

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Détection acoustique des larves xylophages dans le bois

Jean-François Sciabica¹, Laurent Daudet², Emmanuel Maurin³, Dominique de Reyer³

¹LMA, Centre National de la Recherche Scientifique, 31 chemin Joseph-Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, sciabica@gmail.com

²Université Paris Diderot - Paris 7, UMR 7587, Institut Langevin, ESPCI 10 rue Vauquelin 75231 Paris Cedex 05, laurent.daudet@espci.fr

³Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques 29, rue de Paris 77420 Champs-sur Marne, {emmanuel.maurin, dominique.de-reyer}@culture.gouv.fr

Dans cet article, nous présentons une méthode pour la détection acoustique et non destructive des larves xylophages dans le bois. Une chaîne d'acquisition permet dans un premier temps l'enregistrement d'un signal brut contenant les signaux transitoires émis par les larves. Ces derniers étant parfois difficiles à distinguer du bruit de fond, différentes stratégies de détections de transitoires ont été testées sur des signaux de synthèse conçus à partir d'enregistrements de larves. Un seuillage réalisé sur le signal après une décomposition en ondelettes a donné le meilleur ratio bonnes détections / fausses alarmes et a été retenu pour la mise au point de la chaîne de traitement du signal. Par ailleurs, afin de différencier les signaux émis par les larves d'autres signaux transitoires, un système de classification des transitoires a été utilisé en sortie de la chaîne de détection. Des paramètres issus de l'analyse signal du transitoire sont alors envoyés en entrée d'un réseau de neurones. A titre d'illustration, des exemples d'enregistrements montrent que notre chaîne d'acquisition rend possible la détection non intrusive d'une larve unique dans une pièce de bois.

1 Introduction

La détection d'insectes (ou de larves) xylophages dans le bois par des méthodes non destructives comme les méthodes radiographiques par rayons X ou les méthodes vibratoires fait l'objet d'une recherche continue depuis les années 60. Depuis plusieurs années, nous étudions une méthode non destructive de diagnostic d'infestation basée sur les bruits émis par l'activité des larves xylophages de deux espèces, la vrillette et le lyctus.

Les caractéristiques d'une vibration acoustique dans un matériau solide sont analysées dans de nombreux ouvrages de référence comme celui de Dieulesaint et Royer [1]. Par exemple dans le cas du bois, le matériau étant orthotrope, les valeurs du module d'Young mesurées par des méthodes acoustiques sont différentes dans les trois directions caractéristiques du matériau [2] : les ondes sont mieux transmises dans la direction longitudinale. La transmission des vibrations dans le bois est par ailleurs excellente : la vitesse d'une onde ultrasonique dans la direction longitudinale est de l'ordre de 3600 à 5100m/s selon les essences de bois. Ainsi, les caractéristiques de la transmission d'une onde dans le matériau sont bien qualifiées et utilisées par exemple par les méthodes d'émission acoustique pour proposer un diagnostic d'altération sur le matériau [3]. Dans le cas d'une infestation du bois par des larves, celles ci produisent des vibrations. On suppose que lorsque la larve se nourrit, ses mandibules cassent les fibres de bois et produisent les vibrations.

Nous avons pu en partie caractériser ces signaux à partir d'enregistrements effectués à l'aide d'une chaîne d'acquisition utilisant des transducteurs piézoélectriques [4]. Cette chaîne a permis la capture, la visualisation et l'analyse du signal. Malheureusement le signal brut délivré

par la chaîne d'acquisition est bien souvent difficile à distinguer du bruit de fond. De plus, le diagnostic est aussi souvent rendu difficile du fait de la grande variabilité des signaux : dépendant des espèces de larves, de leur nombre, de leur état d'évolution, des conditions d'enregistrements.

2 Rappel de la chaîne d'acquisition

2.1 Dispositif de capture

Les capteurs sont des accéléromètres à détection piézoélectrique de type PCB 352C65, dont la bande passante est proche de la gamme audible 20 Hz – 20 kHz. Ces matériaux ont la propriété de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique et sont adaptés pour des mesures vibratoires.

