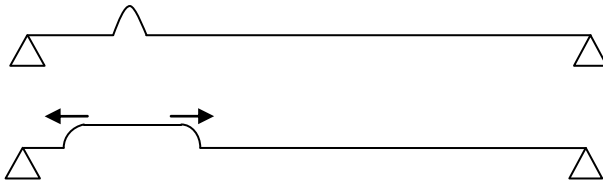


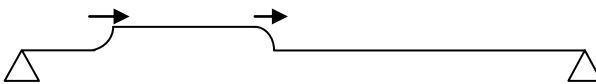
Réponses aux questions d'examen d'acoustique 2011-2012

Question 1 : Décris la propagation de la déformation initiale d'une corde de piano frappée par un marteau (schéma(s) + explication « par étapes » du premier aller-retour)

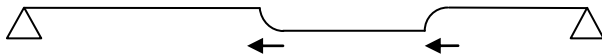
Réponse : Le marteau percute la corde. Elle se déforme (elle prend la forme du marteau au point d'impact alors que partout ailleurs, elle est encore au repos). De cette déformation naît deux ondes. La première se propage vers la droite (vers le chevalet) et la deuxième se déplace vers la gauche (vers l'agrafe).



Ensuite, l'onde qui se déplace vers l'agrafe se réfléchit sur celle-ci et change de signe (elle devient négative). Cependant la partie négative s'additionne avec la positive (qui n'a pas encore buté contre l'agrafe). On obtient donc quelque chose de nul (corde au repos).



On obtient donc un front d'onde de la forme suivante se déplaçant vers la droite. Après réflexion contre le chevalet (à droite) le front d'onde change de signe :



Au fur et à mesure que le front d'onde se réfléchit, il s'arrondit car il perd de l'énergie par transmission au chevalet et par frottements.

Question 2 : Cite et décris les trois types de vibrations dans une corde fixée entre des supports infiniment rigides (A). Dans le piano, quels sont les deux types les plus importants ? (B) Explique l'importance de l'accordage entre ceux-ci, en précisant le rôle de chacun, du point de vue des sons émis (C).

Réponse :

A. Mode de vibration :

- Mode longitudinal : le sens de la vibration se fait selon l'axe de propagation de l'onde
- Mode transversal : le sens de la vibration se fait selon l'axe perpendiculaire au sens de propagation de l'onde (comme question 1)
- Mode en torsion : la corde se tord selon l'axe de propagation de l'onde.

B. Le mode transversal est dominant. Le longitudinal aussi mais à la frappe. Il apparaît quand il y a étirement.

C. Le piano doit être accordé selon ces deux modes pour optimiser sa sonorité.

Question 3 : Ecris la formule reliant la fréquence fondamentale d'une corde en vibration transversale à sa tension, sa masse linéique et sa longueur. Partant d'une corde donnée, donne deux manières d'atteindre l'octave supérieure (en faisant par exemple varier la masse linéique et, séparément, la tension) et explique chacun de tes choix.

Réponse :

$$F_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad \text{où } T : \text{ tension, } L : \text{ longueur, } m : \text{ masse linéique}$$

Pour atteindre l'octave supérieure, il faut doubler la valeur de F_0 . Plusieurs possibilités :

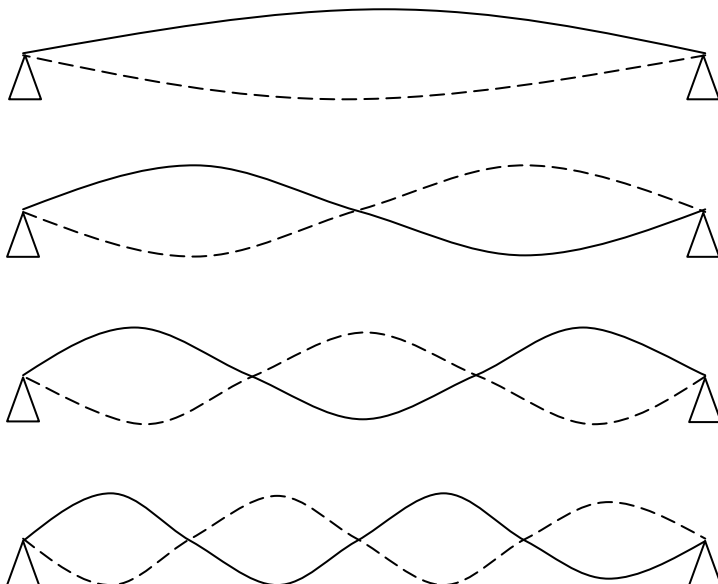
- Diviser la longueur par deux
- Diviser la masse linéique par 4
- Multiplier la tension par 4
- Combinaison des trois paramètres

Question 4 : Pourquoi utilise t'on des cordes filées plutôt que simplement augmenter leur diamètres « plein » ?

