

Analyse des modulations

L'analyse des modulations produit les spectres des enveloppes de sous-bandes du signal analysé. L'utilisateur peut ainsi identifier des modulations en amplitude par leur fréquence, leur force et la forme de leur courbe temporelle. Alors que seules certaines fréquences de modulation sont analysées et évaluées pour les paramètres psychoacoustiques rugosité et force de fluctuation (par ex. les fréquences de modulation de 5 Hz pour la force de fluctuation « Fluctuation strength »), l'analyse des modulations s'étend sur un vaste domaine fréquentiel qui inclut le domaine de la rugosité et de la force de fluctuation.

Modulation en amplitude

Une tonalité continue dont l'amplitude fluctue de manière sinusoïdale autour d'une valeur moyenne de $\hat{p}_{\text{porteuse}}$ est un signal sinusoïdal modulé en amplitude. La pression sonore $p_a(t)$ d'un tel son pur se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$p_a(t) = \hat{p}_{\text{porteuse}} \cdot (1 + m \cdot \sin(2\pi f_{\text{mod}} \cdot t)) \cdot \sin(2\pi f_{\text{porteuse}} \cdot t)$$

f_{mod} : fréquence de modulation
 f_{porteuse} : fréquence porteuse
 m : degré de modulation.

La première fonction sinusoïdale de la formule doit être remplacée pour obtenir une modulation en amplitude non-sinusoïdale. La forme du signal porteur peut être modifiée en remplaçant le deuxième sinus.

Le degré de modulation m détermine la force de la modulation et est calculé à partir du rapport de la composante changeante et de l'offset du signal.

La figure 1 montre une représentation schématique d'un son pur modulé en amplitude.

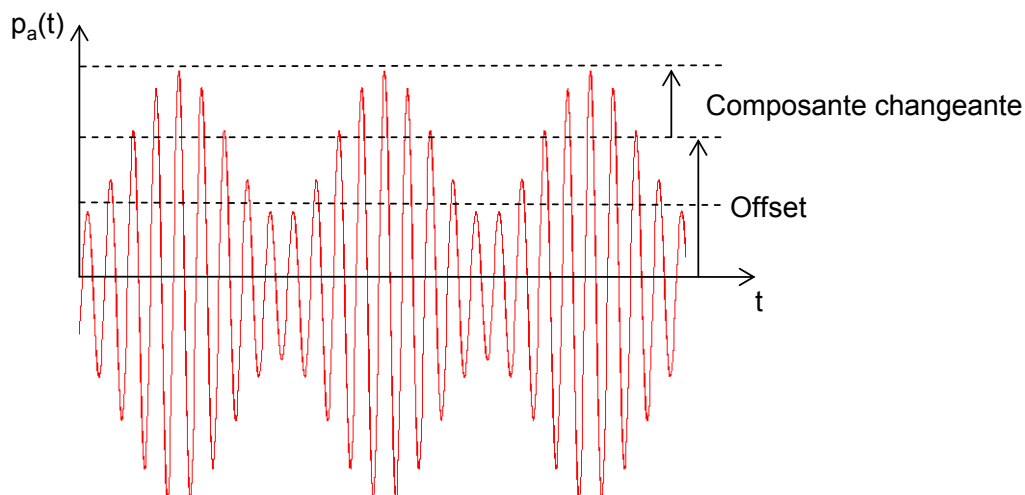


Figure 1: Représentation schématique d'un son pur modulé en amplitude

Analyse des modulations dans ArtemiS

Dans ArtemiS, plusieurs analyses destinées à analyser la modulation de signaux sonores sont disponibles. Le tableau suivant présente ces analyses.

