

Mots-clefs « Traitement du son » et « Enceintes acoustiques ».

1 Activité expérimentale : le traitement du son (1 h 10)

Un son peut être modifié par traitement électronique ou numérique. Quels traitements peut-on appliquer à un son ?

Document 1 – Quelques exemples de traitement d'un son

Amplification Augmentation ou atténuation du niveau d'intensité sonore de la totalité du son. Lors de l'amplification, il faut veiller à ne pas saturer le signal, car il serait déformé. Si l'enregistrement comporte des bruits parasites, ils seront aussi amplifiés.

Égalisation Amplification ou atténuation de certaines fréquences du son.

Changement du tempo Modification de la vitesse d'exécution du son, sans modification de hauteur.

Changement de la hauteur Modification de la hauteur du son sans modification de sa vitesse d'exécution.

Changement de la vitesse Modification de la hauteur et du tempo du son.

Écho Superposition du son d'origine avec le même son, décalé et atténué dans le temps.

Suppression du bruit Élimination du son correspondant au bruit de fond.

Document 2 – Les différents types de filtres analogiques courants dans les enceintes

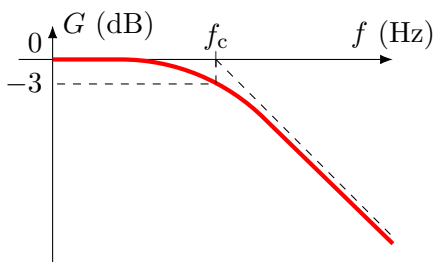
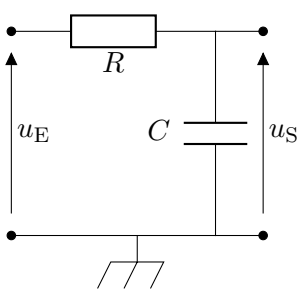
Une enceinte acoustique de qualité comporte en général plusieurs haut-parleurs, chacun travaillant dans un domaine de fréquence déterminé. Pour sélectionner le bon domaine de fréquence, il est nécessaire de filtrer les signaux reçus.

Voici quelques exemples de filtres habituellement utilisés dans les enceintes acoustiques. La tension d'entrée du filtre est notée u_E , c'est la tension délivrée par l'amplificateur. La tension de sortie du filtre est notée u_S , c'est la tension appliquée sur

le haut-parleur de l'enceinte. G est le gain du filtre, qui se calcule à partir du rapport des *valeurs efficaces* des tensions de sortie et d'entrée :

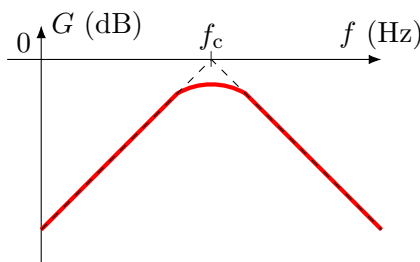
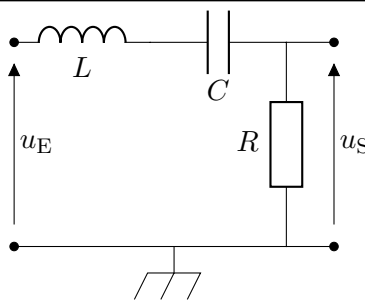
$$G = 20 \cdot \log \left(\frac{U_S}{U_E} \right)$$

Filtre passe-bas



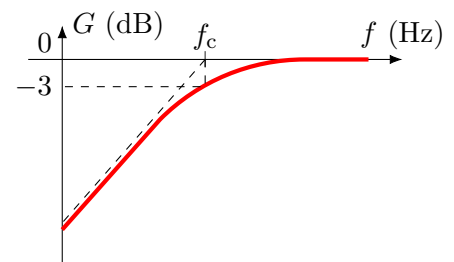
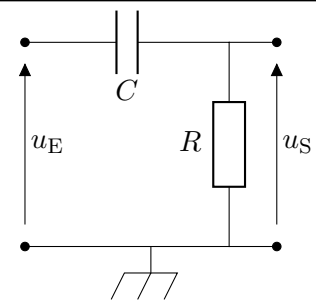
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Filtre passe-bande



$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

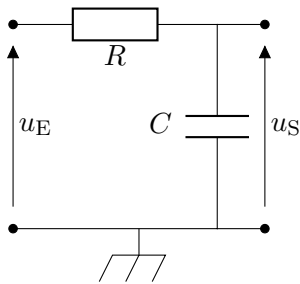
Filtre passe-haut



$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Document 3 – Traitement analogique d'un son

Le montage proposé ci-dessous est celui d'un « filtre passe-bas ». Il comporte plusieurs dipôles, dont un conducteur ohmique de résistance R (exprimée en ohm, de symbole Ω) et un condensateur de capacité C (exprimée en farad, de symbole F).