2.2 Dispositif d'enregistrement

L'avènement des technologies numériques a permis de regrouper et d'optimiser les différentes étapes de la mesure au niveau de son acquisition et de son traitement. Le boîtier miniature d'acquisition bi-voie : « Symphonie » de la société *01dB-Metravib* est un appareil dédié au contrôle acoustique environnemental. C'est un système portable qui transfère les données acoustiques en temps réel sur un ordinateur. Il permet une analyse acoustique immédiate :

- DB trig est un logiciel d'acquisition qui permet de mémoriser le signal audio à la manière d'un magnétophone numérique et d'analyser en temps réel le signal en bandes larges.

- La mémorisation du signal numérique a permis également de remplacer les magnétophones classiques en augmentant leur dynamique de mesure, leur durée d'enregistrement et en diminuant le temps de dépouillement.

3 Analyse des signaux

Les signaux émis par l'activité des insectes se manifestent par des impulsions transitoires (clics) très brèves (quelques millisecondes) dont l'énergie se répartit sur une large gamme de fréquence. Ces « clics » émergent d'un bruit de fond constant (bruit intrinsèque à la chaîne d'acquisition, en particulier à fort taux d'amplification), ou non constant (vibrations parasites, par exemple des bruits de pas) [4].

3.1 Principe de détection des transitoires

Une des difficultés de détection des transitoires est la très faible intensité des signaux à détecter, souvent du même ordre de grandeur que le bruit de fond inhérent à la chaîne de mesure. Un algorithme de détection est alors efficace lorsqu'il offre un bon compromis entre le nombre de bonnes détections (présence d'un clic d'insecte), que l'on souhaite maximal, et le nombre de fausses alarmes (détection d'un autre évènement sonore), que l'on souhaite minimal.

Les clics d'insectes, événements transitoires, sont des signaux très brefs dont la durée n'excède pas les 50 millisecondes. Par conséquent, leur spectre s'étale sur toutes les fréquences audibles (20 Hz à 20 KHz). Les enregistrements comportent ces signaux transitoires, du souffle numérique (bruit large bande) et divers bruits parasites environnementaux (voix, pas, etc.). Les clics d'insectes les plus importants sont parfois directement audibles en sortie de la chaîne d'acquisition grâce à un amplificateur, mais leur amplitude est souvent plus faible que celle du bruit de fond. La fonction de détection retenue doit donc « mettre en valeur » le transitoire et le faire émerger du bruit de fond.

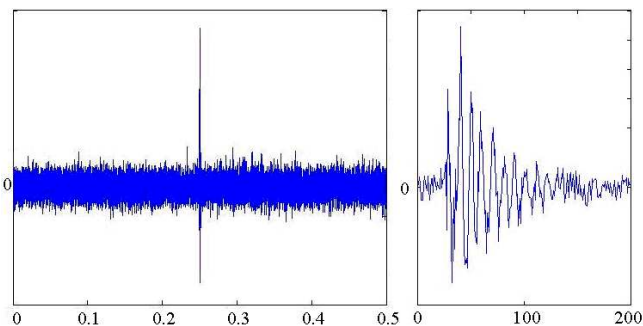


Fig1 : Exemple d'enregistrement contenant un clic d'insecte. Sur le schéma de gauche, le transitoire émerge nettement du bruit (abscisse en secondes). Sur le schéma de droite, zoom sur ce même transitoire (abscisse en échantillons, 200 échantillons = 5 ms)

3.2 Différentes méthodes de détection

Trois types de transformation du signal ont été testées sur des enregistrements réalisés en laboratoire :

Mesure de l'énergie locale (LEQ) : Le LEQ ou niveau équivalent est obtenu en sommant le carré des valeurs instantanées du signal dans une petite fenêtre (256 échantillons, soit environ 5 ms), centrée autour du point considéré. Ceci permet de faire émerger un certain nombre d'évènements significatifs tout en « lissant » le bruit.

HFC (High Frequency Content) ou énergie locale pondérée en fréquence: La technique HFC est un prolongement de la méthode précédente: dans chaque

fenêtre on effectue une transformée de Fourier rapide (FFT), et on pondère le carré du module de la transformée linéairement en fréquence. Les transitoires ayant un contenu spectral relativement riche pour les hautes fréquences par rapport au bruit (bruit de fond ou bruit parasite), ils émergent de façon plus distincte dans ce type de représentation.