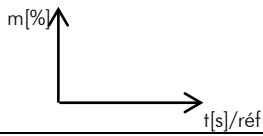


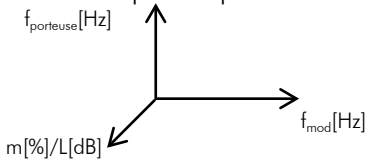
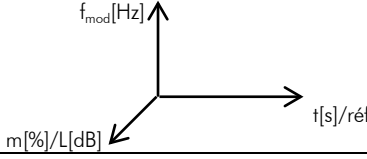
Nom de l'analyse (anglais)	Nom de l'analyse (français)	Description
Degree of Modulation vs. time / rpm	Degré de modulation vs. temps / réf.	Analyse du degré de modulation d'un domaine fréquentiel au choix par rapport au temps, à la vitesse de rotation ¹ 
Modulation Frequency vs. time / rpm	Fréquence de modulation vs. temps / réf.	Analyse de la fréquence de modulation d'un domaine fréquentiel au choix par rapport au temps ou à la vitesse de rotation ¹ 
Modulation Spectrum	Spectre de modulation	Analyse du degré de modulation d'un domaine fréquentiel au choix par rapport à la fréquence de modulation 
Modulation Spectrum vs. band	Spectre de modulation vs. bande	Analyse du degré de modulation par rapport à la fréquence de modulation et à la fréquence porteuse 
Modulation Spectrum vs. time / rpm	Spectre de modulation vs. temps / réf.	Analyse du degré de modulation d'un domaine fréquentiel au choix par rapport au temps ou à la vitesse de rotation ¹ et à la fréquence de modulation 

Tableau 1 : Description des différentes analyses des modulations dans ArtemiS

¹ ou tout autre voie lente de référence

Les paramètres de chaque analyse peuvent être sélectionnés sur la *page de propriétés*. Ces pages de configuration se ressemblent beaucoup pour les analyses décrites ci-dessus. La figure 2 montre la *page de propriétés* de l'analyse *Spectre de modulation vs. temps*. Dans la partie supérieure, l'utilisateur peut sélectionner le domaine fréquentiel devant être analysé. Ce domaine peut être déterminé à l'aide d'un des filtres d'octave, de tiers d'octave ou de bandes critiques standardisés. L'utilisateur peut également utiliser un filtre de fréquence ou d'ordre individuel.

Dans la partie inférieure de la page de propriétés, il est possible de sélectionner la configuration de la fréquence maximale des enveloppes et pour l'analyse par FFT de l'enveloppe. Dans l'analyse *Spectre de modulation vs. bande*, la modulation présente dans l'ensemble du domaine fréquentiel audible est analysée, c'est pourquoi la *page de propriétés* de l'analyse ne permet pas la sélection du domaine fréquentiel à analyser (voir figure 2).

Le fait de sélectionner la fonction *Degrés de modulation* permet d'afficher le résultat comme degrés de modulation en [%]. Si cette fonction est désactivée, le niveau de l'enveloppe est directement affiché. Dans l'analyse *Degré de modulation vs. temps*, cette possibilité n'est pas disponible sur la *page de propriétés* car l'analyse y détermine toujours le degré de modulation en [%]. Pour l'analyse *Fréquence de modulation vs. temps*, cette possibilité n'est pas non plus disponible car elle n'analyse pas le degré de modulation, mais la fréquence de modulation.

