La phase sonore dans l'audiovisuel

Introduction théorique

Dimitri Kharitonnoff & Aloyse Launay

Avant-propos

Ce document est le compte-rendu d'un atelier proposé par l'Association Française du Son à l'Image (AFSI) ayant eu lieu le 19 juin 2021 sur Zoom.

Le but de cet atelier était de sensibiliser un public de professionnel·le·s du son dans l'audiovisuel à la question de la phase et de son intégration dans le flux de travail. Cette partie théorique permet de définir et expliquer les différents termes et concepts à l'oeuvre quand on parle de phase en audio.

Nous tenons à remercier Laure-Anne Darras, Amaury de Nexon et David Rit ainsi que l'ensemble de l'équipe bénévole de l'AFSI pour leur aide précieuse dans le cadre de l'élaboration de cet atelier. Nous tenons également à remercier Aymeric Dupas qui nous a fourni les graphiques sur le filtrage en peigne que vous trouverez dans la partie sur le déphasage temporel.

Tout au long de ce document, vous trouverez des liens pour accéder à des animations sur Geogebra que nous avons réalisées dans le cadre de cet atelier. Elles ont pour but d'illustrer nos explications ainsi que de permettre de manipuler en temps réel les grandeurs évoquées.

La diffusion ou quelconque utilisation de ce document, des images qu'il contient et des animations sur Geogebra sont totalement libres.

Table des matières

La phase **1**
Equation d'une sinusoïde 1
Définition 1
La question de l'espace dans l'audiovisuel 2
La phase comme un angle 3

Le déphasage **4**
Opposition de phase 4
Déphasage temporel 5
Rotation de phase 8

Conclusion **10**

La phase

Equation d'une sinusoïde

Dans le cadre de notre démonstration, nous commencerons par décrypter les différents paramètres d'un son pur, soit un son composé d'une seule fréquence. Un tel signal, que l'on peut aussi appeler signal sinusoïdal, peut être représenté selon l'amplitude et le temps comme vous pouvez le voir sur la figure 1.

En termes mathématiques, on peut représenter un tel son, que l'on nommera *s(t)*, par la formule suivante dans laquelle on retrouve les trois grandeurs décrites précédemment ainsi que le temps noté t :

$$s(t) = A \times \sin(2\pi f t + \varphi)$$ [1]

Cette équation, ainsi que sa version simplifiée que nous allons voir, feront office de fil rouge tout au long de notre présentation.

Sur Geogebra [2], en manipulant les différentes variables à votre disposition, vous pouvez observer l'influence de la variation de l'amplitude A, de la fréquence f et de la phase à l'origine [3] φ sur l'apparence de la courbe. Dans le cas de la figure 1, on peut noter que A vaut 1, f vaut 1000Hz et φ vaut 0°.

Définition

En simplifiant notre équation précédente et en remplacant $(2\pi f t + \varphi)$ par α, on obtient l'équation simplifiée suivante :

$$s(t) = A \times \sin(\alpha)$$

C'est sous cette forme que l'on fait apparaître ce que l'on appelle la phase d'un signal sous sa forme mathématique : le terme α représente la phase de notre signal *s(t)*. En physique, la phase d'une onde est définie comme l'indication de la situation instantanée dans le cycle d'une grandeur qui varie cycliquement [4]. Cette valeur n'a de sens que si elle est donnée pour un instant et un point de l'espace précis. Autrement dit, la phase d'une onde varie en fonction de l'endroit et du moment où je me trouve.

1. Le terme « sin » évoque la fonction sinus dont nous expliquerons la fonction plus tard dans notre exposé.
2. https ://www.geogebra.org/m/ft7vsakk
3. La phase à l'origine indique la valeur en ordonnée de ma courbe lorsque $t = 0$, soit à l'origine de mon repaire. Par exemple, dans le cas de la figure 1, la valeur à l'origine vaut 0.
4. Cette définition est tirée de l'article Wikipédia portant sur la phase d'une onde : https ://fr.wikipedia.org/wiki/Phase_(onde)

