

C Clément
F Kévin
H Benoit
P Thomas
Classe de 1eS3

Lycée de la Vallée du Cailly

Etude acoustique de l'Agora



*Un grand merci à Jacques Billaud sans qui notre projet
n'aurait pu aboutir.*

*Merci à nos professeurs de T.P.E. qui se sont montrés très attentionnés et
qui ont mis du matériel à notre disposition.*

Sommaire

Introduction	p.4
<u>I Définitions</u>	p.5
<u>II Constat et problématique</u>	p.9
1. Problèmes sonores	p.10
2. Causes	p.10
3. Cartographie	p.11
4. Problématique générale	p.15
<u>III Etude acoustique de l' Agora</u>	p.16
1. Les objectifs fixés par la loi	p.17
2. Les méthodes d'investigation	p.18
3. Calcul mathématique du temps de réverbération	p.20
4. Etude du temps de réverbération par tirs	p.21
<u>IV Solutions</u>	p.26
1. Choix des matériaux	p.27
2. Solution choisie	p.28
3. Bénéfice du travail	p.39
Conclusion	p.30
Annexes	p.31
Bibliographie	p.36

Introduction

Le Lycée de la Vallée du Cailly a été construit en 1991. L'architecte, Mr Acau, y a construit un espace appelé Agora.

L'Agora est depuis bien longtemps une source de gênes sonores pour ses occupants (élèves, professeurs, personnes de l'administration).

On appelle Agora (lieu public en grec), le vaste hall d'entrée du lycée et principale pièce de transition entre les différents bâtiments. C'est un lieu de rencontres et de détente pour les élèves. L'Agora, de par sa dimension et les matériaux qui la composent (béton et vitres), est une pièce fortement bruyante.

C'est parce que ce problème se pose chaque jour à nous, qu'il nous a semblé intéressant de travailler sur ce projet dans l'espoir de voir un jour se réaliser concrètement l'amélioration de notre cadre de vie.

Nous exposerons pour commencer quelques notions sur le son, nous analyserons la situation existante et poserons la problématique, ensuite, nous procéderons à l'étude acoustique de l'Agora, enfin, nous proposerons les solutions envisagées.

I Définitions

Avant de commencer ce travail, il nous a paru important de rappeler quelques notions relatives au son et à l'acoustique comme la différence entre un son et un bruit, la propagation du son, le temps de réverbération, etc...

Un son (physique) est une suite de compressions et de dépressions de l'air. Il nécessite un milieu pour se déplacer. En l'absence d'obstacle, cette propagation est omnidirectionnelle. C'est une vibration acoustique susceptible d'éveiller une sensation auditive.

Un bruit (psychologique) est un son qui produit une sensation auditive considérée comme gênante ou désagréable.

La fréquence est la mesure de la hauteur d'un son. Les fréquences se mesurent en Hertz (Hz) : $1\text{Hz} = 1$ oscillation par seconde. L'oreille peut percevoir les fréquences comprises entre 20Hz et 16kHz environ.

Un octave est un doublement ou dédoublement de fréquence. Par exemple, 80Hz se trouve un octave au-dessus de 40Hz. Lors de mesures ou d'analyses sonores, on étudie souvent les bandes d'octave.

Le Décibel (noté dB) est une unité servant à exprimer une puissance sonore. Cette unité n'est pas proportionnelle physiquement : si on double les décibels dans une salle, les personnes présentes n'entendront pas deux fois plus de bruit. Ex : $30\text{dB} + 30\text{dB} = 33\text{dB}$: si deux sources sonores de 30dB chacune sont présentes dans une même pièce, l'intensité sonore totale sera de 33dB.

L'énergie acoustique est la puissance d'une onde sonore. C'est aussi ce que les matériaux absorbent et réfléchissent.

La réflexion est un phénomène qui se produit lorsque l'onde sonore rencontre une paroi et qui a pour effet de renvoyer une partie de l'énergie de l'onde sonore.

L'absorption est la conséquence d'une perte d'énergie acoustique en surface ou dans certains cas à l'intérieur d'un matériau. Différentes causes d'absorption existent, qui se traduisent par des comportements différents des matériaux, variables en fonction des fréquences sonores.

-les qualités d'absorption d'un matériau sont indépendantes de ses caractéristiques d'isolation.

-les capacités d'un matériau à réfléchir l'énergie sonore sont quantifiées à l'aide de ses coefficients d'absorption.

-un coefficient d'absorption se situe entre 0 et 1. S'il est de 0, aucun bruit (0%) ne sera absorbé; s'il est de 1, tout le bruit (100%) sera absorbé.

Le niveau sonore (en dB) dans une pièce dépend de l'absorption des matériaux de la pièce, des sources et de la propagation sonore.

L'isolation acoustique vise à réduire l'énergie transmise par les parois aux pièces voisines. Cette énergie est pratiquement indépendante du caractère plus ou moins absorbant des parements.

L'insonorisation (ou correction acoustique) a pour but de rendre une salle moins bruyante en réduisant son temps de réverbération. Une insonorisation vise à augmenter la quantité d'énergie absorbée et diminuer la quantité d'énergie réfléchiée par les parois de manière à diminuer la réverbération et à améliorer les qualités d'écoute de la salle.

N.B. : ne pas confondre insonorisation et isolation!

Le temps de réverbération (noté T_r) d'une pièce est le temps que le son met à décroître de 60dB (en secondes). Il varie essentiellement en fonction du coefficient d'absorption des matériaux qui composent cette pièce.

II Constat et problématique

1. Problèmes sonores

L' Agora pose un problème quotidien dans la vie des élèves, car il y règne un bruit important et permanent particulièrement intense lors des pauses. La plupart des élèves questionnés déclarent être dérangés par cet excès de bruit. Ce problème est d'autant plus important que c'est la pièce la plus fréquentée du lycée.

D'un point de vue médical, l'exposition trop longue à un bruit d'une puissance trop élevée peut entraîner des problèmes de santé au niveau auditif, notamment des acouphènes ou des pertes d'audition et selon certaines études, ce bruit serait aussi une cause de stress et de fatigue. Le bruit dans l'Agora est donc un réel problème pour la vie scolaire ainsi que pour la santé des élèves.

2. Causes

Le problème de l'Agora est dû :

A sa structure : l'Agora est vaste et presque entièrement constituée de béton lisse, peint ou recouvert d'un fin lino (en plastique). Ce type de surface possède une absorption presque nulle. L'Agora possède également de grandes baies vitrées qui sont presque aussi réfléchissantes que le béton.