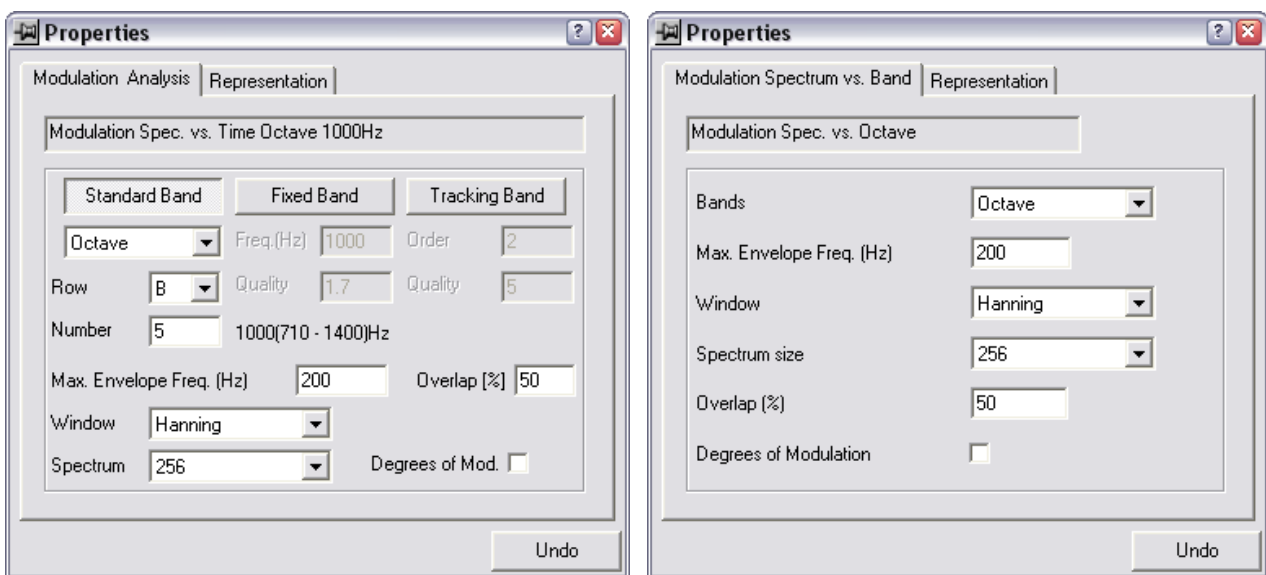


Figure 2: Page de propriétés des analyses Spectre de modulation vs. temps (à gauche) et Spectre de modulation vs. bande (à droite)

Exemples d'application

La figure 3 montre les différentes analyses des modulations d'un signal sonore généré par un moteur à combustion tournant à vide. Une analyse par FFT y est également représentée. On reconnaît dans la représentation de l'analyse par FFT (figure 3a) que la bande comprise entre 140 et 200 Hz est nettement modulée. C'est pour cette raison que la bande d'octave située autour de 180 Hz (125 à 250 Hz) a été sélectionnée pour les analyses des modulations pour lesquelles l'utilisateur doit sélectionner une certaine bande de fréquence. La division en bandes de tiers d'octave a été sélectionnée pour l'analyse *Spectre de modulation vs. bande*. La figure

3b représente le résultat de l'analyse de degrés de modulation. La bande d'octave située autour de 180 Hz est modulée avec un degré de modulation d'environ 70 %. Le degré de modulation est relativement constant sur toute la durée du signal. On reconnaît sur la figure 3c que le signal est principalement modulé avec une fréquence de modulation d'environ 16 Hz. C'est également ce que montre la figure 3d sur laquelle les fréquences de modulation et les degrés de modulation correspondants sont indiqués pour la bande d'octave située autour de 180 Hz. Cette figure montre également que le signal est aussi modulé avec d'autres fréquences. Cependant, le degré de modulation est beaucoup plus petit pour ces fréquences de modulation que celui de la fréquence de modulation de 16 Hz. Sur la figure 3e, un spectrogramme montre avec quelle fréquence de modulation chaque fréquence porteuse est modulée. La couleur indique le niveau de la modulation. La fréquence de modulation la plus importante est dans ce diagramme aussi d'environ 16 Hz. La modification temporelle de la fréquence de modulation et du degré de modulation est représentée sur la figure 3f. L'exemple de signal choisi étant modulé relativement constamment sur toute la longueur du signal, le diagramme ne représente qu'une fluctuation temporelle peu importante.