Ondelettes : Les ondelettes sont une forme de représentation des signaux dans le plan temps/fréquences. Elles s'adaptent aux différentes composantes du signal en opérant un découpage du signal en différents niveaux de résolutions. Cela se traduit à l'analyse par la modulation de la taille de la fenêtre d'analyse en fonction de la gamme de fréquence: grandes fenêtres (donc bonne résolution fréquentielle) pour les basses fréquences, petites fenêtres (donc bonne résolution temporelle) pour les hautes fréquences.

La transformée en ondelettes discrètes est bien adaptée à ce genre de tâches [5,9]. Il s'agit en effet d'un processus récursif qui à chaque étape transforme le signal en un signal d'approximation (contenant les basses fréquences), et un signal de détail (contenant les hautes fréquences). La transformée se réalise par le biais de plusieurs filtrages successifs du signal [5]. Cette décomposition en ondelettes présente la propriété suivante. Aux fines échelles, ses coefficients ont une valeur importante au voisinage des transitions brutales du signal à détecter. Inversement, les régions bruitées (souffle du capteur) donnent des coefficients de faibles valeurs. Ainsi, seuls les coefficients dépassant un seuil donné [6] seront conservés et ceux inférieurs au seuil seront mis à zéro. Ce seuil s'écrit

$$T = \sigma \sqrt{\ln(N)} \quad (1)$$

où σ est la variance du bruit et N le nombre d'échantillons. Une fois que nous avons seuillé la transformée en ondelettes, nous réalisons la transformée inverse pour obtenir une reconstruction du signal débruité. Le signal laisse alors apparaître les transitoires et seules celles qui dépassent le seuil T sont alors retenues.

D'un point de vue pratique, un filtrage passe-bas (fréquence de coupure de 1500 Hz) est appliqué au préalable afin de supprimer tous les bruits électriques et les bruits de machine tournante générant des fréquences audibles (climatisation, étuve). Les signaux sont ensuite re-échantillonnés pour supprimer la bande de fréquence au-dessus de 44100 Hz. Enfin, le signal passe dans un filtre blanchisseur qui remonte les hautes fréquences et offre un spectre plat. Cette condition est nécessaire avant d'appliquer les ondelettes [7].

3.3 Comparaison des méthodes de détection

L'un des meilleurs outils permettant de classer différentes méthodes de détections est celui qui consiste à classer des courbes ROC ou « Receiver Operating Characteristics ». Elles représentent la variation du nombre de détections correctes en fonction du nombre de fausses alarmes pour un niveau de bruit donné, lors de la variation d'un paramètre agissant sur le seuil. Ainsi, elles permettent de quantifier l'efficacité du détecteur. Dans notre cas, le paramètre que nous allons faire varier est la marge δ , valeur (positive ou négative) ajoutée au seuil de détection qui

devient $T'=T+\delta$. Plus la marge est petite, plus le nombre de clics détectés sera grand. Un détecteur sera considéré meilleur qu'un autre si sa courbe ROC présente un ou des points au-dessus de la courbe ROC du second détecteur dans la zone d'intérêt (nombre de détections correctes élevé et nombre de fausses alertes faible). Le meilleur détecteur peut être considéré comme celui qui présente le plus grand nombre de points le plus proche du coin supérieur gauche du carré contenant la courbe (le coin supérieur gauche correspond à aucune fausse alarme et à 100% de bonnes détections).

3.4 Signal synthétique

Le tracé des courbes ROC demande la connaissance du signal de référence, c'est-à-dire le nombre précis de clics d'insectes ainsi que leur localisation temporelle exacte. L'indexation de tous les événements acoustiques est un travail fastidieux, c'est pourquoi il est préférable de travailler avec un signal synthétique. Cette solution permet également de travailler avec des clics d'insectes qui ne sont pas détectables à l'oreille. Les signaux synthétiques ont été fabriqués en respectant les propriétés statistiques des clics d'insectes. La répartition des clics d'insectes dans un enregistrement semble suivre une loi mathématique de Poisson, qui modélise les événements rares. Nous avons également proposé une loi de variation des amplitudes des clics à partir de relevés sur plusieurs échantillons. Nous obtenons alors une fonction de répartition des amplitudes de la forme :

$$\text{Fonction de répartition des amplitudes} = 1 - \frac{1}{X} \quad (2)$$

Les fichiers mesuraient 2^{19} échantillons soit environ dix secondes. Nous avons identifié 6 clics caractéristiques, représentant bien (au facteur d'échelle près) la diversité des clics mesurés, à la fois pour les lyctus et les vrillettes.