Le signal d'entrée u_E est la tension électrique correspondant à l'enregistrement d'un son musical.

Le signal de sortie u_S est la tension électrique obtenue après application du traitement électronique. Ce signal peut alimenter un haut-parleur.

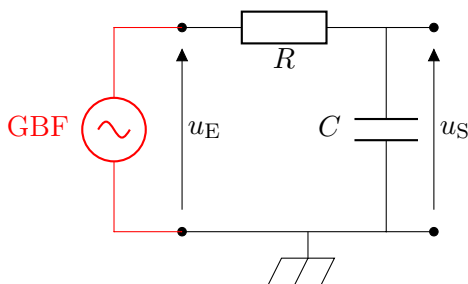
Ce montage possède une fréquence particulière, appelée fréquence de coupure f_c , et qui s'exprime par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

- a. Calculer la fréquence de coupure associée au filtre réalisé avec les composants à votre disposition.

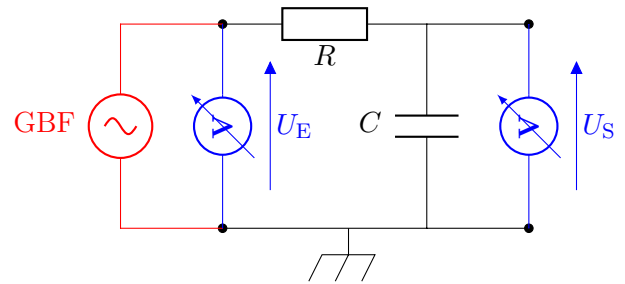
1.1 Expérience – Bande passante du filtre

- À l'aide d'un multimètre utilisé en ohmmètre (mesure la résistance d'un conducteur ohmique) et d'un capacimètre (mesure de la capacité d'un condensateur), vérifier les valeurs des composants à votre disposition & l'absence de faux-contact.
- Réaliser le filtre RC *passé-bas* proposé, en branchant en entrée un GBF (générateur basse fréquence) qui va délivrer une tension sinusoïdale à l'entrée du filtre, et en laissant la sortie u_S branchée à rien du tout (sortie *ouverte*).



Première vérification par le professeur avant mise sous tension et avant de passer à la suite du montage !

- Brancher un voltmètre à l'entrée du filtre pour mesurer la valeur efficace U_E de la tension d'entrée u_E et un second à la sortie du filtre pour mesurer la valeur efficace U_S de la tension de sortie u_S .



Vérification par le professeur avant mise sous tension !

- Faire varier la fréquence f du GBF et pour chaque valeur de la fréquence, mesurer U_E et U_S . Dresser un tableau des mesures.

f (Hz)	100	500	1 kHz	5 kHz	1 MHz	...
U_E (V)
U_S (V)
G (dB)

- Pour chaque couple de valeurs, calculer le gain G en décibels (dB) d'expression :

$$G = 20 \cdot \log \left(\frac{U_S}{U_E} \right)$$

- b. Sur du papier semi-log, tracer le diagramme représentant G en fonction de f .

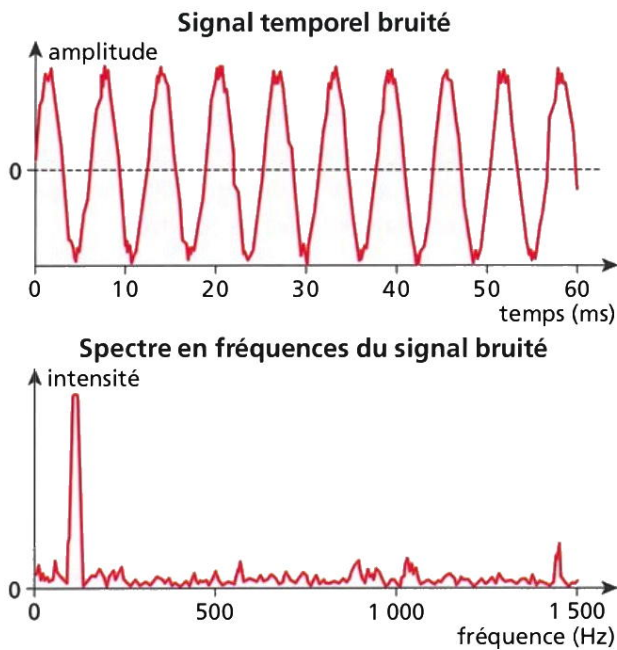
- c. La fréquence de coupure f_c est la fréquence à laquelle le rapport U_S/U_E est égal à $1/\sqrt{2}$, c'est-à-dire la fréquence pour laquelle le gain vaut $G = -3$ dB. Déterminer graphiquement cette fréquence et comparer avec le calcul théorique précédent (écart relatif).