Réponse : Le filage autour d'une corde pleine permet d'en augmenter la masse linéique (nécessaire pour des sons grave) sans perdre en flexibilité. Une corde plus flexible permet d'avoir une plus grande quantité d'harmoniques. Si on avait simplement augmenté le diamètre de la corde pleine sans faire de filage, le son serait catastrophique.

Question 5 : Représente les quatre premiers modes de vibration transversale d'une corde.

Réponse :



Question 6 : Explique ce que le théorème de Fourier apporte à l'étude des sons et des corps en vibration en général. D'après lui quelle relation existe-t-il entre les fréquences contenues dans un son *parfaitement périodique*?

Réponse : Fourier démontre qu'une onde périodique peut se décomposer en une somme de modes propres de vibration dont les fréquences sont les multiples de la fréquence fondamentale ($f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, \dots$). Chacun de ces modes propres est pondéré par une intensité. Ainsi si les intensités des modes de haute fréquence sont élevées, on aura un son plus percant.

Question 7 : A toute déformation d'une portion de corde correspond un *spectre de fréquences* émises. Plus cette « vaguelette » se déplace le long de la corde plus elle « s'arrondit ». Expliquer quelle influence cela aura au niveau des fréquences contenues dans le son au cours du temps.

Réponse : Au plus une onde est pointue, acérée, on plus elle contient des harmoniques élevées (Fourier). Lorsque la vaguelette se déplace, et s'arrondit, elle perd donc progressivement ses hautes fréquences et conserve davantage les basses fréquences. Le son devient donc plus doux au cours du temps.

Question 8 : Qu'est ce que l'inharmonicité ? (développer en donnant des exemples d'instruments harmoniques, partiellement inharmoniques et franchement inharmonique).

Réponse : Un son est inharmonique lorsque ses partiels ne sont pas exactement des multiples entiers de la fondamentale. Ceci implique par ailleurs que le son n'est pas tout à fait périodique. Le piano est un instrument légèrement inharmonique (les rapports de fréquences entre la fondamentale et les partiels sont de $1 ; 2,001 ; 3,005 ; 4,013$).

Question 9 : Explique ce qui confère aux marteaux de piano des propriétés *non linéaires*. Qu'est ce que cela veut dire (du point de vue de l'émission sonore) ?

Réponse : Le feutre des marteaux a la propriété d'être plus dur lorsqu'il frappe les cordes à grande vitesse qu'à petite vitesse. Cette propriété implique que le contenu fréquentiel du son (et donc son timbre) sera différent en fonction de la force avec laquelle la note est jouée (plus d'aigus quand on frappe plus fort). En conséquence :

Jouer 2 fois + fort \neq avoir 2 fois plus de volume (Vu que le timbre change)

ce qui constitue une relation non linéaire.

Question 10 : Explique quel est l'intérêt, du point de vue de la transmission de l'énergie, de mettre en communication les cordes d'un instrument avec une table d'harmonie dont l'impédance acoustique est bien plus élevée ? Mais si l'impédance de la corde est vraiment trop petite par rapport à celle de la table, comment réduire cette distance ? (prendre le cas du piano)

Réponse : L'énergie contenue dans la corde sera mieux convertie en son si elle met en vibration une table d'harmonie, car une table brasse plus d'air et est moins sensible au phénomène de « court-circuit acoustique ». Si l'impédance de la corde est trop faible par rapport à celle de la table, on peut réduire cette écart en doublant ou triplant les cordes pour une même fondamentale ou en ajoutant un filage de cuivre.

Question 11 : Explique ce que signifie le titre « intensité » contre « sustain » (en précisant à que type d'instrument tu te réfères).

Réponse : Dans le cas du piano, on fournit une certaine quantité finie d'énergie à la corde en enfonçant une touche. Si la transmission d'énergie vers la table d'harmonie est très bonne (si la tension de la corde est grande et le chevalet haut), on aura une grande intensité sonore mais qui ne durera pas (mauvais sustain) car l'énergie sera très vite « consommée ». Au contraire, si la transmission d'énergie est faible (faible tension et chevalet bas), on aura une faible intensité de son mais le son durera plus longtemps (bon sustain). Il faut donc inévitablement trouver un compromis entre ces deux cas de figures et donc entre l'intensité et le sustain.

