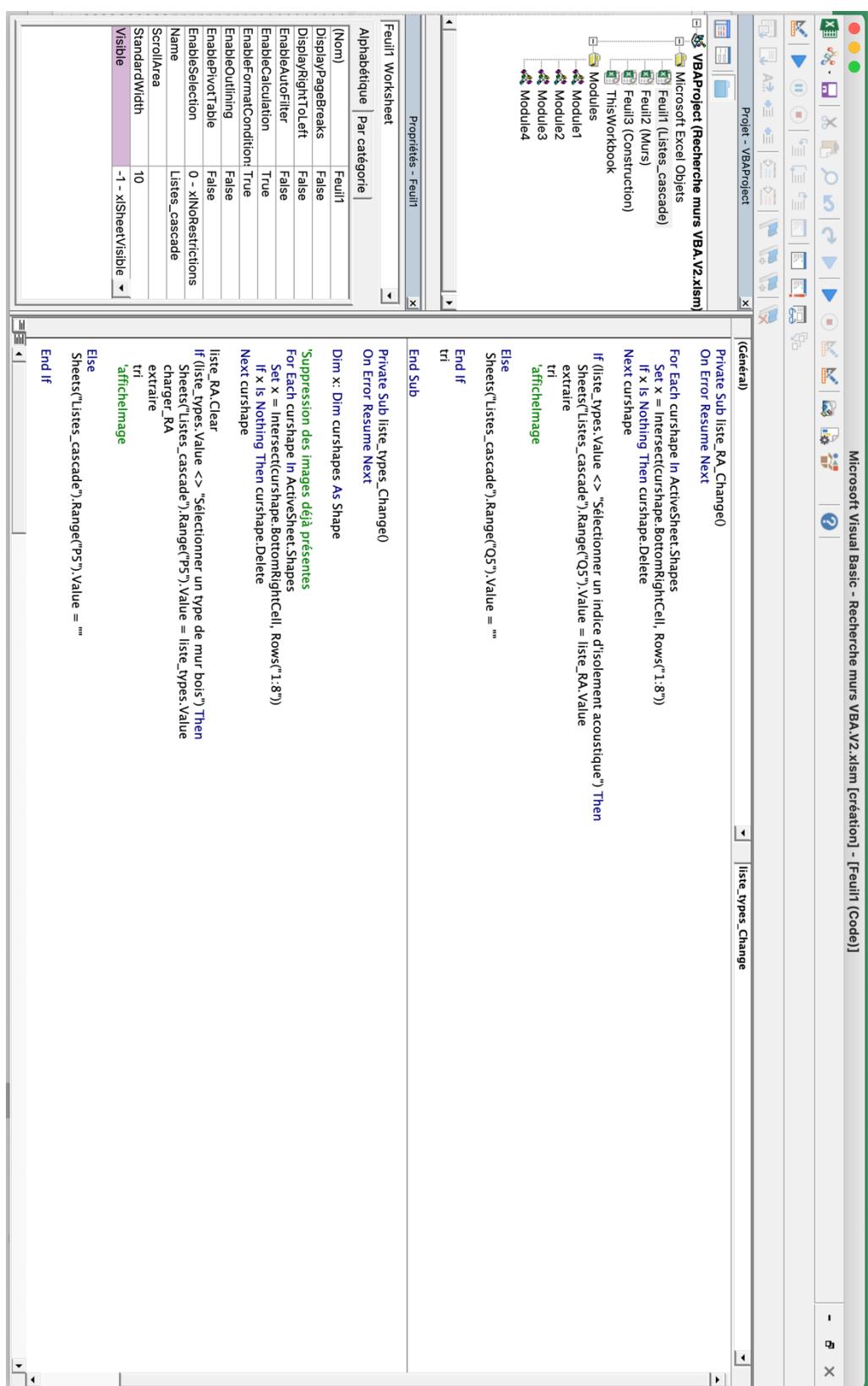
Le travail au sein d'un bureau d'études m'a fait réaliser l'importance du respect des normes et de la réglementation dans la réalisation d'un projet. J'ai également découvert la vie d'une petite entreprise dont l'accueil fut particulièrement chaleureux. Mes collègues de travail se sont toujours rendus disponibles pour répondre à mes questions et m'apprendre de nouvelles choses. Pour ces six mois de stage que je n'ai pas vu passer, je les en remercie !