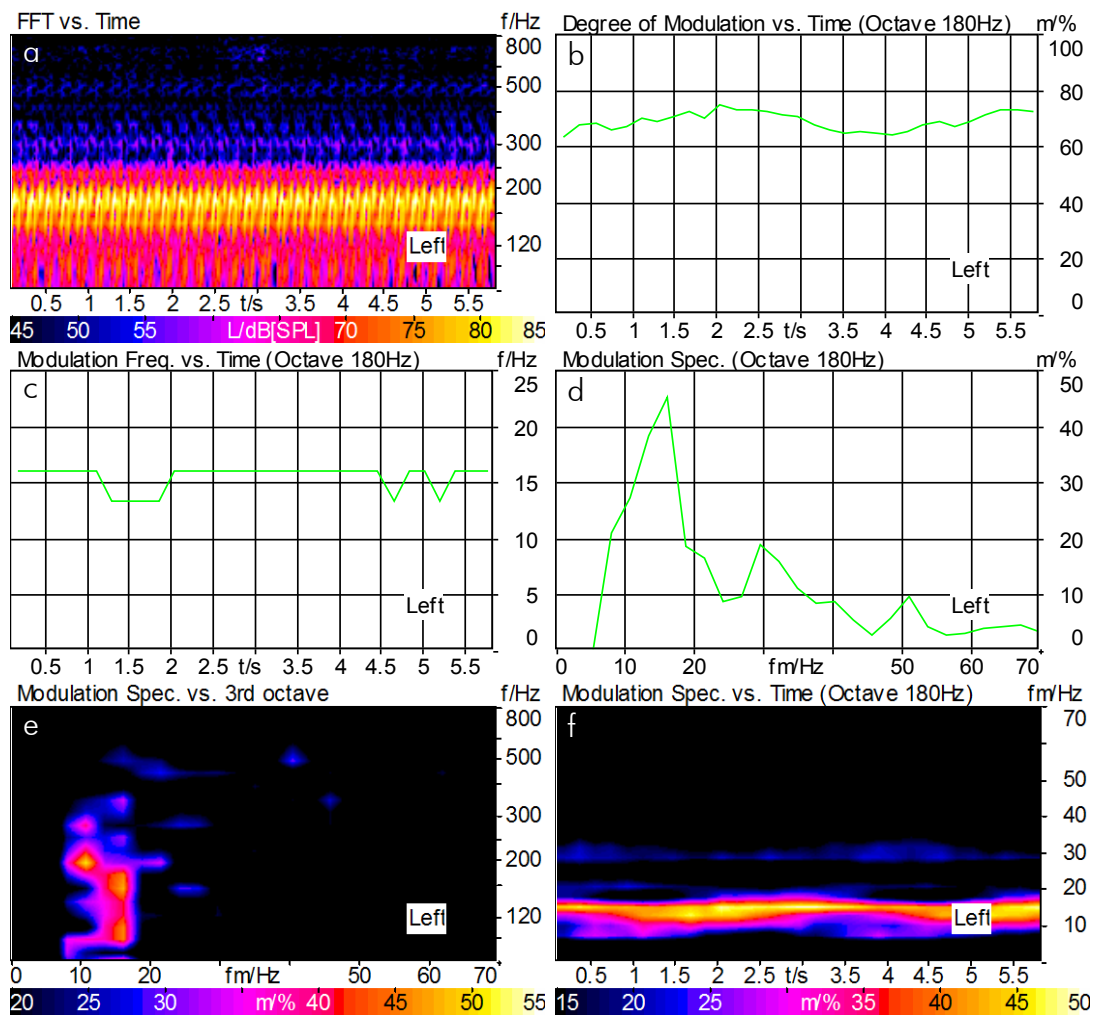


Figure 3: a) Analyse par FFT vs. temps, b) Degré de modulation vs. temps, c) Fréquence de modulation vs. temps, d) Spectre de modulation de la bande d'octave située autour de 180 Hz, e) Spectre de modulation vs. bandes de tiers d'octave, f) Spectre de modulation de la bande d'octave située autour de 180 Hz vs. temps