Question 12 : Qu'est ce qu'un court-circuit acoustique, lorsque l'on étudie le mouvement de vibration d'une table d'harmonie ? Comment peut-on l'éviter dans les cas de très basses fréquences (premiers modes)?

Réponse : Un court circuit harmonique, c'est quand la vibration d'une membrane ou d'une table d'harmonie provoque un mouvement de va et vient de l'air entre les deux côtés de la membrane plutôt que de générer une onde sonore. L'énergie de la membrane est donc utilisée à pomper l'air d'un côté à l'autre plutôt qu'à produire du son. Ce phénomène a lieu surtout dans les basses fréquences puisque l'air a alors le temps de se déplacer avant que le mouvement de la membrane ne s'inverse. Le phénomène peut être évité en séparant physiquement les deux surfaces de la table d'harmonie par une boîte rigide presque fermée. C'est typiquement le cas des baffles, ou la seule échappatoire à l'air situé derrière la membrane est un petit trou dans la caisse. Une caisse de résonance d'un instrument à corde frottée utilise également ce principe avec les ouïes comme seuls trous.

Question 13 : Etant donnée une représentation de mode propre de vibration de table d'harmonie de piano, être capable d'expliquer le comportement vibratoire de celle-ci, de situer lignes nodales et ventres et « placer » des petits signes « + » et « - »

Réponse : Les zones vibrantes (ventres) sont séparées par des lignes sur lesquelles il n'y a pas de mouvement oscillatoire (lignes nodales). Deux ventres adjacents vibrent en opposition de phase (« + » et « - »). Plus la fréquence est élevée, plus les ventres sont nombreux. Ces états de vibrations sont appelé modes propres de la table. Il existe entre les ventres adjacents des échanges d'air (des « + » vers les « - ») qui diminuent l'efficacité de la radiation sonore de la table.

Question 14 : Explique quels sont les effets respectifs du volume d'air, de la surface d'ouverture et de l'épaisseur d'ouverture sur la fréquence de résonance principale de Helmholtz (vibration de l'air emprisonné dans une enceinte avec ouverture sur l'extérieur)

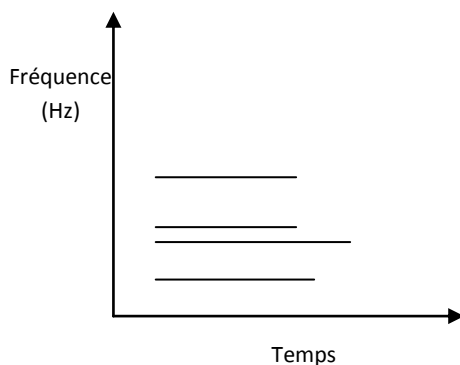
Réponse : La fréquence fondamentale de résonance dans une cavité de volume « V » ouverte à l'aide d'une ouverture d'épaisseur « h » et de surface « S », dépend de ces trois paramètres de la manière suivante :

- F_0 diminue quand V augmente
- F_0 diminue quand h augmente
- F_0 diminue quand S diminue

Question 15 : Etre capable de reconnaître, d'après un sonagramme donné, un son (in)harmonique.

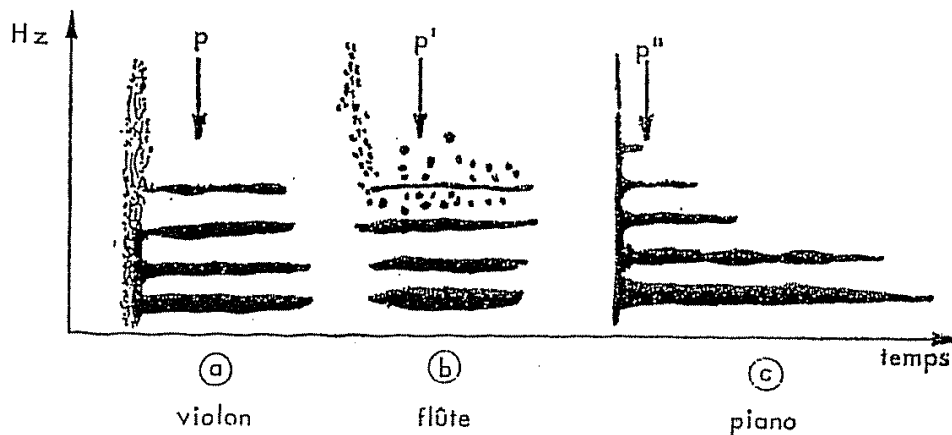
Réponse : Dans un sonagramme, on reconnaît un son inharmonique (fréquences harmoniques ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de base) par la non-équidistance entre les raies correspondant aux différentes harmoniques.