Bibliographie

- SAINT-GOBAIN ; *Les essentiels de l'habitat : 5-Introduction à l'acoustique du bâtiment* ; 2012, 32 pages. Disponible sur : http://www.aldeau.com/ouvrages_libres/36.pdf
- Bruit.fr ; *Isolement acoustique entre deux locaux*, 5 pages. Disponible sur : https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/A5_isolement_acoustique.pdf
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie & Ministère du logement et de l'égalité des territoires ; *Guide de mesures acoustiques* ; 2014 ; 57 pages. Disponible sur : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/dgalm_guide_mesures_acoustiques_aout_2014.pdf
- WELLKO ; le promoteur du confort acoustique ; *Indice d'affaiblissement acoustique Rw* ;. Disponible sur : <https://www.wellko.fr/2017/09/11/indice-d'affaiblissement-acoustique-rw-c-ctr-db/>
- EUPHONIA ; *Didacticiels des logiciels développés par Euphonia*. Disponible sur : <http://www.euphonia.fr/didacticiel.htm>
- GETZNER, engineering a quiet future; *Sylodyn*. Disponible sur : <https://www.getzner.com/fr/produits/sylodyn>
- Pascal POGGI ; *Mjøstårnet, la nouvelle plus haute tour en bois au monde* ; BATIRAMA ; 2019. Disponible sur : <https://www.batirama.com/article/26089-mjostarnet-la-nouvelle-plus-haute-tour-en-bois-au-monde.html>
- PYT AUDIO ; *Les PV acoustiques*. Disponible sur : <https://www.pytaudio.com/pv-acoustique/>
- *Tout savoir sur la maison ossature bois* ; Les matériaux Des projets pour la vie !, 2019. Disponible sur : <https://www.lesmateriaux.fr/blog/menuiserie/tout-savoir-sur-la-maison-ossature-bois.html>
- Juliette DIBIE ; *Le tableur Excel La programmation en VBA* ; AgroParisTech U.F.R d'Informatique ; 65 pages. Disponible sur : http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/cours_excel_vba.pdf
- BSEC Partenaire Acoustique ; *Synthèse des objectifs et obligations pour l'acoustique du bâtiment*. Disponible sur : <http://www.acoustique-bsec.fr/data/uploads/synthese-reglementation-acoustique-batiment.pdf>
- GAMBA, *Acous STIFF, l'outil de l'ingénierie acoustique*, 4 pages. Disponible sur : <https://gamba.fr/assets/plaquette-acous-stiff.pdf>
- Nicolas BALANANT, Catherine GUIGOU, Madeleine VILLENAVE ; *ACOUBOIS, Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments à ossature bois*, (*Mesures acoustiques en laboratoire, Mesures acoustiques in-situ, Méthode de prédition, Méthodes simplifiées et exemples de solutions acoustiques*) ; Juin 2014 ; QUALITEL, CSTB, FCBA.
- Nathalie MIONETTO, Régis PISCOT ; *Présentation : L'acoustique des bâtiments en bois, Mesures, prédictions et solutions simplifiées, Construction Bois : Halte aux préjugés* ; FCBA.
- Catalogue ROCKWOOL ; *Guide Acoustique : Maîtrisez l'énergie sonore*, 216 pages.
- Binder Holz, Placo SAINT-GOBAIN ; *Manuel de construction bois massif*, 207 Pages.
- *Référentiel Qualitel Acoustique 2020* ; 175 pages.

Annexe 1 : Extrait de la base de données des murs/ parois séparatives (1257 lignes au total)

Annexe 2 : Interface de programmation et programme VBA de l'outil de recherche



The screenshot shows the Microsoft Visual Basic Editor (VBE) interface. The Project Explorer on the left lists the VBAProject (Recherche murs VBA.v2.xlsm) with modules: Feuill1 (Listes_cascade), Feuill2 (Murs), Feuill3 (Construction), and ThisWorkbook. The Modules section shows four modules: Module1, Module2, Module3, and Module4.