Cette salle, constituée de matériaux qui n'ont presque pas d'absorption, a donc elle-même une absorption presque nulle d'où le bruit excessif qui y règne.

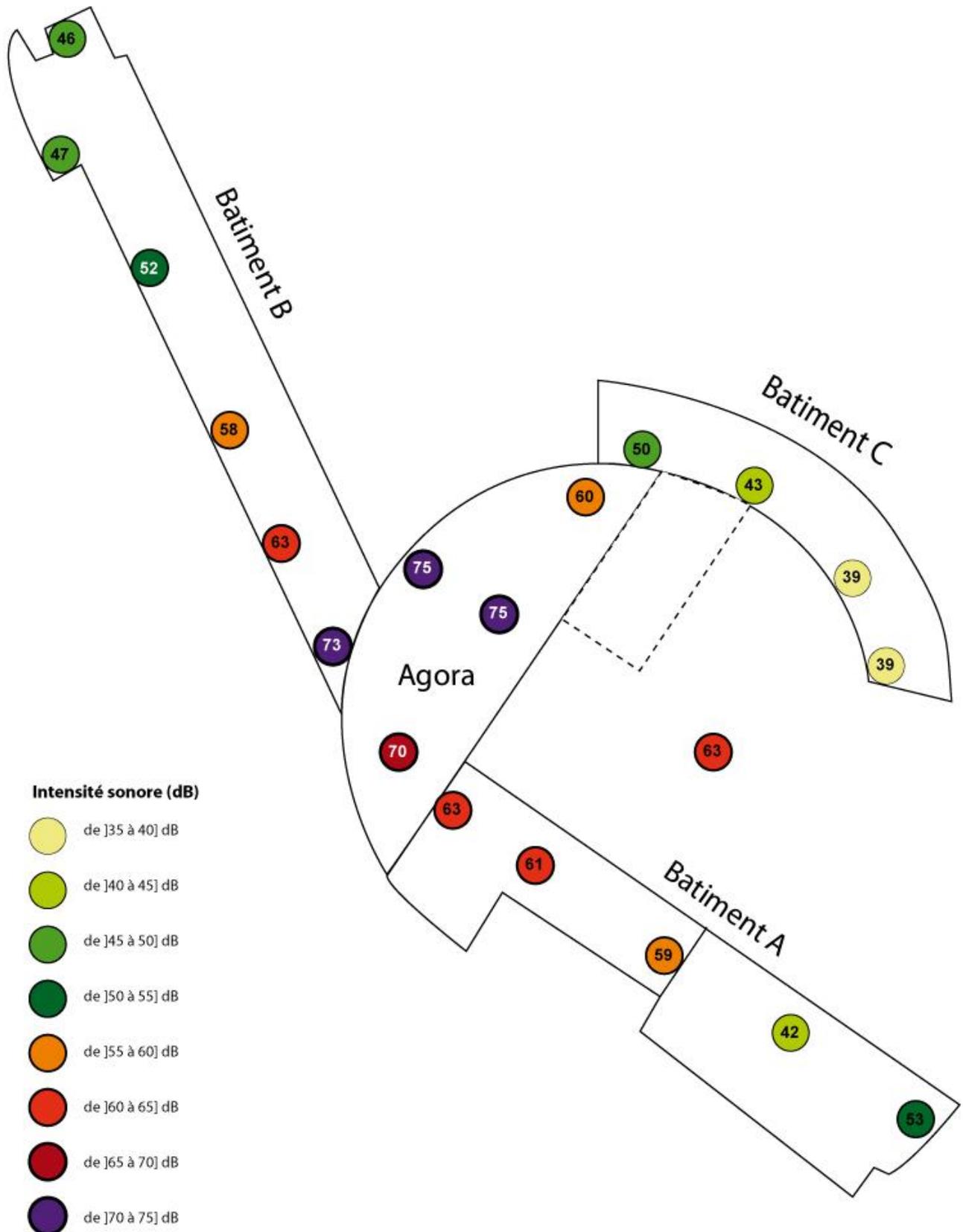
...et à « l'effet cocktail » : Cet effet a lieu quand beaucoup de personnes sont présentes dans une même pièce ou dans une pièce possédant une mauvaise acoustique (nous sommes ici en présence des deux cas). Il consiste en une augmentation de l'intensité sonore qui vient du fait que chaque personne essaie de parler plus fort dans le but de pouvoir se faire entendre et ceci en continu. Cet effet est la cause d'une augmentation considérable du niveau sonore lors des fortes fréquentations de la pièce, pendant les pauses l'intensité sonore peut atteindre 90dB, c'est à dire presque le bruit d'un marteau piqueur! (voir Annexe 1)

Ces deux facteurs font de l'Agora un lieu possédant un niveau sonore très élevé.