1.2 Filtrage des bruits

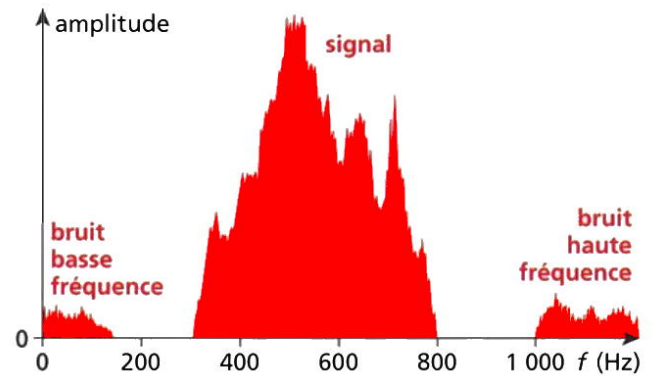
Un son perçu comporte souvent des « bruits » de fréquences variées pouvant provenir de diverses sources parasites. Ils rendent le message moins audible ; pour les éliminer, il faut utiliser des filtres.

- d. Expliquer *qualitativement* les noms donnés à chacun des filtres précédents : passe-bas ; passe-haut ; passe-bande.

- e. À l'aide des figures ci-dessous, caractériser un bruit en termes de fréquence et d'amplitude.



f. Sur la figure ci-dessous représentant le spectre d'un signal très bruité, indiquer quels filtres il faut utiliser pour éliminer les bruits.



2 Correction de l'exercice de la séance n° 6

6.1 Comment sont positionnées les frettes sur le manche d'une guitare ?

1. Le document 2 donne la formule reliant la fréquence f du fondamental émis par une corde, à sa longueur L , sa tension T et sa masse linéique μ :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

On constate sur cette formule que si on diminue la longueur L ou la masse linéique μ , ou si on augmente la tension T , la fréquence émise augmente.

2. Entre le Sol et le La de la même octave, le document 3 indique un écart de deux demi-tons (on passe de la huitième ligne à la dixième ligne du tableau du document 3). Autrement dit, il y a entre le Sol et le La un Sol dièse ou un La bémol, deux notes qui sont confondues dans la gamme tempérée.

Le document 3 indique aussi que pour passer d'une note à la suivante, de fréquence plus élevée, le guitariste bloque cette corde sur la case qui suit immédiatement, de façon à raccourcir la corde.

Par conséquent, pour passer du Sol au La, le guitariste devra déplacer son doigt de deux cases, ou tout au moins bloquer la deuxième case si il est en train de jouer la corde de Sol, à vide.

3. Le document 3 indique une fréquence de $f_{La_3} = 440$ Hz pour le La₃. Notons f_{Do_3} la fréquence du Do₃ et f_{Do_4} celle du Do₄. Une simple lecture du tableau proposé, en dixième ligne, permet de recopier :

$$f_{La_3} = (2)^{\frac{9}{12}} \times f_{Do_3} = 1,682 \times f_{Do_3}$$

On en déduit les formules littérales pour calculer les fréquences des deux notes demandées :

$$\begin{cases} f_{Do_3} = \frac{f_{La_3}}{(2)^{\frac{9}{12}}} \\ f_{Do_4} = 2 \times f_{Do_3} \end{cases}$$

Application numérique :

$$\begin{cases} f_{Do_3} = \frac{440}{1,682} = 262 \text{ Hz} \\ f_{Do_4} = 2 \times f_{Do_3} = 262 \times 2 = 523 \text{ Hz} \end{cases}$$