La première étape de la fabrication du signal consiste à créer un processus suivant une loi de Poisson de manière à avoir environ une soixantaine de clics pour les dix secondes. Pour chaque clic, une amplitude est attribuée selon la statistique en $1/X$, et le type de clic est choisi aléatoirement parmi les extraits caractéristiques. Le bruit du capteur est ensuite modélisé. Plusieurs extraits de bruit de capteur seul (qui ne sont pas parasités ni par un événement acoustique extérieur ni par des bruits d'insectes) ont contribué à réaliser un bruit de capteur synthétique possédant les bonnes propriétés spectrales. Des bruits extérieurs ont été rajoutés comme des sonneries de téléphones, des bruits de pas ou encore de la parole.

Les conditions de tests étaient les suivantes : Il y avait 62 transitoires dont les amplitudes étaient comprises entre 0 et 1 selon la loi de distribution évoquée précédemment. Lorsque nous mesurons le rapport signal sur bruit avec uniquement le souffle du capteur, nous avons une valeur de -18 dB. Nous avons réalisé plusieurs tests avec à chaque fois le souffle du capteur plus les bruits suivants : percussions, bruits de pas, voix humaine, etc. Dans tous les cas, la méthode aux ondelettes a donné les meilleurs résultats. Nous présentons sur la figure 2 le cas « souffle du capteur + bruits percussions ».

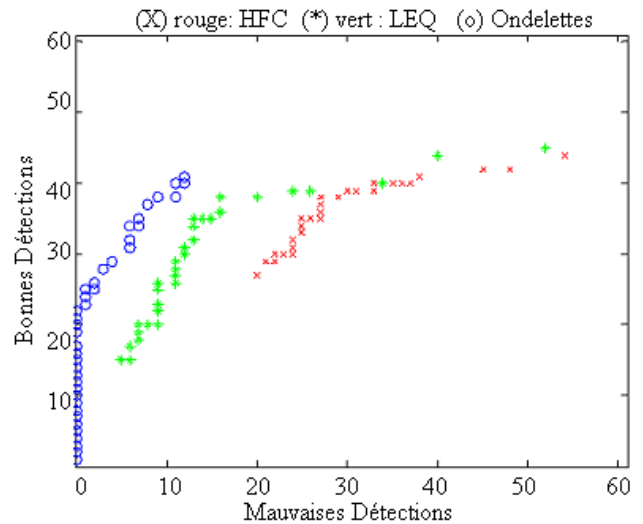


Fig2 : Courbes ROC pour les 3 méthodes de détections dans le cas d'un signal synthétique de 10 secondes constitué de 62 transitoires, du bruit de souffle et de bruits de percussions.

La méthode basée sur les ondelettes donne les meilleurs résultats et permet une excellente localisation temporelle des événements détectés : elle peut être adaptée à des signaux très denses pour lesquels on cherche à séparer des événements très proches en temps. Il a donc fallu envisager un détecteur/classifieur moins performant en termes de reconnaissance automatique, mais plus robuste à la variabilité des signaux. L'idée est de ne plus se focaliser sur une signature élémentaire pour en extraire des « formes fortes » et construire un gabarit de référence, mais au contraire tenter d'avoir une approche plus globale en identifiant un indicateur de présence de la source recherchée. On a recherché des méthodes de traitement moins fines et aux analyses temps/fréquence élaborées, on préférera une approche statistique et robuste quant à la variabilité des signaux.

4 Discrimination des signaux

Les campagnes de mesures ayant souvent lieu in-situ, divers bruits parasites peuvent venir perturber l'enregistrement. Des paroles, des pas ou des claquements de portes peuvent être perçus par le détecteur comme un clic d'insecte et donc générer une fausse alerte. Un post-traitement est donc nécessaire pour disposer d'un système capable de faire la distinction entre bonnes et fausses alertes. Si le travail de l'utilisateur est ainsi facilité, son expertise reste bien sûr indispensable. Le post-traitement a lieu en deux étapes pour chaque transitoire : Extraction d'un jeu de paramètres à partir du signal, puis classement par réseau de neurones.