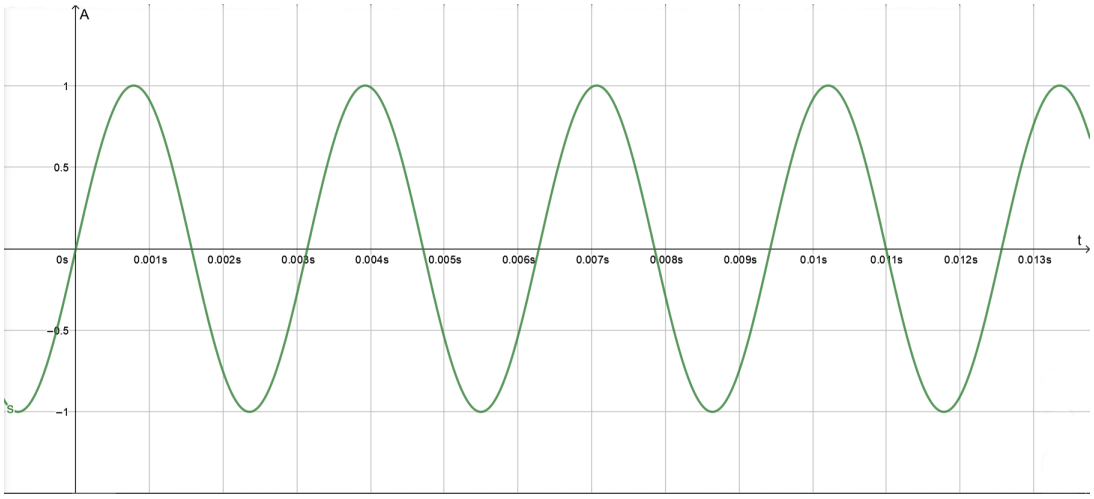


FIGURE 1 – Représentation de la variation de l'amplitude d'un signal pur de 1000Hz en fonction du temps

La question de l'espace dans l'audiovisuel

Prenons une source A qui émet une onde. Celle-ci se propage de manière concentrique depuis la source comme vous pouvez le voir représenté sur la figure 2. La situation est ici analogue au déplacement d'une onde à la surface de l'eau lorsque l'on jette un objet dans un lac. Chaque cercle représente ici un maximum d'amplitude. On peut aussi considérer cette représentation comme une vue de dessus de la figure 1 dont seuls les maximums sont représentés.

On observe sur la figure 2, qu'à cet instant donné, le point B se trouve sur un maximum d'amplitude tandis que le point C se trouve entre deux maximums, c'est à dire sur un minimum. Cela nous indique bien que la position dans l'espace détermine la phase de mon signal. En effet, la situation représentée ici est parfaitement analogue à ce qui se passe lorsque deux micros – une perche au point C et un micro-cravate au point B par exemple – enregistrent une même source sonore – ici située au point A : nous aurons une différence de phase dûe à leurs emplacements.

Sur Geogebra [5], vous pouvez observer la variation de la phase d'une onde en fonction de l'espace et du temps. En appuyant sur le bouton Play en bas à gauche, vous pouvez figer ou faire défiler le temps et ainsi observer la variation de la phase au point B ou C en fonction du temps et de l'espace.

Si l'on revient à la forme complexe de notre équation, on observe que le temps est bien présent grâce à la lettre t mais non l'espace :

$$s(t) = A \times \sin(2\pi f t + \varphi)$$

En effet, dans le cadre de notre atelier, nous négligerons la partie spatiale car, une fois que le son est enregistré, cette partie est totalement éludée : on ne représente le son qu'en fonction du temps et non plus de l'espace. Les différences d'espace entre ma perche et mon micro-cravate se transforment en différence de temps.