4. Notons f la fréquence émise par la corde à vide et f_n la fréquence émise par la corde bloquée sur la case n . Les fréquences émises par la corde lorsque l'on appuie sur la première case, la seconde, la troisième et la quatrième sont :

$$\begin{aligned} f_1 &= (2)^{\frac{1}{12}} \times f = 1,059 \times f \\ f_2 &= (2)^{\frac{2}{12}} \times f = 1,122 \times f \\ f_3 &= (2)^{\frac{3}{12}} \times f = 1,189 \times f \\ f_4 &= (2)^{\frac{4}{12}} \times f = 1,260 \times f \end{aligned}$$

On généralise facilement pour la case de rang n :

$$f_n = (2)^{\frac{n}{12}} \times f \quad (2)$$

L'expression (1) permet d'écrire :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Leftrightarrow L = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (3)$$

Notons L_n la longueur de la corde quand elle est bloquée par la n^{ième} frette, reliée à f_n par :

$$f_n = \frac{1}{2L_n} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Leftrightarrow L_n = \frac{1}{2f_n} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (4)$$

En remplaçant l'expression (2) de f_n dans (4) :

$$L_n = \frac{1}{(2)^{\frac{n}{12}} \times 2f} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5)$$

En remplaçant l'expression (3) de L dans (5) :

$$L_n = \frac{L}{(2)^{\frac{n}{12}}} \quad (6)$$

La corde a une longueur totale L , et une longueur partielle L_n quand elle est bloquée par la $n^{\text{ième}}$ frette. Par conséquent, la distance d_n de la $n^{\text{ième}}$ frette au sillet est :

$$d_n = L - L_n = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{n}{12}}}\right) L$$

On effectue l'application numérique pour les quatre premières frettes :

$$d_1 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{1}{12}}}\right) \times 65,2 = 3,6 \text{ cm}$$

$$d_2 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{2}{12}}}\right) \times 65,2 = 7,1 \text{ cm}$$

$$d_3 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{3}{12}}}\right) \times 65,2 = 10,4 \text{ cm}$$

$$d_4 = \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{4}{12}}}\right) \times 65,2 = 13,5 \text{ cm}$$

En guise de vérification, on peut remarquer que les frettes sont de plus en plus rapprochées, lorsque l'on se rapproche du centre de la guitare (notes de plus en plus aiguës). Cela est bien le cas, dès ces quatre premières distances.

Il est demandé une vérification à l'aide de la photographie. On mesure au double-décimètre la longueur totale de la corde (10,1 cm sur la photo) et la position des quatre premières frettes par rapport au sillet (respectivement, 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm et 2,0 cm), et on divise les quatre dernières par la première pour tenir compte de l'échelle de la photographie :

$$d_1 = \frac{0,5}{10,1} \times 65,2 = 3,3 \text{ cm}$$

$$d_2 = \frac{1,0}{10,1} \times 65,2 = 6,5 \text{ cm}$$

$$d_3 = \frac{1,5}{10,1} \times 65,2 = 9,7 \text{ cm}$$

$$d_4 = \frac{2,0}{10,1} \times 65,2 = 13 \text{ cm}$$

Les résultats concordent relativement bien malgré les fortes incertitudes sur les mesures, puisque 0,1 mm d'erreur sur la mesure au double décimètre nous fait une erreur de :

$$\frac{0,1}{10,1} \times 65,2 = 0,6 \text{ cm}$$

sur les évaluations des longueurs à partir de la photographie. On remarque que les valeurs calculées sont presque toutes dans l'intervalle d'erreur.

Grille de notation (exercice 6.1)

Je vous propose la grille de notation, en vue d'une auto-évaluation de votre travail. 1 point par case de la grille cochée.

- Si L ou μ diminuent, ou si T augmente, f augmente
- Si L ou μ diminuent, ou si T augmente, f augmente
- Le guitariste déplace son doigt de deux cases
- Principe de calcul des fréquences des notes
- $f(\text{Do}_3) = 262 \text{ Hz}$ et $f(\text{Do}_4) = 523 \text{ Hz}$
- Question 4 : quelques éléments très simples d'analyse, sans démarche construite.
- Question 4 : les informations sélectionnées sont incomplètes ou mal choisies. Il n'y a pas de démarche construite. Les éléments restitués ne sont pas organisés.
- Question 4 : les informations sélectionnées sont pertinentes au regard de la question, mais peu sont correctement exploitées. Quelques éléments de démarche sont présents. L'ensemble est correctement rédigé.
- Question 4 : la réponse intègre la plupart des informations utiles. La démarche suivie est pertinente, clairement exposée, même si elle n'aboutit pas. L'ensemble est correctement rédigé.
- Question 4 : les réponses sont argumentées et la démarche suivie est clairement exposée. L'ensemble est correctement rédigé.