The code editor on the right displays the VBA code for the 'liste_types_Change' event of Feuill1. The code handles the change in a dropdown list and performs operations on shapes in the active sheet.

```

Private Sub liste_RA_Change()
On Error Resume Next
For Each curshape In ActiveSheet.Shapes
    Set X = Intersect(curshape.BottomRightCell, Rows("1:8"))
    If X Is Nothing Then curshape.Delete
    Next curshape
    If (liste_types.Value <> "Sélectionner un indice d'isolation acoustique") Then
        Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = liste_RA.Value
        tri
        'afficheimage
    Else
        Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = ""
    End If
    tri
End Sub

Private Sub liste_types_Change()
On Error Resume Next
Dim x, Dim curshapes As Shape
'Suppression des images déjà présentes
For Each curshape In ActiveSheet.Shapes
    Set X = Intersect(curshape.BottomRightCell, Rows("1:8"))
    If X Is Nothing Then curshape.Delete
    Next curshape
    liste_RA.Clear
    If (liste_types.Value <> "Sélectionner un type de mur bois") Then
        Sheets("Listes_cascade").Range("P5").Value = liste_types.Value
        charger_RA
        tri
        'afficheimage
    Else
        Sheets("Listes_cascade").Range("P5").Value = ""
    End If
End Sub

```

Feuil 1(Listes_cascade)

```
Private Sub liste_RA_Change()
On Error Resume Next

For Each curshape In ActiveSheet.Shapes
    Set x = Intersect(curshape.BottomRightCell, Rows("1:8"))
    If x Is Nothing Then curshape.Delete
Next curshape

If (liste_types.Value <> "Sélectionner un indice d'isolation acoustique") Then
    Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = liste_RA.Value
    extraire
    tri
    'afficheImage

Else
    Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = ""
End If
tri

End Sub
```

```
Private Sub liste_types_Change()
On Error Resume Next

Dim x: Dim curshapes As Shape

'Suppression des images déjà présentes
For Each curshape In ActiveSheet.Shapes
    Set x = Intersect(curshape.BottomRightCell, Rows("1:8"))
    If x Is Nothing Then curshape.Delete
Next curshape

liste_RA.Clear
If (liste_types.Value <> "Sélectionner un type de mur bois") Then
    Sheets("Listes_cascade").Range("P5").Value = liste_types.Value
    charger_RA
    extraire
    tri
    'afficheImage

Else
    Sheets("Listes_cascade").Range("P5").Value = ""
End If

Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = ""
tri

End Sub
```

ThisWorkbook

```
Private Sub Workbook_Open()
'Workbook=classeur, le code se déclenche à l'ouverture du classeur (open)
'Charger la liste déroulante des types
'Il faut déclarer les variables nécessaires au développement

'Varier les indices de ligne et de colonne pour déplacer le pointeur de cellule à cellule
Dim colonne As Integer: Dim ligne As Integer
Dim ligne_murs As Integer: Dim plage As Range
'La commande ":" est un séparateur (économise le nb de lignes)

'Reinitialisation des listes déroulantes avec "clear"
Sheets("Listes_cascade").liste_types.Clear
Sheets("Listes_cascade").liste_RA.Clear
'Suppression du potentiel dernier choix en remettant à 0 avec "value="""
Sheets("Listes_cascade").liste_types.value = ""
Sheets("Listes_cascade").liste_RA.value = ""

'REINITIALISER LES ZONES
'Remise à 0 des valeurs des colonnes "source" à partir de la ligne 5
For colonne = 2 To 4 Step 2
    ligne = 5
    While Sheets("Construction").Cells(ligne, colonne).Value <> ""
        Sheets("Construction").Cells(ligne, colonne).Value = ""
        ligne = ligne + 1
    Wend

Next colonne

'REINITIALISER ZONE D'EXTRACTION
ligne = 9
While (Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 2).Value <> ""))
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 2).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 3).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 4).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 5).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 6).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 7).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 8).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 9).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 10).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 11).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 12).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 13).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 14).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 15).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 16).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 17).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 18).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 19).Value = ""
    Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne, 20).Value = ""

    ligne = ligne + 1
Wend

'CHARGER LES TYPES
'Initialisation des lignes que l'on va commencer à copier dans les colonnes "source"
'Tant que les valeurs de la colonne "Type" ne sont pas nulles, elles sont copiées une à une dans la colonne
"source type"
ligne_murs = 3: ligne = 5
While Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 6).Value <> ""
    Sheets("Construction").Cells(ligne, 2).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 6).Value
    ligne = ligne + 1
    ligne_murs = ligne_murs + 1
Wend

ligne = ligne - 1
Sheets("Construction").Select
Set plage = Range(Cells(5, 2), Cells(ligne, 2))
plage.Select

'Code de la macro pour enlever les doublons
ActiveSheet.Range(Cells(5, 2), Cells(ligne, 2)).RemoveDuplicates Columns:=1, Header:=xlNo
Columns("B:B").ColumnWidth = 53.91

'Affichage des éléments un à un dans la feuille "Listes_cascade"
ligne = 4
While Sheets("Construction").Cells(ligne, 2).Value <> ""
    Sheets("Listes_cascade").liste_types.AddItem Sheets("Construction").Cells(ligne, 2).Value
    ligne = ligne + 1
Wend

Sheets("Listes_cascade").Select
Sheets("Listes_cascade").liste_types.ListIndex = 0

End Sub
```