5. https ://www.geogebra.org/m/e8jcxjpy

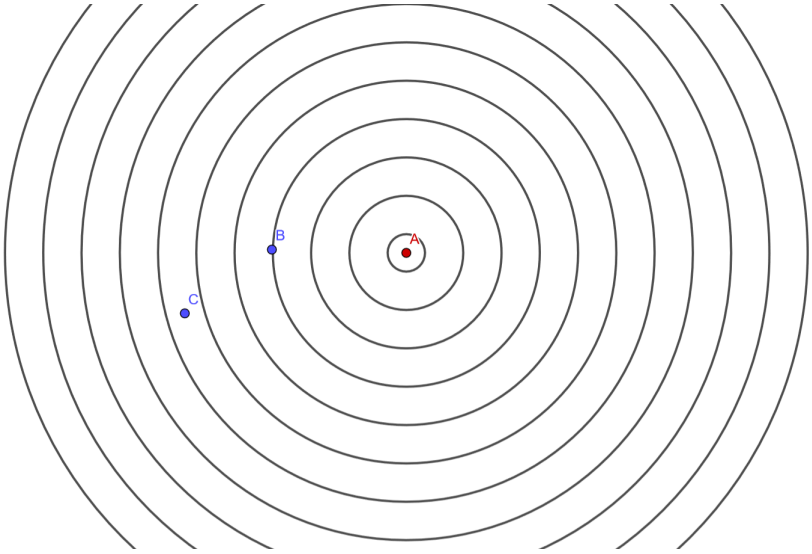


FIGURE 2 – Représentation de la propagation d'une onde puis une source A

La phase comme un angle

Si vous avez déjà été confronté au concept de phase, vous avez sûrement entendu parler de degrés ou de radian. En effet, la phase peut être représentée comme un un angle. Vous pouvez le constater sur cette animation Geogebra [6]. Dans cette représentation, il y a un cercle trigonométrique [7] à gauche et une représentation de la valeur de $\sin(\alpha)$ en fonction de la valeur de α à droite. Dans notre cercle trigonométrique, on observe que α, en vert, est l'angle entre deux des segments de mon triangle. La particularité du cercle trigonométrique est que le côté du triangle opposé à mon angle correspond exactement au sinus de mon angle. Or, si l'on trace la valeur du sinus en fonction de la valeur de l'angle, on observe que l'on dessine une sinusoïde, ce qui est la représentation d'un son pur : c'est pour cette raison que l'on définit la phase comme un angle et qu'elle a pour unité le degré ou le radian.

La phase d'un signal n'a pas d'impact en elle-même sur le son produit. On peut modifier la phase d'un signal d'une quelconque manière sans pour autant que cela soit audible. Par contre, la différence de phases entre deux signaux sommés a une incidence sur le son résultant.

6. https ://www.geogebra.org/m/u2z9xs7c
7. En mathématiques, le cercle trigonométrique est un cercle qui permet d'illustrer et de définir des notions comme celles d'angle, de radian et les fonctions trigonométriques : cosinus, sinus, tangente. Il s'agit du cercle dont le rayon est égal à 1 et qui est centré sur l'origine du repère, dans le plan usuel muni d'un repère orthonormé.

Le déphasage

Le déphasage est une différence de phases entre deux signaux cohérents, soit deux signaux qui sont semblables en tout point [8] exceptés dans la valeur de leur phase respective à un instant et un endroit donnés. Ce déphasage a un impact sur le résultat sonore lorsque l'on somme ces deux signaux.

Tout comme la phase, le déphasage peut lui aussi s'exprimer comme un angle comme on peut l'observer sur la figure 3. En effet, le déphasage n'étant qu'une différence entre deux phases, donc deux angles, il peut lui-même être considéré comme un angle.

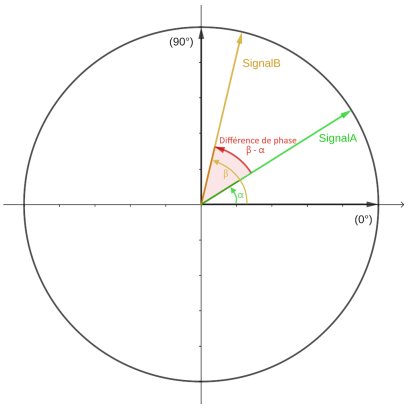


FIGURE 3 – Représentation de la différence de phase entre deux signaux cohérents sur un diagramme de Fresnel

Opposition de phase

Causes

L'opposition de phase [9] peut être causée par l'inversion du point chaud et du point froid d'un XLR ou par l'utilisation du bouton ϕ d'un enregistreur ou d'une console. C'est un phénomène qui peut aussi

8. Une perche et un micro-cravate sont deux microphones différents et n'utilisent pas la même technologie de transmission. Ils ne sont donc pas exactement similaires. Cependant, ils peuvent créer des artefacts sonores liés à la différence de phase. La question de la similitude de deux signaux cohérents est donc à relativiser et il vaut mieux considérer l'unicité de la source plutôt que la réelle similitude des signaux.