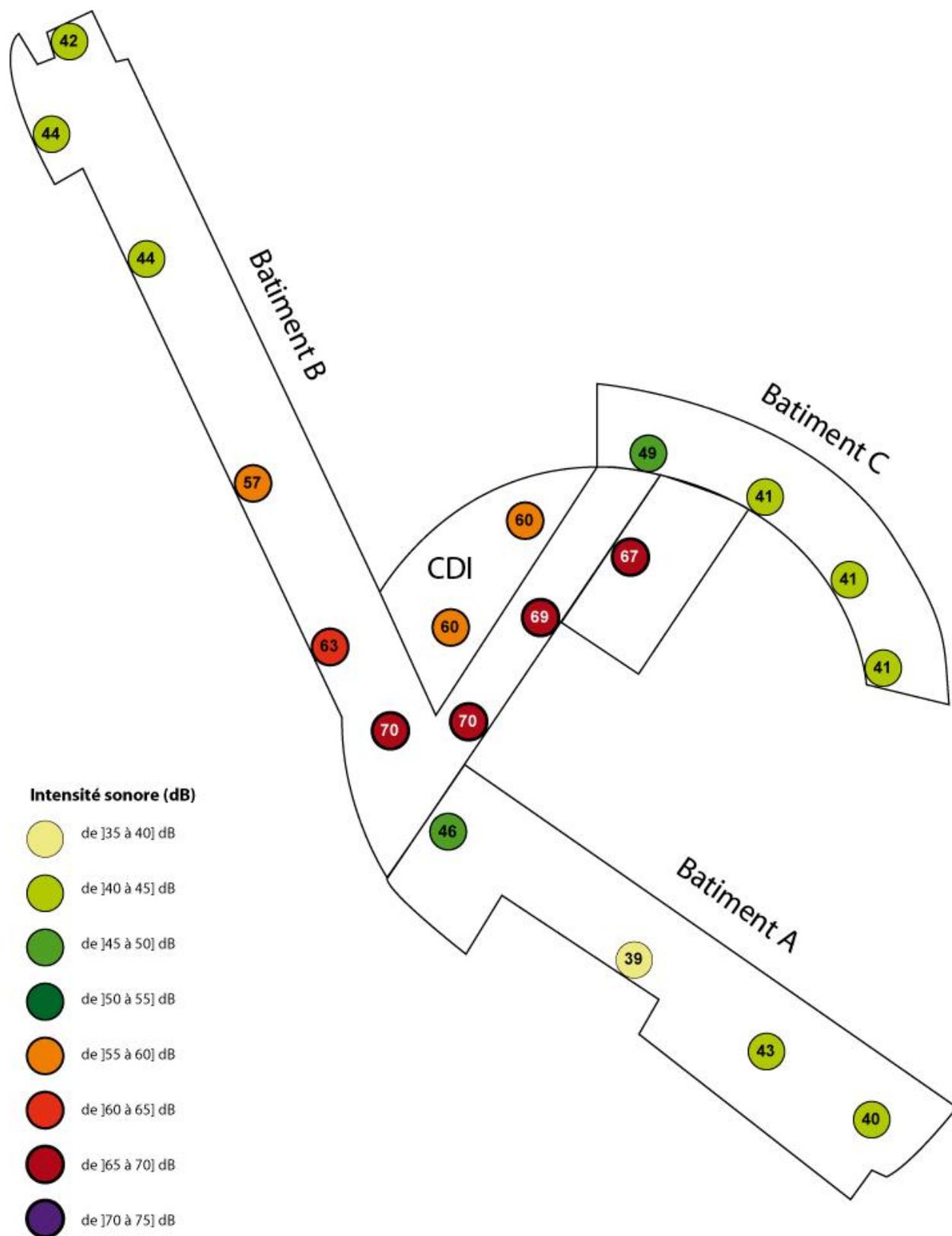
3. Cartographie du bruit dans le lycée

Cette cartographie a été réalisée pendant les cours (très peu de personnes dans les couloirs et dans l'Agora) à l'aide d'un sonomètre. Le sonomètre est un appareil permettant de mesurer l'intensité sonore en décibels. Des mesures ont été prises dans tous les bâtiments et à tous les étages pour mettre en évidence l'impact qu'a l'Agora sur le lycée entier. Chaque rond coloré correspond à une mesure prise et le chiffre qui y est présent indique l'intensité sonore exacte sur le lieu de la mesure

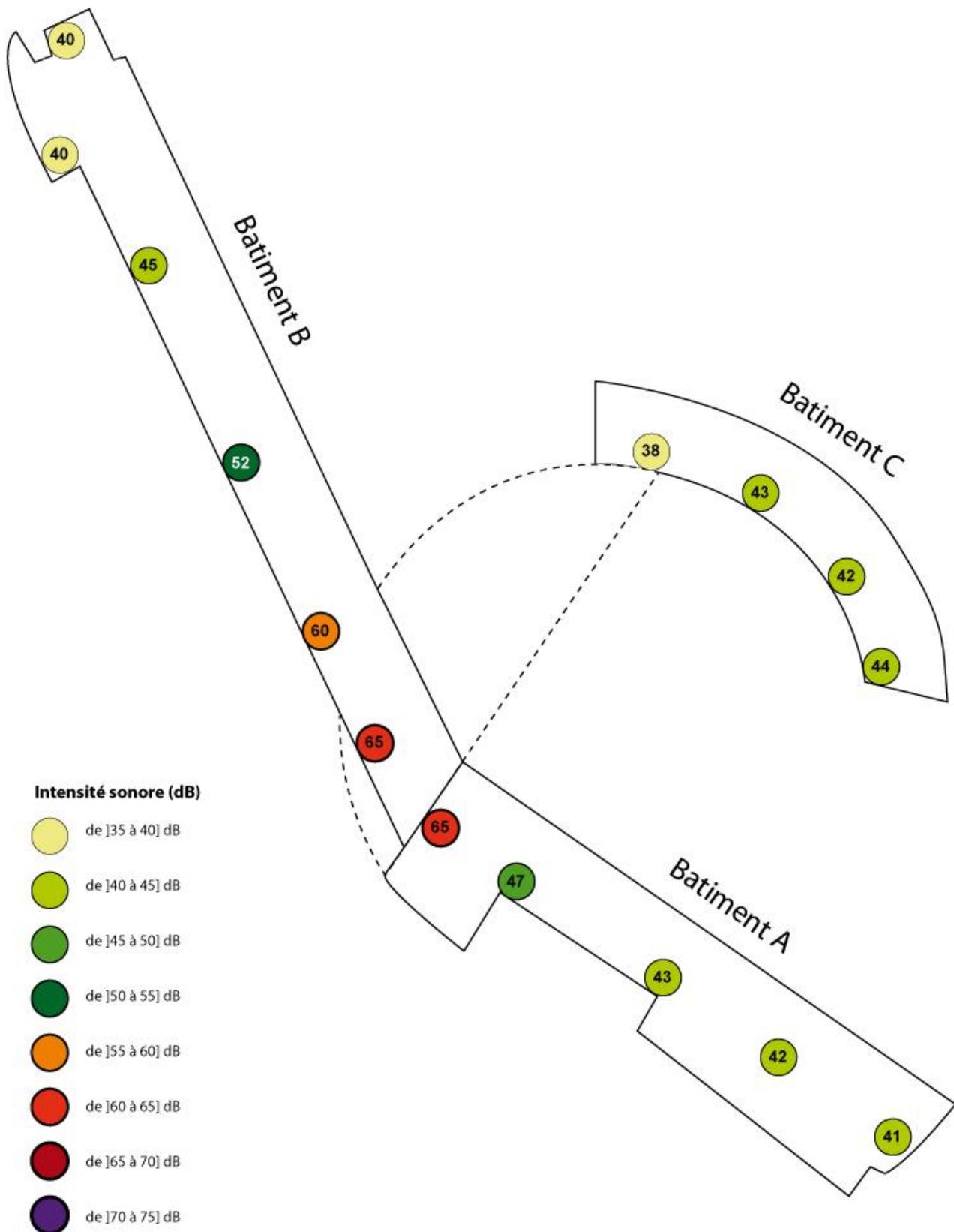
1er Niveau



2e Niveau



3e Niveau



Nous constatons d'après la cartographie que l'intensité sonore dans le lycée varie en fonction de la proximité à l'Agora.