Éléments de réponse de la question 4 :

$$d_i = L_0 - L_i = L_0 \left(1 - \frac{1}{2^{\frac{i}{12}}}\right)$$

$$d_1 = 3,6 \text{ cm} ; \quad d_2 = 7,1 \text{ cm} ; \\ d_3 = 10,4 \text{ cm} ; \quad d_4 = 13,5 \text{ cm}.$$

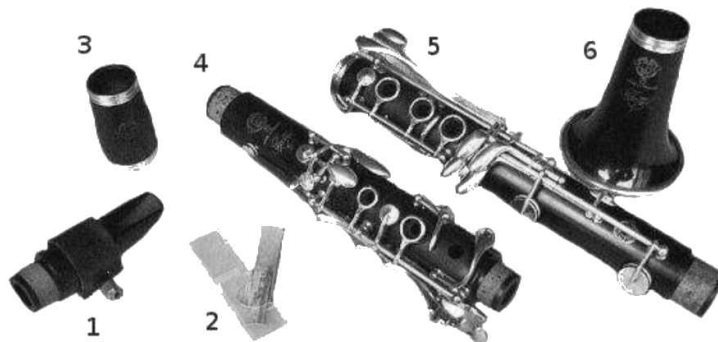
Total	.../10
Note	.../20

3 Exercice pour la séance n° 8 – Le clarinettiste voyageur

Document 1 – Description de la clarinette



1 : bec et ligature ; 2 : anche et son étui ; 3 : barillet ;
4 : corps du haut (main gauche) ; 5 : corps du bas (main droite) ; 6 : pavillon



La clarinette est un instrument de musique à vent de la famille des bois. On peut légèrement modifier sa longueur en emboîtant plus au moins profondément les différents éléments la constituant.

Document 2 – Fréquence d'accord

En France, les musiciens ont l'habitude de s'accorder sur la note « la » de fréquence 442 Hz. Aux Etats-Unis, l'accord se fait sur la note « la » de fréquence 440 Hz.

Document 3 – Acoustique musicale

Un son pur est une vibration sonore sinusoïdale tandis qu'un son complexe est une vibration sonore périodique non sinusoïdale. Les instruments de musique produisent des ondes sonores complexes décomposables en une somme de sons sinusoïdaux.

Un son complexe de fréquence f est la superposition d'un son sinusoïdal de même fréquence f (le fondamental) et de sons sinusoïdaux de fréquences multiples de f (les harmoniques).

Document 4 – Modélisation d'une clarinette

On peut modéliser une clarinette par une colonne d'air cylindrique, de longueur L , ouverte à une extrémité et fermée à l'autre. La vibration de l'anche engendre la vibration de l'air à l'intérieur de la clarinette selon les fréquences propres données par la relation :

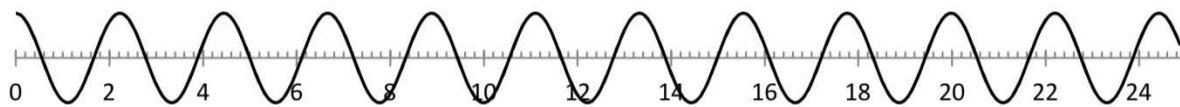
$$f = (2n - 1) \frac{v}{4L}$$

où L est la longueur en mètre de la colonne d'air, n un entier supérieur ou égal à 1, et v la célérité du son dans l'air : $v = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 20°C .

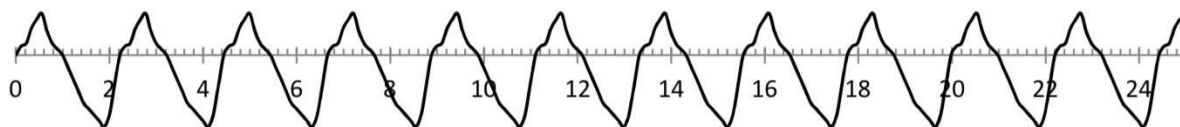
La fréquence fondamentale correspond à $n = 1$.

1. Florent est un clarinettiste qui souhaite savoir si son instrument est bien accordé. N'ayant pas d'accordeur à sa disposition, il décide de s'enregistrer et de traiter l'information avec un logiciel de traitement du son.
 - 1.1. Parmi les deux **enregistrements a** et **b** ci-dessous, lequel correspond à celui de la clarinette de Florent. Justifier votre réponse.