9. Dans le domaine de l'électronique, on aura plutôt tendance à parler d'inversion de polarité plutôt que d'opposition de phase mais dans le cadre de cet atelier, cette différence est négligeable.

avoir lieu dans le domaine acoustique, lorsque l'on enregistre une caisse-claire en bi-microphonie par exemple.

Définition et représentation

L'opposition de phase peut être décrite comme la transformation de mon signal en son symétrique par rapport à l'axe des abscisses, comme vous pouvez le constater sur la figure 4 ou sur Geogebra [10]. On peut aussi considérer qu'il s'agit d'une inversion des parties positives et négatives du signal. Le résultat de la sommation de deux signaux cohérents en opposition de phase est stricement nul. Autrement dit, mon signal est totalement détruit.

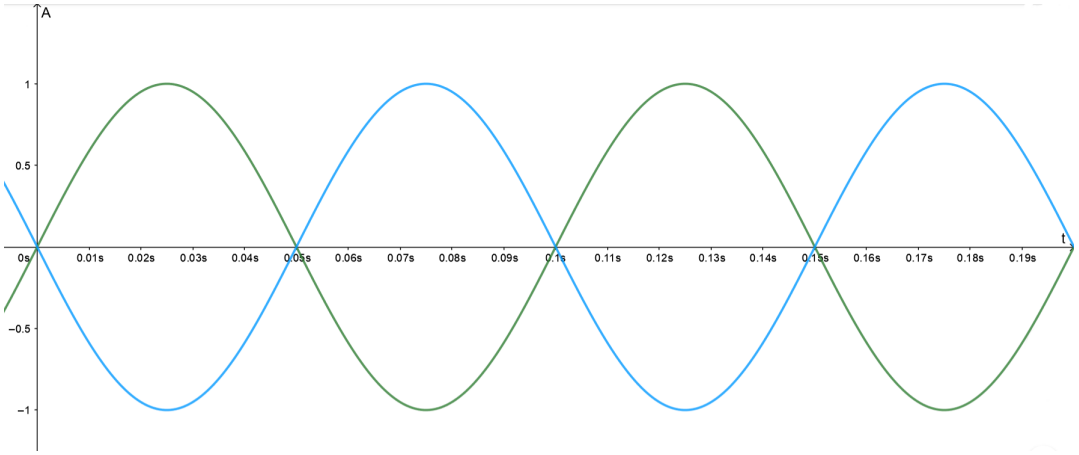


FIGURE 4 – Représentation de deux signaux en opposition de phase

Equation

En reprenant la version simplifiée de notre équation, on peut représenter l'opposition de phase comme la multiplication de mon signal d'origine par (-1) :

$$s(t) = A \times \sin(\alpha) \times (-1)$$

Déphasage temporel

Causes

Le déphasage temporel est notamment présent lors de la sommation d'une perche et d'un HF ou d'un son direct et d'un son réverbéré.

10. https ://www.geogebra.org/m/jcazxzxg

Définition et représentation

Le déphasage temporel survient lors de la sommation de deux signaux cohérents dont l'un est retardé par rapport à l'autre. C'est ce phénomène qui est le plus couramment perçu à l'oreille et associé à l'idée de déphasage. En terme de représentation, cela équivaut à déplacer mon signal le long de l'axe des abscisses. Sur Geogebra [11], on peut observer qu'en faisant varier le délai, je fais translater mon signal retardé le long de l'axe des abcisses. La transformation est la même pour mon signal pur, mon signal complexe [12] et mes deux signaux amortis [13]. La somme de mes deux signaux sera plus ou moins constructive ou destructive en fonction de la valeur de mon délai. Dans le cas du signal pur non amorti, on retrouve les deux cas les plus extrêmes : une sommation purement constructive pour un délai d'une période ou une sommation purement destructive pour une demi-période.