1er niveau : tout le son est concentré dans l'Agora et l'intensité sonore diminue quand on s'en éloigne par les couloirs.

2e niveau : ici, le son est concentré vers la cage d'escalier menant à l'Agora. L'intensité sonore est globalement moins élevée qu'au 1er niveau puisqu'il est plus éloigné de l'Agora.

3e niveau : ici aussi le son est concentré au niveau de la cage d'escalier menant à l'Agora. L'intensité sonore est globalement moins élevée qu'au 1er et au 2e niveau puisque c'est l'étage le plus éloigné de l'Agora.

Nous voyons grâce à la cartographie que l'Agora cause également un problème à l'échelle du lycée car les sons qui y sont produits se propagent dans tout l'établissement.

N.B. : Au 3e niveau il n'y a pas de transition entre les bâtiments B et C. Nous voyons que l'intensité sonore augmente à l'approche de l'escalier descendant au 2e niveau.

4. Problématique générale

Ce constat nous amène à notre problématique générale :

Comment réduire l'intensité sonore dans l'Agora?

III Etude acoustique de l'Agora

1. Les objectifs fixés par la loi

Concernant la réglementation datant d'avant la construction, nous avons constaté qu'aucune disposition acoustique particulière n'avait été prise pour les salles du type de l'Agora (voir Annexe 4). La première date de 1995, et le lycée fut construit en 1991

Concernant la réglementation actuelle, nous constatons qu'il existe un arrêté concernant les salles du type de l'Agora :

D'après l'arrêté du 25 avril 2003, relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement, paru au Journal Officiel n° 123 du 28/05/2003:

Tableau récapitulatif des durées de réverbération à respecter dans les locaux

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 $\leq 250 \text{ m}^3$, Local médical ou social, infirmerie, sanitaires;administration; foyer; salle de réunion; bibliothèque; centre de documentation et d'information .	$0,4 \leq Tr \leq 0,8 \text{ s}$
Local d'enseignement, de musique, d'études ou d'activités pratiques d'un volume $> 250 \text{ m}^3$, sauf atelier bruyant (3)	$0,6 \leq Tr \leq 1,2 \text{ s}$
Salle de restauration d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$Tr \leq 1,2 \text{ s}$
Salle polyvalente d'un volume $> 250 \text{ m}^3$ (1)	$0,6 \leq Tr \leq 1,2 \text{ s}$ et étude particulière obligatoire (2)
Autres locaux et circulations accessibles aux élèves d'un volume $> 250 \text{ m}^3$	$Tr \leq 1,2 \text{ s}$ si $250 \text{ m}^3 < V \leq 512 \text{ m}^3$ $Tr \leq 0,15 \sqrt[3]{V} \text{ s}$ si $V > 512 \text{ m}^3$
Salle de sports	Définie dans l'arrêté relatif à la limitation du bruit dans les établissements de loisirs et de sports pns en application de l'article L111-11-1 du code de la construction et de l'habitation
(1) En cas d'usage de la salle de restauration comme salle polyvalente, les valeurs à prendre en compte sont celles données pour la salle de restauration, (2) L'étude particulière est destinée à définir le traitement acoustique de la salle permettant d'avoir une bonne intelligibilité en tout point de celle-ci. (3) Cf. article 8	

Ce tableau montre que la famille à laquelle l'Agora appartient (ligne colorée) doit avoir un temps de réverbération supérieur ou égal à 0,6 s et inférieur ou égal à 1,2 s pour répondre aux normes actuelles.

Il convient donc de vérifier si le temps de réverbération de l'Agora rentre dans ces normes.

2. Les méthodes d'investigation

Pour savoir si l'Agora répond aux normes actuelles, nous allons devoir déterminer le temps de réverbération de la salle par le calcul de « l'aire de Sabine » qui permet, grâce à une formule mathématique, de calculer le temps de réverbération d'une pièce. Malgré tout, ce calcul est difficile à mener pour des pièces possédant une structure complexe comme l'Agora (pans coupés, murs courbes, différences de niveau, etc...)

En parallèle, grâce à l'intervention d'un professionnel, Mr Jacques Billaud, directeur de la société Acoustibel, bureau d'études acoustiques, nous déterminerons le temps de réverbération de manière plus précise.

Les professionnels ont trois principales méthodes pour déterminer le temps de réverbération d'une salle:

-1^{ere} méthode :

Dans la salle vide et silencieuse, on place un micro relié à un ordinateur possédant un logiciel qui analyse les données sonores perçues par le micro (voir Annexe 3). L'ordinateur déclenche automatiquement l'enregistrement quand il perçoit un son d'une intensité supérieure à 100dB. Pour se faire nous utilisons

un pistolet chargé à blanc qui va provoquer un son bref et d'une forte intensité (voir Annexe 2). Le logiciel pendant l'enregistrement calcule le temps que met le son à décroître de 60dB.

-2^{eme} méthode :

Elle consiste à utiliser une source de bruit rose. C'est un ensemble de 5 haut-parleurs qui produisent un bruit rose dans toutes les directions. Le bruit rose est un son de même intensité sur toutes les fréquences. Cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats. Elle s'utilise dans le même contexte que la méthode 1, c'est-à-dire dans une ambiance silencieuse.

-3^{eme} méthode :

Une autre solution consiste à produire une simulation sur un ordinateur grâce à un logiciel de calcul vectoriel très complexe.

3. Calcul mathématique du temps de réverbération dans l'Agora

Ce calcul est celui de l'aire de Sabine. Il permet de calculer le temps de réverbération (Tr) en fonction du volume, et des coefficients d'absorption respectifs de chaque surface.

$$Tr = \frac{(0,16V)}{(\sum \alpha S)}$$

$$Tr = \frac{(0,16 * 3150)}{(109,4 * 0,25 + 31,16 * 0,01 + 64,9 * 0,01 + 72,6 * 0,25 + 48,8 * 0,15 + 22 * 0,01 + 19,8 * 0,01 + 630 + 0,1 + 630 * 0,01)}$$

$$Tr = \frac{504}{124}$$

$$Tr = 4,1 \text{ s}$$

On veut un Temps de réverbération inférieur à 1,2 s donc :

$$1,2 = \frac{504}{?}$$

$$? = \frac{504}{1,2} = 420$$

Il nous faut une aire de sabine de 420 unités

Enlevons la surface du plafond de la précédente aire de sabine :

$$124 - 630 * 0,01 = 117$$

On doit soustraire 117 à 420 pour savoir l'aire de sabine qu'il nous faut au futur plafond :

$$420 - 117 = 302$$

Il nous faut un plafond avec une aire de sabine de 302 :

Prenons un coefficient d'absorption de 0,85 :

$$302 = ? * 0,85$$

$$? = \frac{302}{0,85} = 355 \text{ m}^2$$

Il nous faut 355 m² de panneaux au plafond, Si nous partons sur une base de 50 € pour un m² fourni et posé

$$355 * 50 = 17750 \text{ € pour remettre l' agora aux normes acoustiques.}$$

Ce chiffre est une approximation car l'aire de sabine ne tient pas compte de la structure de la salle.