La figure 4 montre les résultats des analyses de modulation d'un bruit enregistré dans un habitacle de véhicule à env. 3 000 tours par minute. L'analyse par FFT vs. temps (fig. 4a) montre que le signal contient clairement différents ordres de moteur. Le niveau des différents ordres se modifie dans la période représentée, ce qui a pour effet que la fréquence de modulation ainsi que le degré de modulation varient dans le temps. La bande d'octave située autour de 250 Hz a été sélectionnée pour l'analyse. La modification temporelle de la modulation est nettement reconnaissable dans les diagrammes 4b, 4c et 4f. En raison des fréquences de modulation existantes et situées entre 15 et 35 Hz, ni l'analyse de rugosité ni une analyse de la force de fluctuation ne montreraient les modulations contenues dans ce signal².

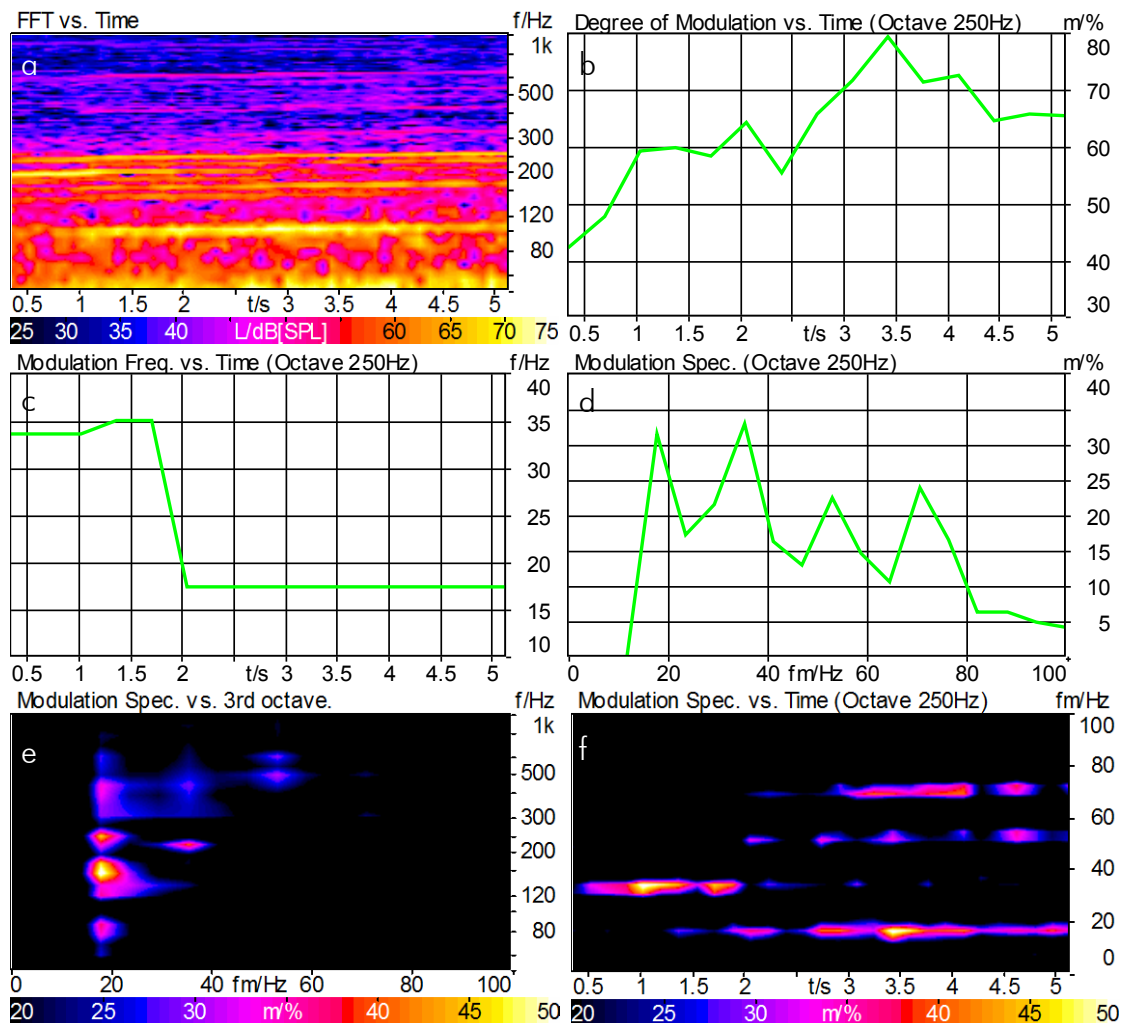


Figure 4: a) Analyse par FFT vs. temps, b) Degré de modulation vs. temps, c) Fréquence de modulation vs temps, d) Spectre de modulation de la bande d'octave située autour de 250 Hz, e) Spectre de modulation vs. bandes de tiers d'octave, f) Spectre de modulation de la bande d'octave située autour de 250 Hz vs. temps

² L'analyse *Hearing Model Roughness* contenue dans le Tool Pack 06 d'ArtemiS et qui détermine la rugosité en utilisant un modèle auditif permet également de détecter des rugosités avec une fréquence de modulation de 30 Hz.

Résumé

Si l'on constate par ex. à l'aide d'une analyse *FFT vs. temps* ou en écoutant un signal, que celui-ci est modulé, il est judicieux de commencer par calculer un spectre de modulation par rapport à la bande de fréquence (*Spectre de modulation vs. bande*). Cette analyse donne un aperçu des fréquences de modulation dans l'ensemble du domaine fréquentiel et le degré de modulation peut également être lu. L'analyse *Spectre de modulation* est utile si l'utilisateur sait déjà quel domaine fréquentiel pourrait contenir des modulations. Cette analyse montre le degré et la fréquence de modulation d'un certain domaine fréquentiel du signal d'entrée. Cette analyse permet par ex. de réaliser un contrôle de qualité lorsqu'un produit contient un point faible connu apparaissant dans un certain domaine fréquentiel en présence de modulations.