4.1 Extraction des paramètres

Il est plus ou moins admis que la rupture de la fibre sous l'action de l'insecte émet le bruit que nous appelons clic d'insecte. Cette hypothèse nous permet de considérer qu'il existe certaines caractéristiques entre deux clics d'insectes que nous modéliserons par la suite par une somme de sinusoides amorties.

Quatre paramètres permettent une bonne caractérisation des transitoires :

1. le rapport harmonique sur bruit
2. le kurtosis
3. la largeur du transitoire
4. le rapport entre le maximum de la transition et le

seuil

L'utilisation de méthode d'estimation haute résolution [7] permet la séparation du signal en une partie purement sinusoïdale et une partie bruitée. Nous définissons alors un rapport entre l'énergie de la partie harmonique et l'énergie de la partie bruitée du transitoire détectée. L'hypothèse précédente sur la nature des clics et l'absence de partie harmonique dans les nombreux bruits parasites permet de réaliser une bonne discrimination.

Les statistiques d'ordre élevé permettent de réaliser et de tester le caractère gaussien d'un signal [8, 9]. Nous utilisons le moment d'ordre 4, appelé Kurtosis qui caractérise l'aplatissement de la densité de probabilité. Pour les transitoires, la valeur du Kurtosis est très élevée alors qu'elle est plus faible pour les bruits parasites et le souffle. Il est défini de la manière suivante :

$$K = \frac{E(x^4)}{E(x^2)^2} - 3 \quad (3)$$

où $E(x)$ est l'espérance mathématique du signal x

Les bruits parasites ont bien souvent une durée supérieure aux transitoires. La largeur du pic qui dépasse du souffle du capteur est donc plus petite pour les transitoires que pour les autres bruits. Elle se définit comme le nombre d'échantillons du signal débruité au-dessus du seuil de détection. Le quatrième et dernier paramètre prend aussi en compte que les clics d'insectes ont une plus forte amplitude que les bruits parasites sur le signal débruité par les ondelettes. Il correspond donc au rapport du maximum de l'amplitude de la transitoire sur le seuil calculé précédemment.

4.2 Réseau de neurones

Un réseau de neurones est un modèle de calcul destiné entre autre à la classification automatique d'objets. A partir d'un jeu de paramètres caractérisant des objets de plusieurs classes, le réseau de neurones affecte chaque transitoire à sa classe. Trois classes de signaux sont alors définies.

- La classe 1 : Bonne détection (clics d'insectes)
- La classe 2 : Erreur de détection (souffle du capteur)
- La classe 3 : Fausse alarme (bruit parasite de l'environnement sonore)

Les Classes 2 et 3 correspondent à deux types de fausses détections. Afin d'optimiser les performances de discrimination, il aura été nécessaire de les séparer en 2 classes. Une période d'apprentissage permet au préalable de régler aux mieux les paramètres du réseau. Une base représentative des 3 classes a été élaborée représentant un jeu de cent quarante six transitoires appartenant aux trois classes dans la même proportion. Les sons de la classe 1

sont issus de multiples enregistrements à notre disposition et ils contiennent aussi bien des sons de lyctus que de vrillettes. Les sons de la classe 3 couvrent une grande partie des bruits parasites rencontrés au cours des différentes conditions des campagnes de mesures. La performance du réseau a été évaluée par une succession de phases apprentissage-test. Deux tiers de la base de test étaient tirés au sort pour l'apprentissage, le tiers restant était utilisé pour les tests. Ce protocole a été répété cinquante fois et le taux de bonnes discriminations de 98 % (soit une seul transitoire mal classé sur 50)

