

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Détection de sources émergentes au sein d'un bruit large bande : mécanismes perceptifs et applications

Françoise Dubois¹, Sabine Meunier¹, Guy Rabau¹, Franck Poisson², Gaël Guyader³

¹Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31 chemin Joseph Aiguier, F-13402 Marseille Cedex 20, {dubois, meunier, rabau}@lma.cnrs-mrs.fr

²SNCF, 45 rue de Londres, F-75379 Paris, franck.poisson@sncf.fr

³ Technocentre Renault, TCR AVA 1 63 - 1 avenue du Golf, F-78288 Guyancourt, gael.guyader@renault.com

Les émergences fréquentielles (appelées « signal ») participent à part entière à la qualité sonore des bruits d'habitacles. Elles sont plus ou moins masquées par le bruit de fond du véhicule (le « masque »). Peu de critères sont actuellement à la disposition des industriels comme réel outil de prédiction de l'audibilité de sources émergentes. Nous présentons ici trois expériences explorant les capacités des auditeurs à détecter une seule émergence dans un bruit de fond. La première expérience examine la détection d'un son pur à différentes fréquences dans un bruit blanc, dans un bruit d'habitacle de train et dans un bruit d'habitacle automobile enregistré en soufflerie (de type bruit rose). Les rapports (intensité du signal au seuil de détection sur intensité du masque) en sortie des filtres auditifs sont dépendants de la fréquence du signal. Ils permettent d'expliquer les résultats. L'expérience 1 était réalisée au casque étalonné au tympan, procédure dont nous présenterons les modalités. Afin de nous rapprocher des conditions réelles, l'expérience 2 reproduit l'expérience 1 en écoute champ libre, face à une enceinte monophonique en chambre sourde. Nous retrouvons les mêmes résultats que pour l'expérience 1. Ceci nous permet de valider la procédure d'étalonnage et nous assure du réalisme des mesures de seuils de détection, notamment en basse fréquence. L'expérience 3 révèle une dégradation des performances de détection (3 dB environ) d'un son pur dans un bruit d'habitacle automobile enregistré en conditions réelles de roulage. La complexité du contenu spectral du masque de type bruit rose, présentant lui-même plusieurs raies émergentes (harmoniques et non harmoniques, éloignées du signal et proches en fréquence) semble être responsable de l'élévation des seuils. Cette expérience est-elle à rapprocher d'une situation de masquage énergétique ou bien observe-t-on ici un cas de masquage informationnel ? Nous discuterons des modèles permettant de prédire les résultats.

1 Cadre de l'étude

Fletcher [1] a été le premier à expliquer le phénomène du masquage simultané en supposant que le système auditif périphérique se comporte comme s'il contenait une série de filtres passe-bande dont les fréquences centrales se recouvrent continûment sur tout le spectre audible. Afin d'optimiser son rapport Signal sur Bruit, l'observateur ne tiendrait compte que de la sortie du filtre centré sur la fréquence du signal à détecter. Cependant, plus récemment, de nombreux travaux ont mis en défaut ce modèle énergétique, classiquement utilisé en détection. Dans le cas des bruits d'habitacles, nous nous trouvons dans des environnements où de nombreux types de masquage, mis en évidence précédemment en psychoacoustique, peuvent intervenir.

Tout d'abord, la relation de phase aux oreilles du passager diffère suivant sa position au sein de l'habitacle. Or, les effets de masquage peuvent être réduits par déphasage, on parle de *démasquage par déphasage* (Moore, [2]). Un signal peut parfaitement être détecté par présentation sur les deux oreilles, en diotique (même signal sur les deux oreilles) ou en dichotique (opposition de phase sur les deux oreilles) alors que celui-ci était noyé dans le masque en présentation monaurale. Cet effet n'est pas négligeable, notamment en basses fréquences (<400 Hz) puisqu'il peut atteindre 15 dB.

Ensuite, les modulations d'amplitude au sein d'une voiture de train ou automobile ne sont pas rares. Cependant, des sons modulés en amplitude de façon coordonnée auront

tendance à être regroupés dans un même flux auditif : ce phénomène porte le nom de *démasquage par co-modulation* (Moore, [2]). Une modulation identique entre masque et signal servirait de point de repère, permettant à l'auditeur de connaître les moments où le rapport signal sur bruit est le meilleur c'est-à-dire où l'intensité du masque est la plus faible, là où il faut tendre l'oreille pour entendre le signal : on parle d'écoute dans les « creux » du masque. Le démasquage par co-modulation ne semble pas varier beaucoup avec la fréquence du signal, il gagne en efficacité si le masque couvre une large bande de fréquences.