Lors d'une analyse de signaux changeant rapidement dans le temps, il est recommandé d'utiliser les analyses par rapport au temps ou à la vitesse de rotation (*Degrés de modulation vs. temps/réf.*, *Fréquence de modulation vs. temps/réf.*, *Spectre de modulation vs. temps/réf.*). Ces analyses permettent de faire apparaître des changements de modulation. L'analyse de modulation de l'enregistrement du bruit d'une accélération de moteur constitue un cas d'application possible. L'utilisation de filtres d'ordre au lieu d'un filtre dépendant de la fréquence est adaptée à l'analyse de signaux contenant des informations tachymétriques. Le type de filtre peut être sélectionné sur la page de propriétés des différentes analyses.

Les différentes analyses de modulation disponibles dans ArtemiS permettent à l'utilisateur de sélectionner l'analyse la mieux adaptée à son application.

Remarque

Pour la mise en œuvre de ce qui est présenté dans cette note applicative, vous devez disposer de la version de base d'ArtemiS (code 4600) et du module ArtemiS d'analyses avancées « ATP07 » (code 4607).

Des questions ou commentaires à l'auteur? Ecrivez nous un courriel (si possible en Anglais) à l'adresse suivante: imke.hauswirth@head-acoustics.de.

Annexe 1 : Modulation en fréquence

Si c'est la fréquence d'un signal, et non l'amplitude, qui est modulée, on parle de signaux modulés en fréquence. L'analyse *FFT vs. temps* d'un son pur modulé en fréquence est représentée sur la figure 5, à gauche. Un tel signal peut, lui aussi, être analysé à l'aide des analyses des modulations disponibles dans ArtemiS. L'interprétation des résultats d'analyse doit cependant être faite avec une grande précaution.