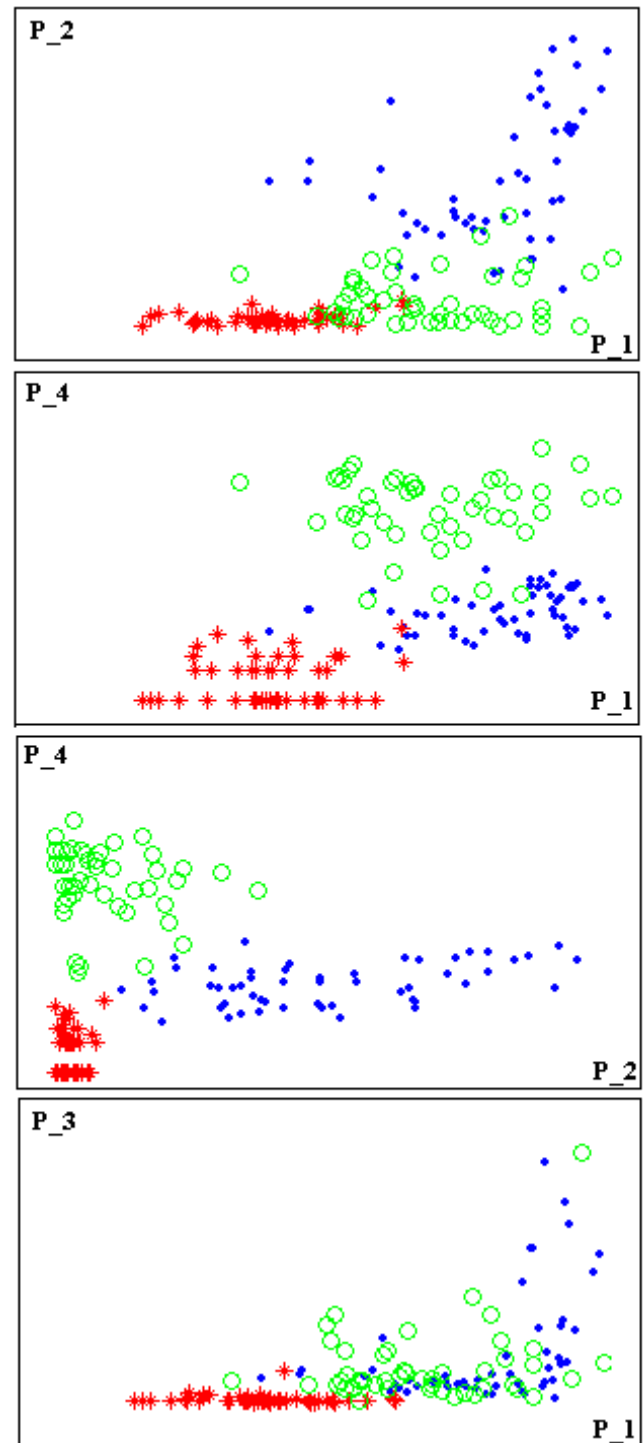


Fig. 3 : Discrimination des 3 classes avec 2 paramètres à chaque fois: Repartitions des transitoires de l'espace des paramètres P_i , P_j ou i et j sont l'un des 4 paramètres définies ci-dessus. La classe 1 est représenté par des • bleu, la classe 2 par un × rouge et la classe 3 par un o vert

5 Développement logiciel

Tous les traitements évoqués précédemment ont été intégrés dans un logiciel qui permet de réaliser des enregistrements en sortie de la chaîne d'acquisition. L'interface du logiciel permet d'afficher comme le montre la figure 4.

- (1) : Le nombre totale de clics détectés sur 5 secondes en fonction du temps
- (2) : La position des clics d'insectes sur l'enregistrement
- (3) : La forme d'onde des clics d'insectes

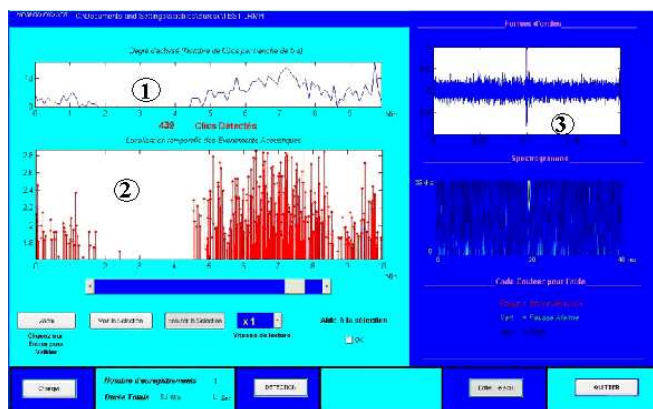


Fig. 4 : Logiciel de détection des clics d'insectes

6 Exemples d'application: Enregistrements sur des éprouvettes de bois infestées par *Oligomerus ptilinoides*

A partir de l'acquisition du signal brut, l'analyse automatique du signal nous a ouvert le champ d'application de l'étude acoustique vers le suivi dans le temps de l'activité des larves xylophages. Ceci permet de commencer à appréhender le comportement chrono-biologique de ces espèces et d'optimiser l'expertise du diagnostic.