Enregistrement a



Enregistrement b



- 1.2. La clarinette de Florent est-elle bien accordée pour jouer dans un orchestre français ?
2. Quelle est la longueur L de la colonne d'air mise en mouvement dans la clarinette lorsqu'elle est accordée pour la France ?
3. Florent se produit en concert aux États-Unis. Expliquer pourquoi et comment il doit modifier la géométrie de sa clarinette.
4. En attendant de prendre l'avion pour retourner en France, Florent lit un article sur « la physique de la clarinette ». Une phrase l'interpelle : « *La clarinette ne fournit que des harmoniques impairs* ». Montrer que le modèle du tuyau sonore est en accord avec cette affirmation.
5. De retour en France, Florent emmène sa clarinette chez son luthier habituel pour effectuer un entretien. Dans la boutique, une nouvelle clarinette de fabrication française en matériau composite attire son attention. Le luthier lui explique les avantages de cette nouvelle technologie par rapport à une clarinette traditionnelle en ébène.
À l'aide des documents 5 à 9, faire une synthèse d'environ 15 lignes des différents arguments scientifiques (ou technologiques) et sociétaux que le luthier peut avancer.

Document 5 – Matériau composite

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, mais ayant une forte capacité d'adhésion. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés spécifiques que les éléments seuls ne possèdent pas. Cette technologie est le moyen d'améliorer sensiblement certaines caractéristiques (légèreté, rigidité à l'effort, etc) et par conséquent elle trouve de nombreuses applications dans différents secteurs industriels.

Document 6 – Clarinette en composite

Il existe des clarinettes réalisées en matériau composite d'ébène reconstitué, issu du bois recyclé de la production des clarinettes traditionnelles. Le matériau composite permet de conserver 100 % des propriétés acoustiques des instruments de musique traditionnels en ébène avec l'assurance d'une fiabilité et d'une longévité incontestable puisqu'il ne peut pas se fendre par choc climatique, véritable facteur d'angoisse chez les clarinettes.

Composition du matériau composite d'ébène reconstitué : 95 % de poudre d'ébène, 5 % de fibres de carbone et de résine époxy.

Document 7 – L'ébène

L'ébène (nom féminin) est le nom donné au bois de cœur issu de plusieurs espèces d'arbres de la famille des *Ebenaceae* appartenant au genre *Diospyros*, appelés ébéniers, ainsi que certains arbres du genre *Dalbergia*. Ils se rencontrent dans les régions tropicales et sont connus depuis la plus haute Antiquité pour la couleur noire de leur bois.

Les caractéristiques principales de l'ébène sont sa couleur noire et sa densité élevée. C'est un bois travaillé en ébénisterie, sculpture, lutherie, marqueterie, coutellerie, et dans des jeux (échecs, dames...) sous forme de bois massif, en feuillets ou en placage scié.

L'ébène est également utilisée pour la conception d'instruments de musique tels la flûte à bec, la clarinette, le hautbois, la touche des instruments à cordes et certaines baguettes de tambour.

Document 8 – Exploitation de l'ébène

Dans un lot de bois d'ébène, 50 % sont utilisés pour fabriquer les clarinettes professionnelles en ébène, 25 % pourront être utilisés pour fabriquer les clarinettes d'étude. Il y a approximativement 25 % de déchets.

L'exploitation de l'ébène africaine (Mozambique, Tanzanie...) devient de plus en plus problématique à cause de sa grande consommation. Aussi est-elle recherchée, vue sa rareté, dans des régions de plus en plus éloignées des centres, parfois difficilement accessibles et dont le terrain est quelquefois marécageux.

Notons qu'il est difficile de pourvoir au reboisement des forêts d'ébéniers (il ne s'agit pas de plantations) car l'arbre utilisé pour la fabrication des clarinettes doit avoir plus de cent ans d'âge. En 2005, 96 % du bois exporté en provenance de la région du sud-est de la Tanzanie était abattu illégalement.

Document 9 – Dureté comparée

La dureté Brinell est mesurée par la profondeur de l'empreinte laissée par une bille de 23 mm de diamètre, d'une masse de 1 kg, lâchée d'une hauteur de 50 cm. Ce test permet de mesurer la dureté du bois et sa résistance au poinçonnement. Plus l'indice est élevé, plus la dureté du bois est importante.

La dureté Brinell de l'ébène est 22,6 et celle du matériau composite d'ébène est 35,6.