Exemple d'un son inharmonique:



Question 16 : Explique l'importance des transitoires dans la reconnaissance du son d'un instrument. Interprète la fig.66 p.3 (« rôle des transitoires ») fournie.

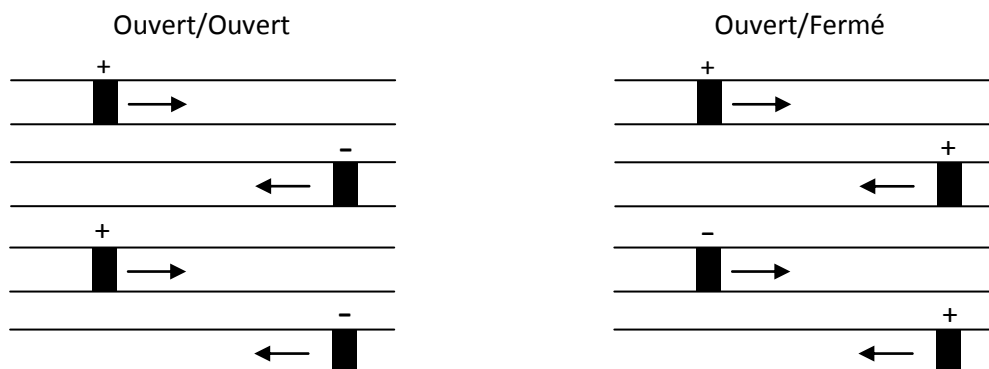
Réponse :



Les transitoires, c'est l'attaque et l'extinction du son. Comme on peut le voir sur le sonagramme ci-dessus, le son produit pendant les transitoires est particulier et compliqué. Son contenu fréquentiel est peu défini (proche du bruit) mais est très spécifique à chaque instrument. On voit ici que le piano, le violon et la flûte ont des transitoires d'attaque d'allures très différentes. C'est en grande partie la particularité des transitoires de chaque instrument qui nous fait en reconnaître le son.

Question 17 : Explique, en dessinant des « instantanés » successifs, le déplacement d'une perturbation dans un tuyau. (Séparer les deux cas : ouvert/ouvert et ouvert/fermé). Donne les deux règles concernant le « signe » de la perturbation en fonction du type de réflexion (sur extrémité fermée ou ouverte). Montre comment on peut expliquer intuitivement le changement de signe, quand il a lieu.

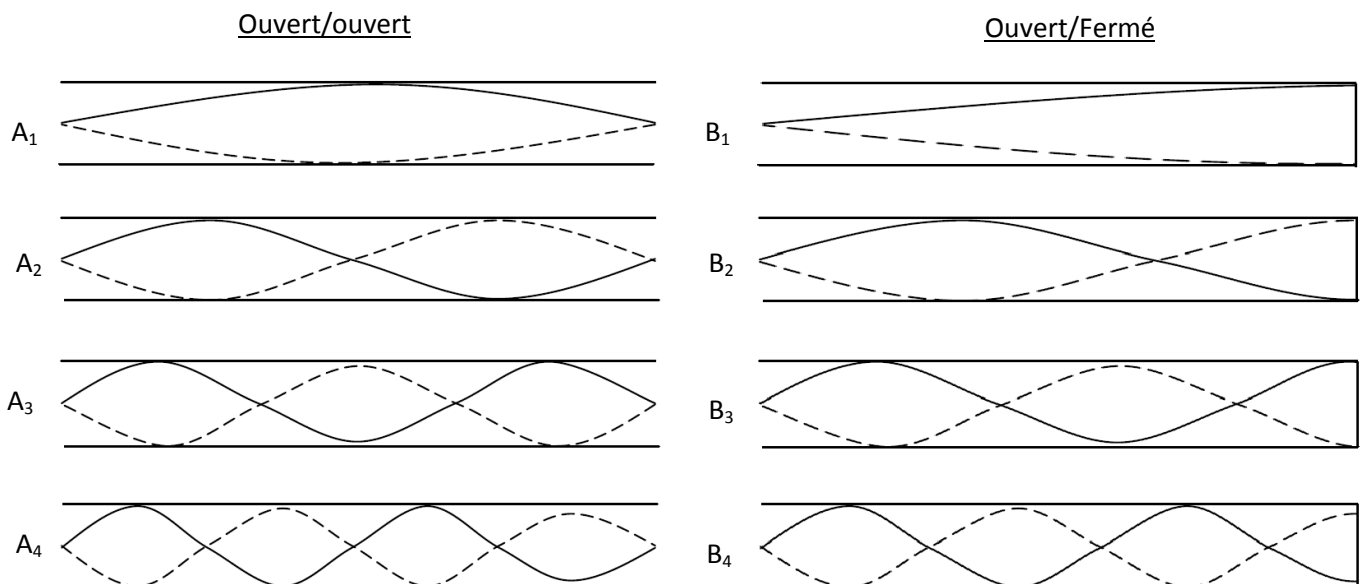
Réponse :