Module1

```
Option Explicit
Sub charger_RA()
    Dim ligne As Integer: Dim le_type As String
    Dim chaine_RA As String: Dim ligne_construct As Integer
    Dim colonne As Integer: Dim plage As Range

    'La variable "ligne" correspond à la ligne pointée dans la feuille "Murs"
    'La variable "ligne_construct" correspond à la ligne pointée dans la feuille "Construction"
    'La variable "colonne" correspond à la colonne pointée dans la feuille "Construction"
    'La variable "le_type" permet de connaître la valeur actuelle du menu déroulant "type"

    chaine_RA = ""
    le_type = Sheets("Listes_cascade").liste_types.value

    'Mise à 0 des valeurs de la colonne "source RA" de la feuille "Construction" = on purge la colonne D
    colonne = 4
    ligne_construct = 5
    While Sheets("Construction").Cells(ligne_construct, colonne).Value <> ""
        Sheets("Construction").Cells(ligne_construct, colonne).Value = ""
        ligne_construct = ligne_construct + 1
    Wend

    Sheets("Murs").Select
    ligne = 3: ligne_construct = 5
    While Cells(ligne, 2).Value <> ""
        If (Cells(ligne, 6).Value = le_type) Then
            If (Instr(1, chaine_RA, "-" & Cells(ligne, 5).Value & "-", 1) = 0) Then
                chaine_RA = chaine_RA & "-" & Cells(ligne, 5).Value
                Sheets("Construction").Cells(ligne_construct, 4).Value = Cells(ligne, 5).Value
                ligne_construct = ligne_construct + 1
            End If
        End If
        ligne = ligne + 1
    Wend

    ligne_construct = ligne_construct - 1
    Sheets("Construction").Select
    Set plage = Range(Cells(5, 4), Cells(ligne_construct, 4))
    plage.Select

    ActiveSheet.Range(Cells(5, 4), Cells(ligne, 4)).RemoveDuplicates Columns:=1, Header:=xlNo
    Columns("B:B").ColumnWidth = 53.91

    ActiveWorkbook.Worksheets("Construction").Sort.SortFields.Clear
    ActiveWorkbook.Worksheets("Construction").Sort.SortFields.Add2 Key:=Range("D5"), SortOn:=xlSortOnValues,
    Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
    With ActiveWorkbook.Worksheets("Construction").Sort
        .SetRange plage
        .Header = xlGuess
        .MatchCase = False
        .Orientation = xlTopToBottom
        .SortMethod = xlPinYin
        .Apply
    End With

    ligne_construct = 4
    Sheets("Listes_cascade").liste_RA.Clear

    While Sheets("Construction").Cells(ligne_construct, 4).Value <> ""
        Sheets("Listes_cascade").liste_RA.AddItem Sheets("Construction").Cells(ligne_construct, 4).Value
        ligne_construct = ligne_construct + 1
    Wend

    Sheets("Listes_cascade").Select
    Sheets("Listes_cascade").liste_RA.ListIndex = 0
End Sub
```