Deux larves isolées d'*Oligomerus ptilinoides* (stade âgé) ont été déposées chacune dans un bloc de bois résineux sain (50x20x10mm) et l'ensemble est placé dans une chambre noire. Des enregistrements ont été effectués pendant plusieurs semaines sur les deux blocs, une voie étant collée sur chacun des blocs.

Les spectres de la figure 5 ont par exemple été obtenus. Il s'agit d'enregistrements d'une heure toujours effectués au même moment de la journée à différentes périodes du mois. Pour un même enregistrement, la dispersion des pics est très irrégulière. Les enregistrements montrent l'évolution possible de l'activité des larves au court d'un mois : il peut y avoir un arrêt ou un arrêt puis une reprise d'activité de la larve. Ces premiers enregistrements nous permettent d'évaluer la période et le temps d'enregistrement minimum nécessaire à la détection d'insecte : des enregistrements d'une heure par jour sur une période d'un mois sont nécessaires. Cependant, ces enregistrements montrent que les larves peuvent être « silencieuses » pendant plusieurs semaines probablement pendant les périodes de mue. De plus, il est connu que les insectes ont une grande activité au printemps : période de nos enregistrements. Il est possible que cette activité soit beaucoup plus discrète pendant les

autres saisons notamment en hiver. Enfin, il nous reste à étudier l'impact des conditions de conservation sur les signaux émis par les insectes : on sait en particulier que les insectes sont très sensibles aux variations de température.