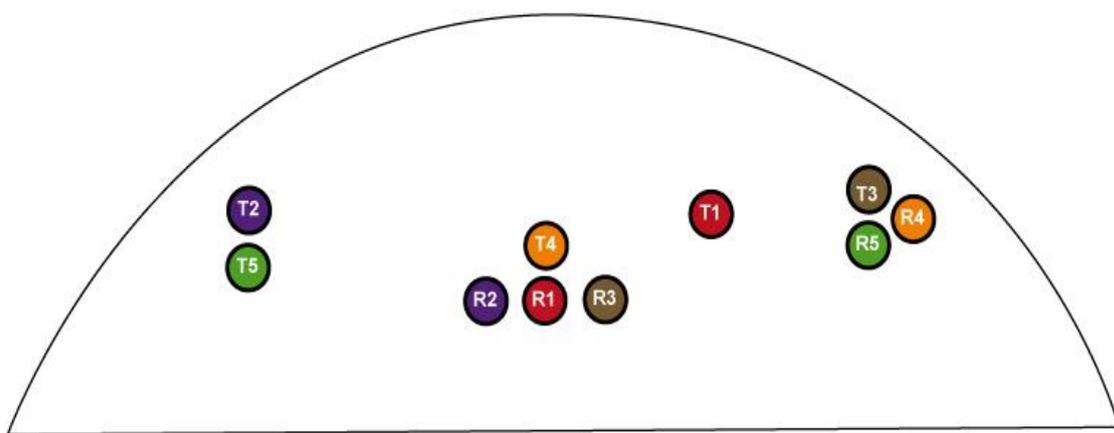
De plus 50 euros de m² fourni et posé est une approximation qui sera sûrement plus chère lors d'une éventuelle réalisation des travaux.

Nous avons profité du calcul pour faire un premier devis. La somme finale ne prend pas en compte le coût des échaffaudages qui ne sera pas négligeable compte tenu de la hauteur du plafond.

4. Etude du temps de réverbération par tirs

Après ce calcul qui nous a donné une première idée des résultats, nous avons eu besoin de résultats plus précis par une étude concrète. Pour cela nous avons procédé selon la 1ere méthode décrite dans *les méthodes d'investigation*. Nous avons effectué une intervention dans l'Agora avec Mr Billaud et un de ses ingénieurs un mercredi après-midi pour avoir une salle vide et silencieuse. Grâce à son matériel, nous avons enregistré 5 tirs (au pistolet) avec des placements différents pour le micro et la source à chaque enregistrement (voir plan).

Localisation des tirs et des réceptions



T = Localisation du tir

R = localisation de la réception

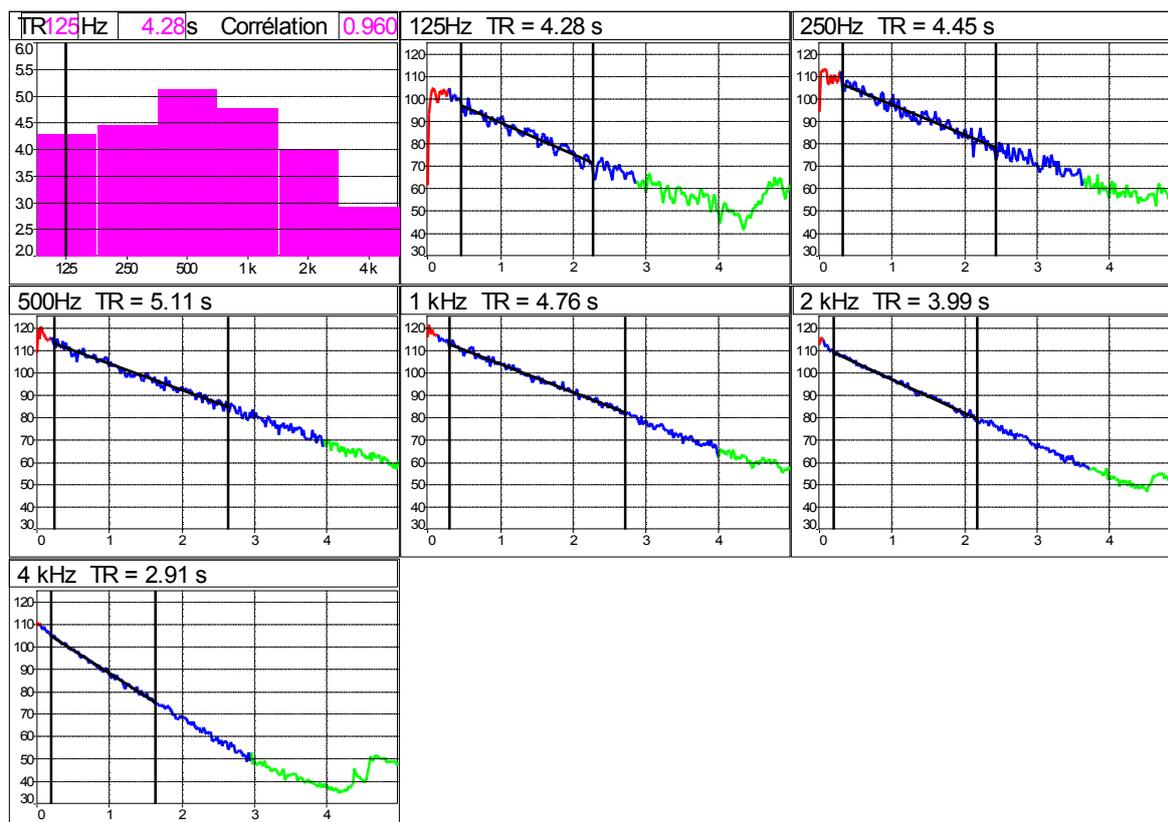
Les entrées de l'Agora se trouvent en bas du plan. Il faut bien noter qu'il y a une différence de niveau dans l'Agora : il y a un couloir surélevé qui suit l'arc de cercle. Ces zones plus hautes sont plus proches du plafond et subissent une pression acoustique plus forte.