Module2

```
Option Explicit
Sub extraire()
    "ligne_listes" parcourt les lignes de la feuille "listes-cascade", idem "ligne_murs" pour "Murs"
    Dim Ligne_listes As Integer: Dim ligne_murs As Integer: Dim ligne_listes1 As Integer

    'Si les types et RA ne sont pas renseignés, le code n'est pas lancé
    If (Sheets("Listes_cascade").Range("P5").Value = "" And Sheets("Listes_cascade").Range("Q5").Value = "") Then
        Return
    End If

    'Purger la liste d'extraction
    ligne_listes = 9
    While (Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 2).Value <> "")
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 2).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 3).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 4).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 5).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 6).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 7).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 8).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 9).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 10).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 11).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 12).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 13).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 14).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 15).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 16).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 17).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 18).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 19).Value = ""
        Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 20).Value = ""

        ligne_listes = ligne_listes + 1
    Wend

    ligne_murs = 2: ligne_listes = 9
    Sheets("Listes_cascade").Select
    While (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 2).Value <> "")
        If (Range("P5").Value <> "" And Range("Q5").Value = "sélectionner un indice d'isolement acoustique") Then
            If (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 6).Value = Range("P5").Value) Then
                extraction ligne_listes, ligne_murs
                ligne_listes = ligne_listes + 1
            End If
            ElseIf (Range("P5").Value <> "" And Range("Q5").Value <> "") Then
                If (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 6).Value = Range("P5").Value) And
                    ((Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("Q5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("R5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("S5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("T5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("U5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("V5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("W5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("X5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("Y5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("Z5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AA5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AB5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AC5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AD5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AE5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AF5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AG5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AJ5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AK5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AL5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AM5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AO5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AP5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AQ5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AR5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AS5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AT5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AU5")) _ Or (Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value = Range("AV5")))) Then
                extraction ligne_listes, ligne_murs
                ligne_listes = ligne_listes + 1
            End If
        End If
    Wend
End Sub
```

```

        End If
    End If
    ligne_murs = ligne_murs + 1
Wend
End Sub



---


Sub extraction(ligne_listes As Integer, ligne_murs As Integer)

Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 2).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 2).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 3).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 4).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 4).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 5).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 5).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 6).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 6).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 7).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 7).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 8).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 8).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 9).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 9).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 10).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 10).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 11).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 11).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 12).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 12).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 13).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 13).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 14).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 14).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 15).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 15).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 16).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 16).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 17).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 17).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 18).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 18).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 19).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 19).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 20).Value
Sheets("Listes_cascade").Cells(ligne_listes, 20).Value = Sheets("Murs").Cells(ligne_murs, 3).Value

```

End Sub

Module3

```
Sub tri()
' tri Macro

' Sheets("Listes_cascade").Select
Range("D8").Select
Selection.AutoFilter
ActiveWorkbook.Worksheets("Listes_cascade").AutoFilter.Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("Listes_cascade").AutoFilter.Sort.SortFields.Add2 _
    Key:=Range("D8:D888"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, _
    DataOption:=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("Listes_cascade").AutoFilter.Sort
    .Header = xlYes
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply
End With
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-6
End Sub
```

Module4

```
Sub afficheImage()
Dim MonDossier As String: Dim TypeImage As String: Dim NomPhoto As String
Dim LignePhoto As Integer: Dim ColonneCat As Integer
Dim top As Integer
Dim x: Dim curshape As Shape

'Suppression des images déjà présentes
For Each curshape In ActiveSheet.Shapes
    Set x = Intersect(curshape.BottomRightCell, Rows("1:8"))
    If x Is Nothing Then curshape.Delete
Next curshape

'TEST AVEC UNE SEULE IMAGE
'MonDossier = "C:\Users\stage1\OneDrive - Altia\Bureau\DOSSIER CODE\Schémas mur\""
'TypeImage = ".png"
'NomPhoto = Sheets("Listes_cascade").Cells(9, 3).Value
'ActiveSheet.Shapes.AddPicture Filename:=MonDossier & NomPhoto & TypeImage, _
'linktofile:=msoFalse, savewithdocument:=msoTrue, left:=45, top:=220, width:=100, Height:=50

MonDossier = "/Users/PalomaPerrin/Desktop/DOSSIER CODE/Schémas murs/"
TypeImage = ".png"

ColonneCat = 20
LignePhoto = 9
top = 253
While Sheets("Listes_cascade").Cells(LignePhoto, ColonneCat).Value <> ""
    NomPhoto = Sheets("Listes_cascade").Cells(LignePhoto, ColonneCat).Value
    Sheets("Listes_cascade").Select
    On Error Goto erreurmessager:
    ActiveSheet.Shapes.AddPicture Filename:=MonDossier & NomPhoto & TypeImage, _
    linktofile:=msoFalse, savewithdocument:=msoTrue, left:=45, top:=top, width:=110, Height:=50
    LignePhoto = LignePhoto + 1
    top = top + 60
wend

erreurmessager:
    If Err.Number = 1004 Then
        MsgBox "Il n'y a pas de schéma pour cet élément" & vbCrLf & "Vérifier la présence de l'image dans le dossier correspondant", _
        vbInformation + vbOKOnly, "Message d'erreur"
    End If

End Sub
```