Enfin, le spectre du bruit intérieur d'habitacle automobile est la combinaison de multiples sources sonores de natures différentes : aux bruits large bande résultant du bruit aérodynamique ou de roulement viennent s'ajouter des raies harmoniques dues au bruit du moteur. Les sources responsables d'émergences fréquentielles sont quant à elles nombreuses, produits de multiples accessoires entraînés par le moteur (boîte de vitesses, pompe à essence, alternateur, courroies, turbo, etc.). Or un nouveau type de masquage désigné, sous le terme de *masquage informationnel*, relié à des situations d'incertitude (Informational Masking with Uncertainty IM(U)) ou de confusion, de distraction a été révélé par de nombreux auteurs (par exemple Watson [3]). On parle de masquage informationnel basé sur la similarité (IM(S)) lorsque le masque et le signal sont de même nature, qu'ils peuvent être confondus. Une source émergente au sein d'un bruit d'habitacle automobile large bande contenant lui-même des raies fréquentielles peut-elle être source de masquage informationnel ?

Plusieurs choix ont donc dû être adoptés au cours de l'étude. Les mesures ont été effectuées par conséquent en écoute diotique, avec le masque et le signal de même durée (500 ms), présentés simultanément, en phase. Nous avons étudié tout d'abord la détection d'un son pur dans un bruit large bande, en nous intéressant à l'influence du mode de reproduction. Nous avons ensuite complexifié le contenu spectral du masque, se rapprochant ainsi de situations rencontrées au sein d'habitacles.

2 Influence du mode de reproduction : écoute au casque et écoute en champ libre

2.1 Contexte

"Meaningful sound-quality evaluation by psychoacoustic methods is only possible if the equalization of the transducers has been performed with ultimate care" (Fastl [4]): la question de l'étalonnage des casques d'écoute est le point de départ de toute mesure psychoacoustique et essentielle lors d'une mesure de seuils de détection. Le problème posé est de déterminer les niveaux de pression des signaux acoustiques auxquels est soumis un auditeur écoutant au moyen d'un casque. En fonction du signal électrique appliqué à l'écouteur, le signal acoustique dépendra de la charge acoustique, c'est-à-dire de sa position sur l'oreille humaine ou artificielle. Le niveau mesuré sur les capsules des microphones de la tête artificielle (les microphones sont affleurant aux pavillons, il n'y a pas de conduit auditif), correspond à l'étalonnage au tympan utilisé au cours de notre première expérience (Rabau et Meunier [5]).

L'écoute au casque correspond au mode de reproduction le plus souvent utilisé lors d'expériences de masquage, à l'exception de quelques études. Cependant, en basses fréquences (<400 Hz), les mesures de seuils de détection sont rares du fait notamment de l'irrégularité des réponses en fréquence des casques pour cette gamme de fréquences. Fidell [6] et Houtsma [7, 8] se sont intéressés au masquage en basses fréquences, proposant des modes de reproduction différents de l'écoute au casque, classiquement utilisé en psychoacoustique. Fidell [6] a opté pour la reproduction via une unique enceinte en chambre anéchoïque, à des niveaux spectraux de bruit importants. Houtsma [7, 8] a effectué des mesures de masquage dans un bruit blanc, pour plusieurs sons purs de 30 Hz à 8000 Hz, espacés d'une demi-octave, en choisissant un nouveau mode de reproduction : l'utilisation de casques intra-auriculaires. Tout deux ont obtenu des rapports signal sur bruit importants en basses fréquences.

Au sein de notre étude, il nous a semblé intéressant pour ces raisons de comparer deux modes de reproduction, l'écoute au casque étalonné au tympan (expérience 1) pour se rapprocher des résultats de la littérature et l'écoute en champ libre (expérience 2), afin de nous rapprocher d'une situation appliquée de bruits d'habitacle.

Lors de l'expérience 1, masque et signal étaient restitués au casque (Sennheiser HD 650) en écoute diotique (même signal sur les deux oreilles), étalonné au tympan.

Lors de l'expérience 2, les tests se déroulaient dans la petite chambre sourde du LMA. La reproduction était

monophonique (enceinte amplifiée Génélec type 1031 et caisson Basses Fréquences Génélec type 1094). L'auditeur était placé sur un siège réglable en hauteur à 1,90 m de l'enceinte. La tête de l'auditeur était maintenue immobile au cours de l'expérience afin de s'affranchir des différences de niveau dues à la salle, l'écoute était binaurale. La mesure des niveaux était effectuée par un microphone Brüel & Kjaer (type 4190) situé à la place de la tête de l'auditeur en l'absence de celui-ci.

2.2 Stimuli

La mesure de seuils de détection de sept sons purs (80 Hz, 160 Hz, 320 Hz, 640 Hz, 1280 Hz, 2560 Hz, 5120 Hz) en présence de trois bruits de fond masquants ne présentant pas de raies émergentes a été réalisée. Il s'agissait d'un bruit blanc large bande, d'un bruit de fond de TGV Duplex, en salle haute, roulant à 300 km/h et d'un bruit de fond de berline enregistré en soufflerie. Les spectres de ces deux derniers masques sont présentés sur la figure 1. Les niveaux de bruits étaient fixés à 55 dB SL, par une mesure préalable des seuils absolus de ces bruits.