Cas particulier du filtrage en peigne

Dans le cas où notre signal complexe présente la particularité que certaines fréquences qui le composent sont le multiple d'une fréquence fondamentale, on voit apparaître un phénomène que l'on appelle le filtrage en peigne. Prenons un signal complexe uniquement composé d'une fréquence fondamentale f_0 et de multiples de cette fréquence que l'on nommera ainsi : f_1 est le premier multiple de f_0, f_2 le deuxième multiple, f_3 le troisième et ainsi de suite. Les multiples de la fondamentale sont appelés les harmoniques [14]. En prenant un deuxième signal similaire et en le retardant d'un délai équivalent à la moitié de la période de f_0, on observe le phénomène décrit sur la figure 5 : pour la fréquence f_0, la sommation est totalement nulle ; pour la fréquence f_1, la sommation est totalement constructive [15] ; pour la fréquence f_2 la sommation est totalement nulle et pour la fréquence f_3, la sommation est totalement constructive. De cet exemple, on peut tirer la loi suivante : dans le cadre d'un filtrage en peigne, la fréquence fondamentale et toutes ses harmoniques paires subiront des interférences destructives tandis que ses harmoniques impaires subiront des interférences constructives. Cette règle est illustrée sur la figure 6 pour un signal dont la fréquence fondamentale serait de 100Hz. On peut aisément observer la forme du filtrage dont ce phénomène tire son nom.

Equation

En reprenant la version développée de notre équation, on peut représenter le déphasage temporel en soustrayant la valeur δ [16] de mon délai à t :

$$s(t) = A \times \sin(2\pi f(t - \delta) + \varphi)$$

11. https ://www.geogebra.org/m/rmszbewv
12. Un signal complexe est un signal qu'on peut décomposer en une somme de signaux purs. Autrement dit, c'est plusieurs sinusoïdes de différentes fréquences qui forment un seul et même signal. Ici, le signal complexe qui est présenté est composé de deux fréquences : 20Hz et 53Hz. En terme d'équation, il me suffit simplement d'ajouter ensemble plusieurs versions de l'équation qui nous sert de fil rouge. Les variables d'amplitude et de phase à l'origine peuvent être indépendantes ou non entre les différentes fréquences.
13. Un signal amorti est un signal dont l'amplitude décroit au cours du temps. Sur Geogebra, nous avons simplement repris nos deux signaux purs et complexes et leur avons appliqué un amortissement.
14. On parlera d'ailleurs pour ce type de son de son harmonique.
15. En effet, une demi-période de f_0 correspond à une période entière pour f_1.
16. Il est important de noter que cette valeur peut être une constante ou non.

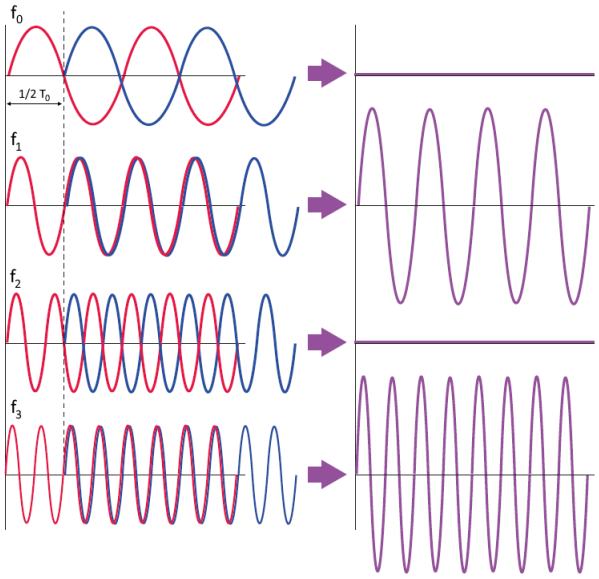


FIGURE 5 – Représentation de la résultante d'un filtrage en peigne décomposé selon les différentes fréquences du signal

Lien entre différence de distance à la source et valeur de fréquence fondamentale

L'équation suivante nous donne la relation entre la différence de distance à la source [17] et la fréquence fondamentale pour laquelle la sommation sera purement destructive :

$$d = \frac{340}{2 \times f} \Leftrightarrow f = \frac{340}{2 \times d}$$

Par exemple, pour une différence de distance à la source d'une valeur de 70cm, la sommation sera destructive pour 240Hz et tous ses multiples impairs et constructives pour tous ses multiples pairs.