Suite à ces mesures, nous avons établi les graphiques suivants :

TIR N°1

Emission : centre décalé droite

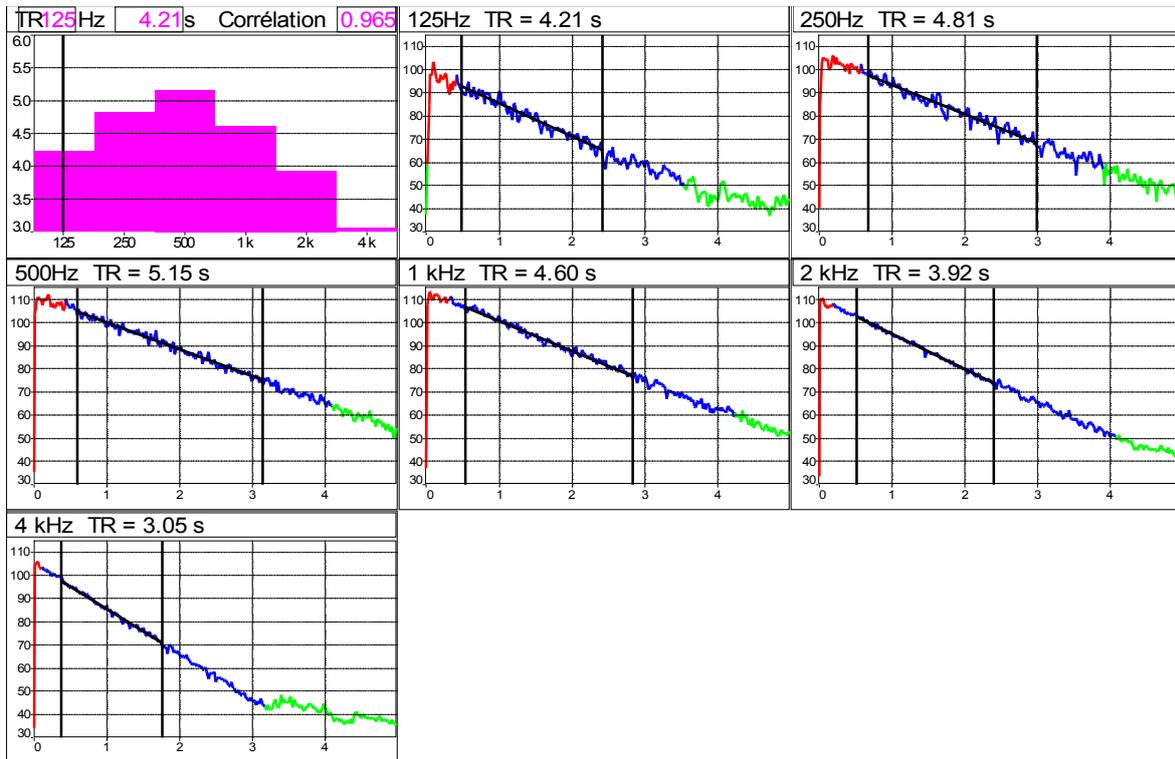
Réception : centre



TIR N°2

Emission : décalé gauche

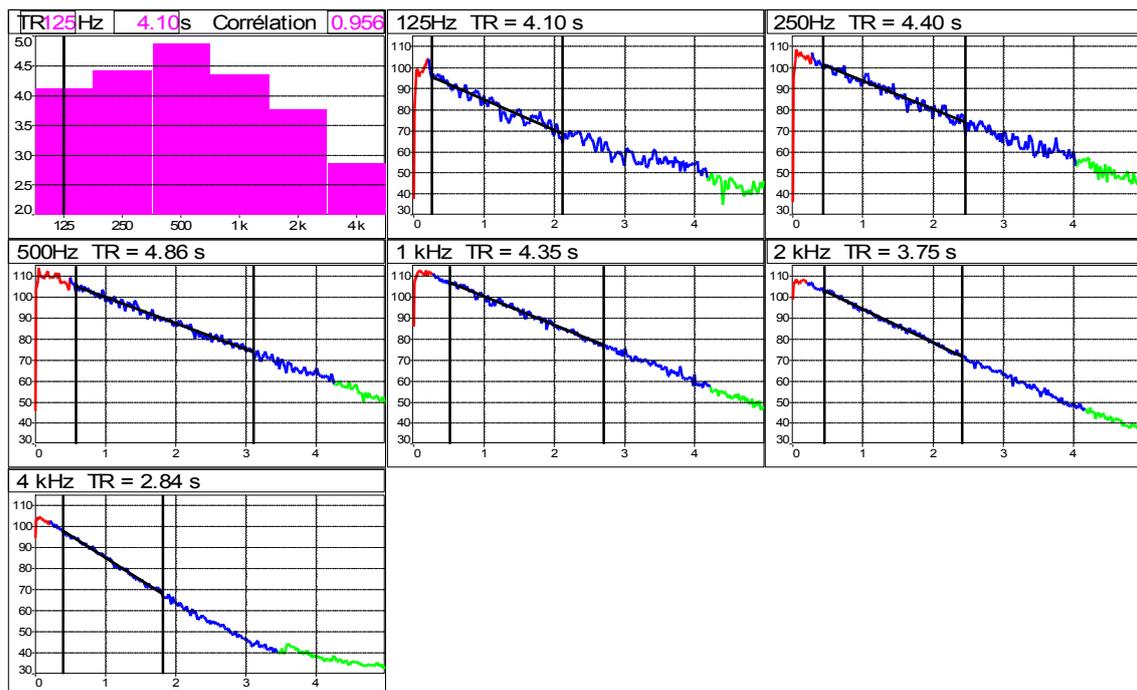
Réception : centre



TIR N°3

Emission : décalé droite

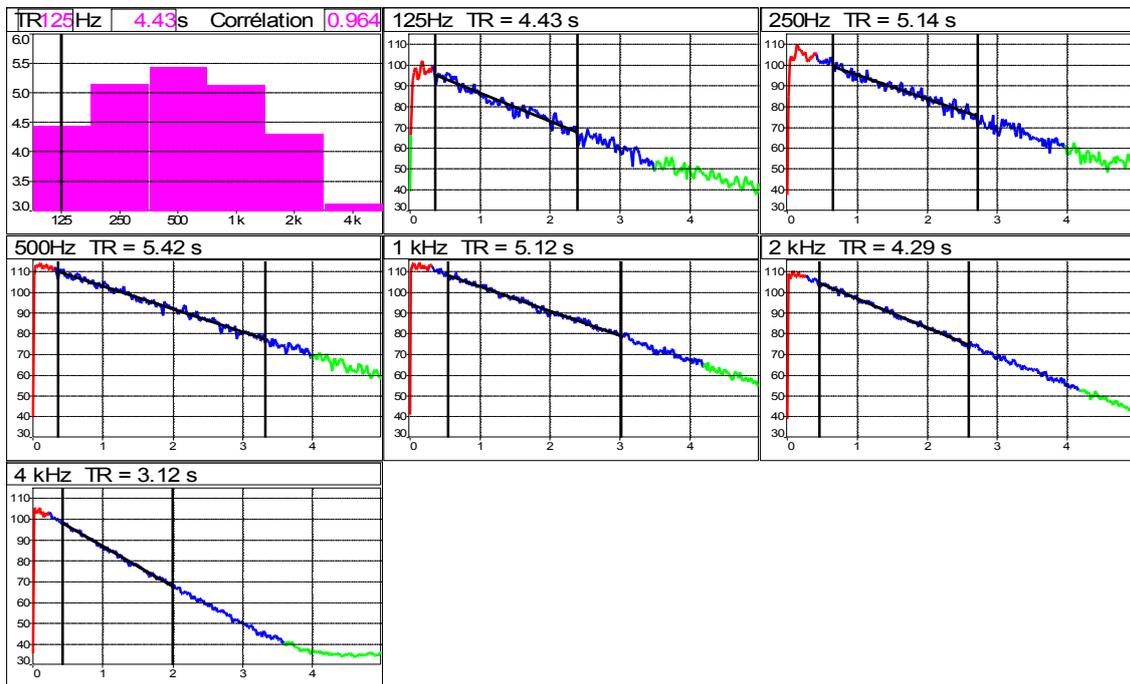
Réception : centre



TIR N°4

Emission : centre

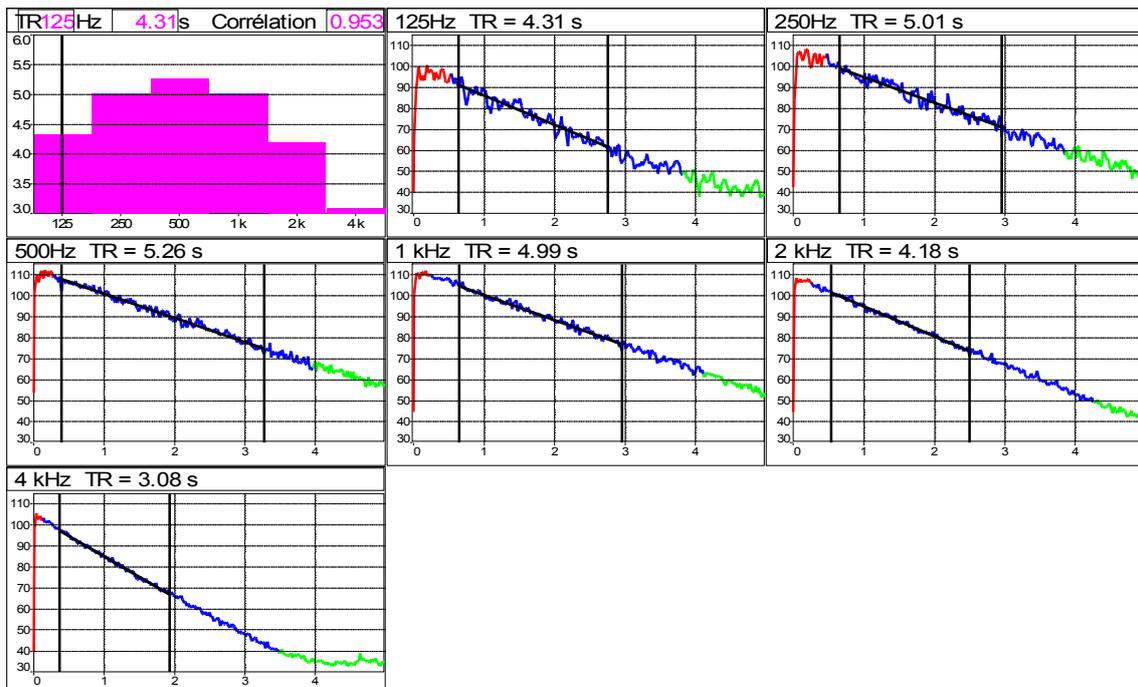
Réception : décalé droite



TIR N°5

Emission : décalé gauche

Réception : décalé droite



Chaque enregistrement contient six graphes. Chaque graphe correspond respectivement aux fréquences : 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hertz (voir définition de la fréquence).

Pour mesurer le Tr, nous devons établir un tableau récapitulatif des résultats obtenus puis calculer 5 moyennes correspondantes aux 5 fréquences.

Tableau récapitulatif des résultats obtenus suite aux mesures :

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Tir N°1	4,3s	4,5s	5,1s	4,8s	4,0s	2,9s
Tir N°2	4,2s	4,8s	5,2s	4,6s	3,9s	3,1s
Tir N°3	4,1s	4,4s	4,9s	4,4s	3,8s	2,8s
Tir N°4	4,4s	5,1s	5,4s	5,1s	4,3s	3,1s
Tir N°5	4,3s	5,0s	5,3s	5,0s	4,2s	3,1s
Moyennes	4,3s	4,8s	5,2s	4,8s	4,0s	3,0s

On calcule enfin une moyenne globale des Tr de chaque fréquence sans prendre en compte celle de 125Hz et celle de 4kHz pour une plus grande précision des résultats.

Nous obtenons un Tr de **4,7 s**.

Ce resultat est très proche mais néanmoins supérieur à celui calculé avec l'aire de Sabine, le devis établis précédement sera donc plus élevé.

IV Solutions

1. Le choix des matériaux

Pour une correction acoustique, il faut définir puis installer une certaine surface de matériaux permettant de réduire le temps de réverbération de la salle.

Il existe différents types de matériaux :

-panneaux absorbants : Ils absorbent la majeure partie des ondes sonores, par friction de l'air (matériaux poreux, laine de verre ou de roche, mousse acoustique, etc...) ou par compression (élastiques, moquette, liège, feutre, etc...). Le plus souvent, l'efficacité est plus forte pour des fréquences plus élevées.