Comme vous pouvez le voir sur ce schéma, la réflexion sur extrémité ouverte de tuyau implique un changement de signe car lorsque la surpression (si on considère « + ») sort du tube, il se crée un appel d'air qui crée une zone de dépression. Au contraire, une réflexion sur une extrémité obstruée maintient le signe du front d'onde car la surpression (si on considère « + ») s'accumule dans le fond du tube et est réfléchi.

Question 18 : Dessine deux colonnes, la gauche étant dédiée au tuyau ouvert/ouvert, la droite au tuyau ouvert/fermé. Pour chacun de ces cas, représente les 4 premiers modes « d'ondes stationnaires » (« ventres et nœuds »), en les classant et en montrant les rapports de fréquences qui existent entre eux, en choisissant le premier mode (fondamental) du tube ouvert/ouvert comme fréquence de référence. (Tuyaux cylindriques, comme la flûte)

Réponse :



Si nous considérons le cas A_1 comme ayant une fréquence f_0 , Les harmoniques (A_2, A_3, A_4) ont pour fréquence : $2 f_0, 3 f_0, 4 f_0$ (soit $n * f_0$ où n est l'indice). Les fréquences des modes propres successifs du tuyaux ouvert/fermé du tuyaux valent quant à elles : $f_0/2, 3 f_0/2, 5 f_0/2, 7 f_0/2$ (soit $(2n-1) * f_0/2$ où n est l'indice).

Question 19 : Explique clairement par quel mécanisme le souffle constant (excitation continue) du saxophoniste est transformé en une variation de débit au cours du temps grâce aux propriétés de l'anche. Lorsque ce souffle est très « fort », l'anche arrive périodiquement à un comportement « limite ». Explique lequel, et quel effet cela a sur le timbre de l'instrument, en parlant du phénomène de distorsion.

Réponse : L'anche fonctionne un peu comme un ressort. En condition de jeu, elle se met à vibrer on fonction des fréquences de résonance de l'air dans le saxophone. Cela étant, le

moteur du son, la source d'énergie c'est le souffle de l'instrumentiste qui lui est constant (il n'oscille pas). L'anche est donc un moyen pour convertir un flux d'énergie constant en un flux oscillant d'énergie acoustique. Lorsque le flux est très fort, la pression exercée par l'air de la bouche sur l'anche est forte et plaque celle-ci contre le bec pendant la partie du cycle où la pression à l'intérieur du bec est plus faible. Ce plaquage implique que la courbe du débit d'air en fonction du temps possède des angles et que ces angles, dit harmoniques élevés (fourier). Le timbre change donc et se distord. Au plus la pression est élevée, au plus cette distorsion est grande.

Question 20 : Explique clairement le principe de fonctionnement des trous de tonalité, et à quoi ils servent. Même question pour les trous de registre.

Réponse : Les trous de tonalité permettent de changer artificiellement la longueur de résonance du tube, ce qui en change la fréquence de résonance. Chaque trou ouvert équivaut à un tuyau plus petit de 6% environ (→ un demi-ton plus haut). Les trous de registre servent eux à passer à l'octave supérieure. Ces trous se situent plus proche du bec. Une fois ouverts, ils ont la propriété « d'amortir » les basses fréquences (effet de « court-circuit » harmonique) ne laissant plus que les fréquences supérieures sonner. Dans la série (f , $2f$, $3f$, ...), si on supprime la fréquence fondamentale, la nouvelle fréquence dominante devient celle de l'octave supérieure ($2f$). Ça a donc bien l'effet voulu.