En bornant la voix humaine entre 80Hz et 10kHz, on peut aisément calculer que ces deux fréquences correspondent respectivement à des distances de 2,10m et 17mm. Considérant que ces deux valeures comprennent la grande majorité des différences de distance entre la perche, le micro-cravate et la source, nous ne pouvons qu'en déduire que la prise de son audiovisuel conduit systématiquement à du filtrage en peigne sur la voix humaine.

17. Il est important de préciser ici qu'il faut bien considérer la différence de distance entre chaque microphone et la source et non uniquement la différence de distance entre les deux microphones. Autrement dit, il faut soustraire la distance entre mon micro 1 et ma source à la distance entre mon micro 2 et ma source.

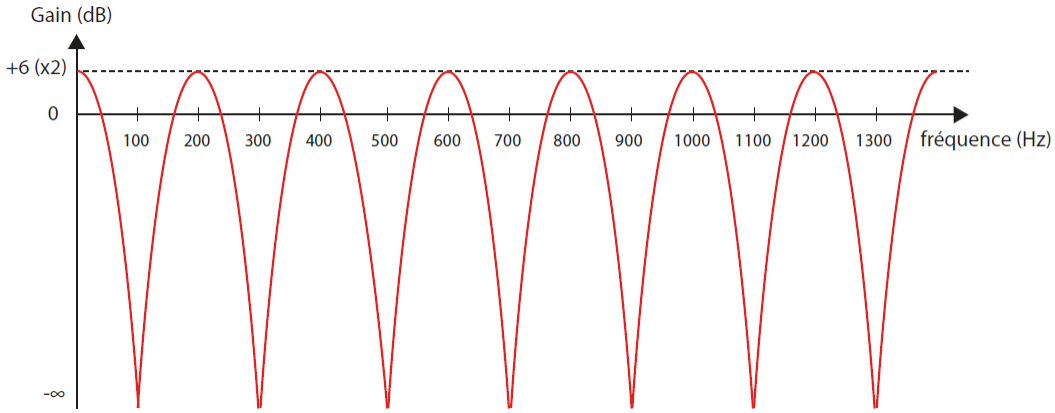


FIGURE 6 – Représentation de la sommation induite par un filtrage en peigne en fonction de la fréquence

Rotation de phase

Causes

La rotation de phase est un phénomène qui se produit lors de l'utilisation de filtres qui peuvent être tout autant numérique qu'analogique. Par ailleurs, contrairement à une idée répandue, les filtres numériques à phase linéaire produisent eux aussi une rotation de phase : la différence est que cette rotation est la même pour toutes les fréquences.

Définition et représentation

La rotation de phase consiste à modifier la phase de mon signal autrement que par la variation temporelle ou spatiale. Autrement dit, on peut considérer que cela revient à modifier la phase à l'origine. Sur Geogebra [18], on observe aisément les modifications que cela implique pour nos différents signaux et leur sommation. Il est intéressant de remarquer que, pour un signal pur non-amorti, la rotation de phase et le déphasage temporel sont des phénomènes totalement similaires. En revanche, on constate que lorsque l'on s'intéresse à des signaux complexes et/ou amortis, la distinction entre les deux phénomènes est bien présente. Cette précision est nécessaire car, comme la plupart des phénomènes sonores, la rotation de phase et le déphasage temporel sont souvent expliqués à partir d'un signal pur non amorti. Or, il s'avère que c'est le seul cas particulier où les deux phénomènes sont similaires. De là, il n'est pas rare de voir la confusion s'opérer entre ces deux phénomènes qui ont pourtant des causes et des conséquences différentes.

Il est aussi nécessaire de préciser que, dans le cas d'un signal complexe, la rotation de phase induite peut être différente pour chacune des fréquences. C'est d'ailleurs ce qu'il se passe lors de l'utilisation d'un filtre. Sur la figure 7, on peut voir un graphique qui nous montre la rotation de phase induite par le filtre en fonction de la fréquence.