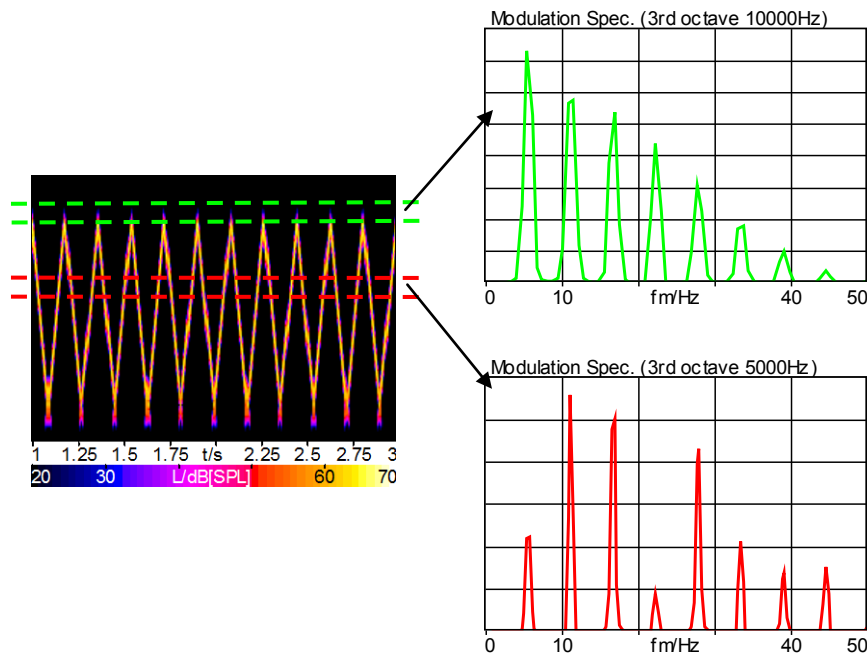


Figure 5: Analyse des modulations d'un son pur modulé en fréquence

Pour l'analyse des modulations, le signal est – comme nous l'avons déjà décrit ci-dessus – divisé en différentes bandes. Les résultats de l'analyse divergent selon le domaine fréquentiel analysé. Ceci est représenté schématiquement sur la figure 5 pour un signal modulé en fréquence. Si un signal modulé en fréquence est divisé en différentes bandes, on obtient des signaux modulés en amplitude pouvant être analysés dans ArtemiS à l'aide des analyses des modulations. La fréquence de modulation de la modulation en amplitude correspond à celle de la modulation en fréquence ou un multiple. Le spectre de modulation du domaine fréquentiel marqué en vert sur la figure 5 contient comme composant principal la fréquence de modulation de la modulation en fréquence d'env. 5,5 Hz. L'analyse du domaine marqué en rouge montre comme composant principal une fréquence de modulation d'env. 11 Hz, donc le double de la fréquence de modulation réelle de la modulation en fréquence. Pour pouvoir reconnaître la bande de fréquence adaptée à l'analyse des modulations, il est recommandé de toujours réaliser une analyse *FFT vs. temps* en plus d'une analyse des modulations pour un signal modulé en fréquence. Celle-ci fournit les informations nécessaires pour pouvoir interpréter les résultats de l'analyse des modulations.

Annexe 2 : Étapes de calcul lors d'une analyse des modulations

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'analyse des modulations est une analyse spectrale de l'enveloppe du signal temporel. La figure 6 représente schématiquement la méthode à suivre pour réaliser cette analyse. Les différentes étapes de calcul sont expliquées de manière brève en dessous.

La première étape consiste à filtrer le signal d'entrée avec un passe-bande RII afin d'en extraire le domaine fréquentiel sélectionné sur la page de propriétés. Il est possible de sélectionner un octave, un tiers d'octave ou une bande critique en particulier. Un filtre Butterworth de 4^{ème} ordre est utilisé pour le filtrage. Au cas où des composantes élevées de la fréquence auraient été éliminées au cours de ce filtrage, il est possible de réaliser un premier sous-échantillonnage car le

taux d'échantillonnage peut être diminué selon l'ordre de fréquence du domaine fréquentiel sélectionné.