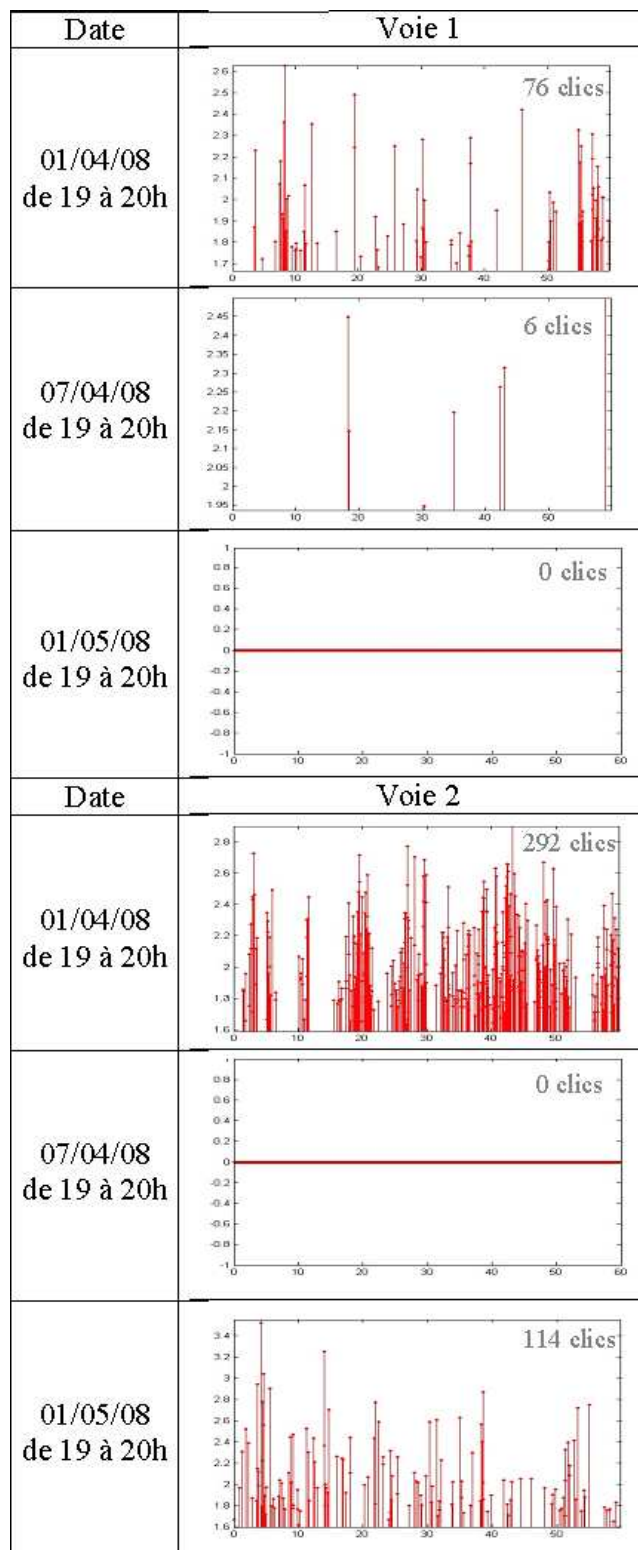


Fig. 5 : enregistrements de deux blocs (voie 1 et voie2) contenant une larve chacun, pendant une heure à différentes périodes sur une durée d'un mois

Par ailleurs, un enregistrement a été effectué sur un élément mobilier infesté de façon notoire. L'enregistrement effectué confirme sans ambiguïté l'infestation. La probabilité de

signal due aux insectes est augmentée par le nombre de larves présentes. En général, dans la nature un bois est infesté par plusieurs larves d'insecte.

Discrete Wavelet Transform » *Proceedings 16th European Signal Processing Conference, Lausanne, Sept 2008.*

7 Conclusion

Une chaîne de mesure a permis d'obtenir des enregistrements du bruit de larves d'insectes au sein du matériau. Notre appareil permet d'écouter une larve d'anobidé dans un morceau de bois. À partir de ces enregistrements, les signaux émis par les insectes ont été caractérisés. Un post-traitement du signal par une transformée en ondelettes discrètes est adapté à notre problématique car il permet de trouver un bon compromis entre taux de bonne détection et fausses alarmes. Le logiciel de post traitement a été développé sous MatLab. Ce logiciel permet de détecter et visualiser les signaux émis par les larves pendant les périodes d'enregistrement.

Une campagne systématique d'enregistrements doit être entreprise afin de constituer une base de données suffisamment riche et fiable. Pour cela, un lourd travail d'expertise doit être entrepris afin de valider chaque signal pour tous les enregistrements et ainsi de corrélérer l'analyse avec l'expertise. Il sera important d'évaluer l'impact de la modification de l'insecte ou d'un module de la chaîne d'acquisition sur l'analyse.

Les premiers essais réalisés ont permis de suivre les signaux émis par des larves d'*Oligomerus ptilinoides* introduites dans un morceau de bois. Les résultats montrent en première hypothèse qu'une période d'enregistrement d'une heure par jour pendant un mois pourrait suffire à la détection de larves dans un bois infesté. Des enregistrements effectués dans d'autres conditions de conservation et pendant d'autres saisons doivent confirmer ces résultats.

Références

- [1] Dieulesaint E. and Royer, D. « Ondes élastiques dans les solides », *Masson et Cie*, Paris, 1974
- [2] Hearmon R. F. S. « The elasticity of wood and plywood », *Dept. Sci. Ind. Res. For. Prod. Res. Spec. Rep. N° 7. His Majesty's Stationery Office*; London; 1948
- [3] Bucur V., « Acoustics of wood », *CRC Press*, 1995
- [4] De Reyser D, Maurin E., Daudet L., Fontaine J.-M. : « Les signaux émis par les larves d'insectes xylophages et la détection acoustique », *ICOM : preprints of the 13th Triennial meeting, 12-16 Septembre 2005, vol. II, p. 1068-1074, 2005*
- [5] Mallat S., « Une exploration des signaux en ondelettes » *Les éditions de l'Ecole Polytechnique*, 2000
- [6] Donoho D. and Johnstone I. « Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage ». *In Biometrika*, 81, 425-455, 1994
- [7] Badeau R.. « Méthodes à haute résolution pour l'estimation et le suivi de sinusoïdes modulées : Application aux signaux de musique » *Thèse de doctorat de l'ENST, Département de Traitement du Signal et des Images*, 2005
- [8] Dubois-Chareyre L.. « Analyse bispectrale de signaux réels : Application à la détection de transitoires ». *Thèse de Doctorat de l'INPG (Grenoble)*, 1997
- [9] De la Rosa J.J, Moreno A., Puntonet G.C ; « A Signal Processing Module for Non-Destructive Targeting of Termite Activity Using the Spectral Kurtosis and the