Il est aussi pertinent de noter qu'à ce stade, on peut se rendre compte que l'opposition de phase n'est rien d'autre qu'un cas particulier de la rotation de phase qui serait de 180° pour toutes les fréquences

18. https ://www.geogebra.org/m/rmszbewv

du signal.

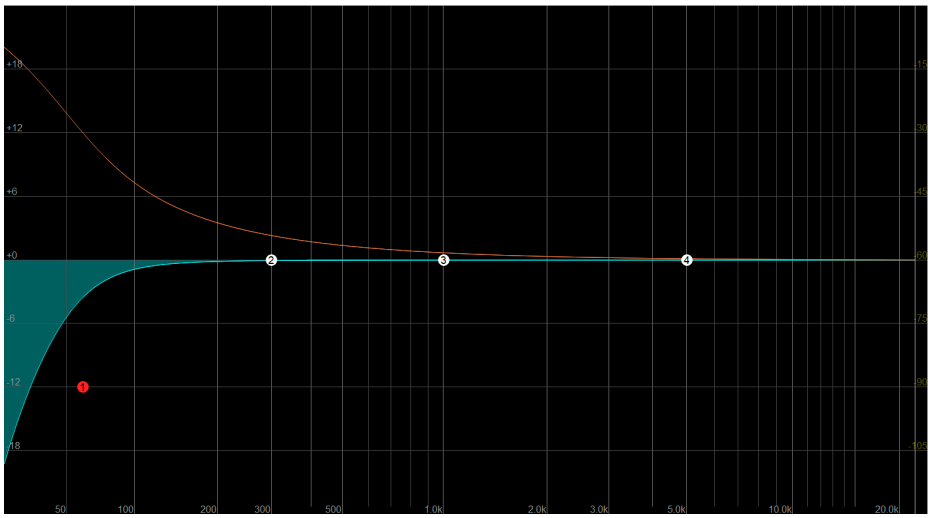


FIGURE 7 – Représentation de la variation de l'amplitude et de la phase en fonction de la fréquence d'un signal filtré par un coupe-bas à 60Hz et -12dB/octave

Equation

En reprenant notre équation simplifiée, on peut représenter la rotation de phase comme l'ajout d'une valeur μ [19] à notre phase α :

$$s(t) = A \times \sin(\alpha + \mu)$$

19. Tout comme le délai dans le cas du déphasage temporel, il est important de noter que cette valeur peut être ou non une constante.

Conclusion

Bien que certains débats animent parfois les professionnel·le·s du son sur la question de la phase et de son impact, il est important de comprendre que ce phénomène a toujours été présent et fait partie intégrante de notre manière de faire du son, que l'on en soit conscient ou non. Il appartient ensuite à chacun, en toute connaissance de cause, d'intégrer ou non cette question particulière dans sa manière de travailler.

Au-delà de l'aspect parfois handicapant que peut représenter la phase dans son influence sur le son, on peut considérer que, comme tant d'autres phénomènes sonores tels que la réverbération ou les artefacts numériques, c'est aussi un outil créatif qui peut être utilisé pour découvrir de nouvelles manières de créer et modifier les sons sur lesquels nous travaillons.

Table des figures

1 Représentation de la variation de l'amplitude d'un signal pur de 1000Hz en fonction du temps 2
2 Représentation de la propagation d'une onde puis une source A 3
3 Représentation de la différence de phase entre deux signaux cohérents sur un diagramme de Fresnel 4
4 Représentation de deux signaux en opposition de phase 5
5 Représentation de la résultante d'un filtrage en peigne décomposé selon les différentes fréquences du signal 7
6 Représentation de la sommation induite par un filtrage en peigne en fonction de la fréquence 8
7 Représentation de la variation de l'amplitude et de la phase en fonction de la fréquence d'un signal filtré par un coupe-bas à 60Hz et -12dB/octave 9

Table des liens

Equation d'une sinusoïde ..... https ://www.geogebra.org/m/ft7vsakk
Représentation spatio-temporelle de la phase ..... https ://www.geogebra.org/m/e8jcxjpy
La phase comme un angle ..... https ://www.geogebra.org/m/u2z9xs7c
L'opposition de phase ..... https ://www.geogebra.org/m/jcazxzxg
Déphasage temporel et rotation de phase ..... https ://www.geogebra.org/m/rmszbewv