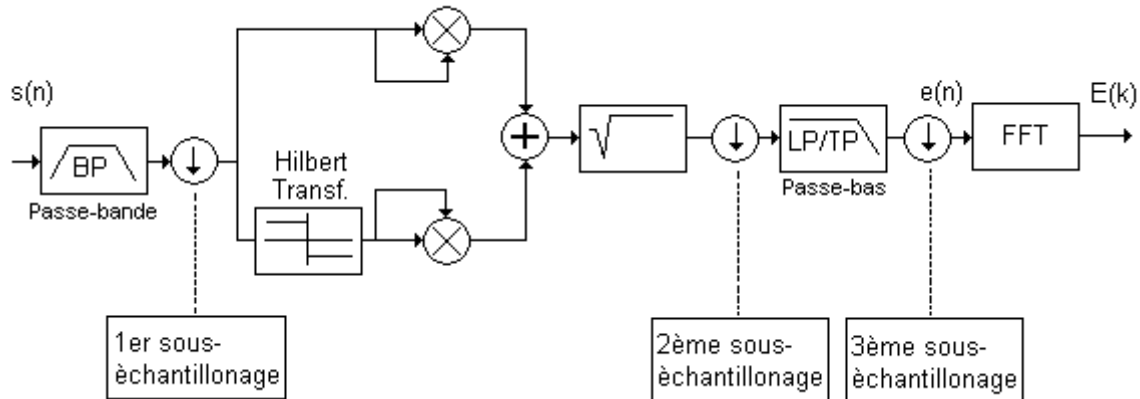


Figure 6: Représentation schématique de l'analyse des modulations dans ArtemiS

Ce sous-échantillonnage sert à réduire le temps de calcul, mais il augmente surtout la qualité de la transformée de Hilbert suivante. Cette transformée calcule à partir du signal d'entrée la partie imaginaire de l'enveloppe complexe correspondante. La partie réelle de l'enveloppe est donnée par le signal d'entrée lui-même. L'étape de calcul suivante permet de déterminer l'enveloppe du signal qui correspond à l'amplitude de l'enveloppe complexe. Cela signifie que le carré de la partie réelle (le signal passe-bande) et de la partie imaginaire (le signal de sortie de la transformée de Hilbert) sont additionnés et que la racine carrée est alors calculée à partir du résultat.

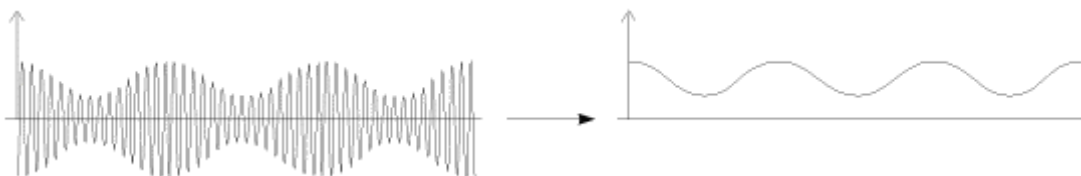


Figure 7: Formation de l'enveloppe

L'enveloppe est alors à nouveau sous-échantillonnée selon la largeur de bande du domaine fréquentiel sélectionnée et filtrée par un passe-bas. On utilise dans ce cas un passe-bas de deuxième ordre dont la fréquence limite est sélectionnée sur la page de propriétés (*Max fréq. d'enveloppe*). Cette fréquence doit être sélectionnée de manière à se trouver au-delà de la fréquence de modulation jusqu'à laquelle l'analyse doit être calculée. Le signal est à nouveau sous-échantillonné selon la fréquence limite de ce filtre passe-bas.

La dernière étape de l'analyse des modulations consiste enfin à réaliser une analyse par FFT de l'enveloppe. L'utilisateur peut sélectionner le fenêtrage, la taille de la fenêtre d'analyse (*Spectre/Taille de spectre*) et le recouvrement pour l'analyse FFT. Cette sélection peut par ex. permettre d'influencer la résolution temporelle ou fréquentielle de l'analyse.