-résonateurs : ils absorbent un maximum d'énergie autour d'une fréquence donnée.

-diffracteurs : ils permettent une répartition homogène du son réverbéré pour toutes les fréquences. Ils sont très utilisés dans les salles de concert ou dans les studios d'enregistrement car ils donnent une meilleure qualité sonore.

2. Solution choisie

Lorsqu'on veut corriger une salle où la plus grande source sonore est la voix humaine, il est préférable d'utiliser un matériau absorbant de manière efficace les gammes des fréquences correspondantes à celles de la voix. Ces fréquences sont comprises entre 250 et 500Hz. Il nous faut donc trouver un matériau adapté.

L'absorption des différents matériaux est définie par les coefficients d'absorption correspondant à chaque bande d'octave (voir Définition). Nous avons trouvé un panneau absorbant constitué de laine de roche de la marque

« Spectrisol » correspondant bien à notre besoin :

Référence : SPSG1F

Masse volumique : 70Kg/m³

Epaisseur : 50mm

Prix du m² : 12€

Coefficients d'absorptions :

125Hz: 0.70

250Hz: 0.85

500Hz: 0.95

1000Hz: 0.95

2000Hz: 0.90

4000Hz : 0.80

Nous voyons bien que ce matériau absorbe efficacement les fréquences de la voix (250 et 500Hz)

Il faudra poser les matériaux absorbants sur le plafond car il présente une plus grande surface que les murs et parce qu'il n'existe pas de matériaux adaptés au sol. C'est un endroit inaccessible ne craignant pas les dégradations. Pour augmenter leur efficacité, les panneaux devront être fixés à l'aide d'un faux plafond laissant un vide de 10 à 20cm entre le plafond et les panneaux. Ceci permet une meilleure absorption des basses fréquences. D'après nos résultats et l'avis du professionnel, nous pensons que toute la surface du plafond devra être recouverte pour un résultat optimal.

N.B. : les poutres ne devront pas être recouvertes car cela demanderait des découpes trop compliquées pour un résultat très peu bénéfique.

3. Bénéfice du travail

Si ce projet venait à se réaliser, on constaterait une forte baisse du niveau sonore de l'Agora (réduction d'environ 30 à 40dB). Cette pièce aurait un temps de réverbération correct et l'effet cocktail en serait diminué. Il n'y aurait plus présence d'un « brouhaha » constant. Cela éviterait, entre autres, d'éventuels problèmes de santé aux élèves. Les personnes restant longtemps dans l'Agora ne seraient plus soumises à une gêne et à une fatigue inutile.

Conclusion

Nous avons comme thème la correction acoustique de l'Agora. Nous avons appris beaucoup de choses très intéressantes concernant le son physique. Le travail avec un professionnel a été très enrichissant. Nous avons également participé à la conférence d'un musicien atteint d'un accouphène, venu pour nous sensibiliser au niveau des risques du son sur la santé. En ce qui concerne notre problématique, nous avons réussi à trouver une solution concrète et envisageable afin de retablir le Tr à un niveau normal. Il nous reste encore à déterminer le coût exact des opérations et la quantité de matériau est à déterminer plus précisément.

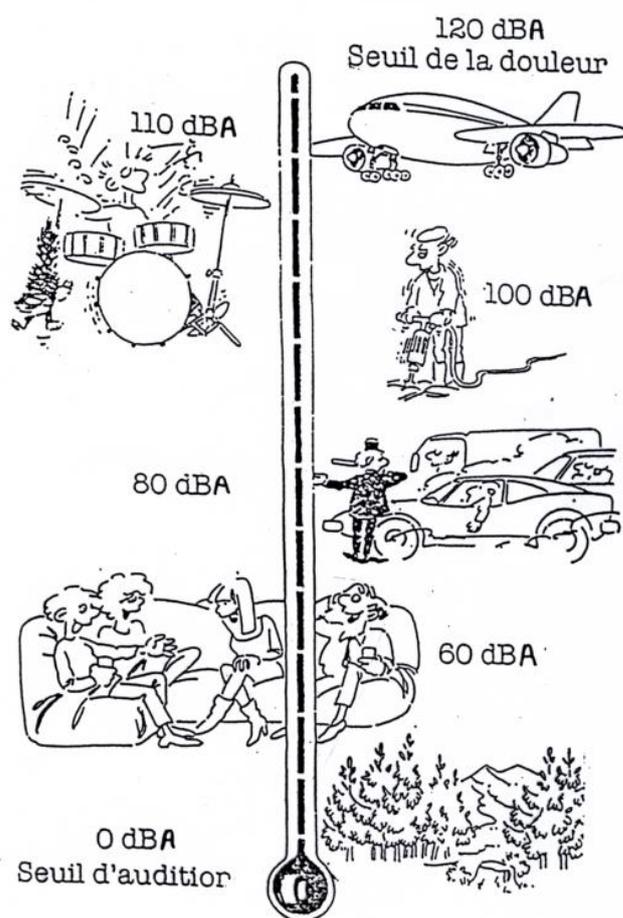
La réalisation de la cartographie ainsi que le calcul du Tr nous ont posé quelques problèmes résolus dont la difficulté du calcul du volume de l'Agora ainsi que le dessin du plan du lycée que nous avons du créer.

Nous espérons que notre projet aboutira de façon concrète. Cela présenterait dans tous les cas un grand intérêt pour le lycée entier.

Annexes

Annexe 1

échelle des niveaux de pressions sonores



Annexe 2



Pistolet utilisé pour les tirs.



Balles à blanc.

Annexe 3



Ordinateur muni du logiciel d'enregistrement.



Micro connecté à l'ordinateur.

Annexe 4

Extrait de la réglementation antérieure à celle de 1995 concernant l'Agora :

2ème famille: abri, détente et jeux :

Pas de dispositions particulières.

Bibliographie

MATRAS Jean-jacques. Le Son. Presses universitaires de France, nouvelle édition. 126p. . Que sais-je?.

ZANANIRI C. . Musique et physique. Ellipses, 2002. 144p. . La physique pour tous.

Wikipedia. Son (physique). [En ligne]. Mis à jour le 17 novembre 2007.
[Consulté le 19 novembre 2007] . Disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/son>

Spectra. Laine de roche « Spectrisol ». [En ligne]. Mis a jour le 2 avril 2007.
[Consulté le 7 janvier 2008]. Disponible sur : <http://www.spectra.fr/IMG/pdf/laine-de-roche-spectrisol.pdf>