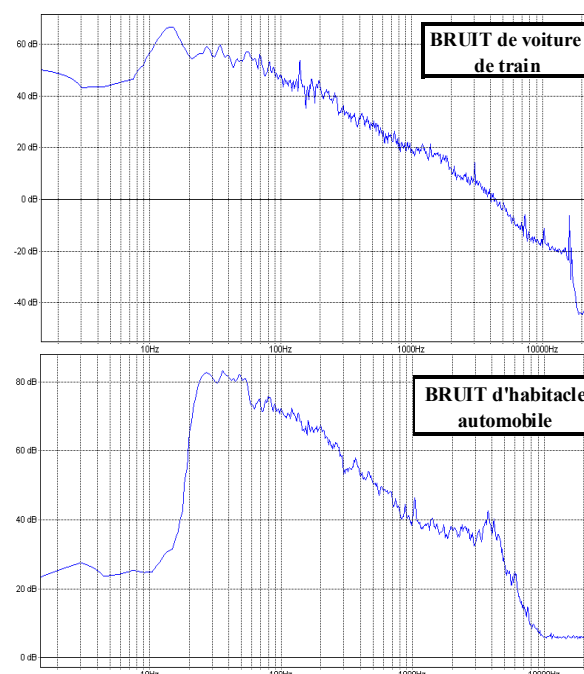


Figure 1 : Spectres des bruits de voiture de train et d'habitacle automobile enregistré en soufflerie, utilisés lors des expériences 1 et 2 (fréquence d'échantillonnage : 48828Hz, nombre de points de la FFT : 32768).

2.3 Procédure

Les mesures de seuils de détection ont été effectuées en utilisant la procédure adaptative à trois intervalles de type 3 down-1 up. Trois intervalles sonores étaient présentés consécutivement, deux d'entre eux contenaient le masque, l'autre contenait le même masque auquel était ajouté le signal. L'intervalle sonore contenant le signal était présenté aléatoirement en première, deuxième ou troisième position. L'auditeur devait indiquer dans quel intervalle était situé le signal (1, 2 ou 3) ; à la suite de sa réponse, la réponse correcte lui était indiquée sur l'écran (Feed Back). Chaque mesure était répétée une fois. L'ordre de passage des tests était différent d'un auditeur à l'autre et choisi aléatoirement.

2.4 Auditeurs

Douze auditeurs, de 22 à 51 ans (la moyenne d'âge était de 29 ans) ont participé aux mesures des seuils absolus et des différents seuils masqués. Huit d'entre eux n'avaient jamais participé à une mesure de seuils. Tous les auditeurs, soumis à un audiogramme de Békésy sous casque en salle anéchoïque, ne présentaient aucune déficience auditive.

2.5 Résultats et discussion

D'après le modèle énergétique du masquage, le seuil de détection d'un son pur dans un bruit large bande est défini par l'équation (1) (Unoki et al. [9]):

$$P_s = K + N_0 + 10 \log_{10} \left\{ \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} W(f) df + \int_{f_{u\min}}^{f_{u\max}} W(f) df \right\} \quad (1)$$

P_s est le niveau du signal au seuil en dB SPL, N_0 le niveau du masque au sein du filtre auditif centré sur la fréquence du signal, $W(f)$ représente la fonction de pondération du filtre, défini asymétriquement à gauche et à droite de la fréquence du signal et K est un facteur attestant de l'efficacité de la détection du signal à cette fréquence.

L'hypothèse de Fletcher [1] selon laquelle les filtres auditifs seraient parfaitement rectangulaires a été mis en défaut à plusieurs reprises (Moore [2]). Les filtres Roex « rounded exponential », filtres exponentiels à sommet arrondi, asymétriques semblent présenter une bonne approximation des données expérimentales (Unoki et al. [9], Glasberg et Moore [10]).

La figure 2 présente l'évolution du facteur K pour les différentes conditions expérimentales. Le facteur K correspond à la différence en décibels entre le seuil masqué mesuré et le niveau de bruit masquant calculé dans le filtre de type Roex centré sur la fréquence du son pur à détecter.

A partir du niveau du bruit dans le filtre auditif centré sur le signal, on peut prévoir le seuil masqué du signal à détecter. Les résultats présentés figure 2 montrent qu'une différence de quelques décibels entre le niveau du signal et du bruit masquant dans le filtre auditif centré sur la cible suffit à la détection. L'évolution de K en fonction de la fréquence révèle une efficacité maximale de détection autour de [1000 ; 3000 Hz], semblable aux résultats de la littérature (Unoki et al. [9], Glasberg et Moore [10]). Comme l'avaient montré Fidell [6] et Houtsma [7, 8], la détection de signaux basse fréquence (<400 Hz) entraîne une élévation des rapports signal sur bruit.

Des analyses de variance à mesures répétées calculées pour chacun des tests ont été effectuées. La variation du facteur K est significative en fonction de la fréquence ($F(N=12, dl=6)=171.7$; $p<0.05$). Cependant, la variation n'est pas significative suivant le type de masque ($F(N=12, dl=2)=2.4$; $p=0.1137$) et le mode de reproduction ($F(N=12, dl=1)=0.81$; $p=0.3874$). L'écoute au casque, étalonné au tympan, est validé puisque des résultats similaires sont obtenus en champ libre, et ce pour les différents masques testés. La mesure de seuils de détection au casque semble donc réaliste, notamment en basse fréquence (jusqu'à 80 Hz).

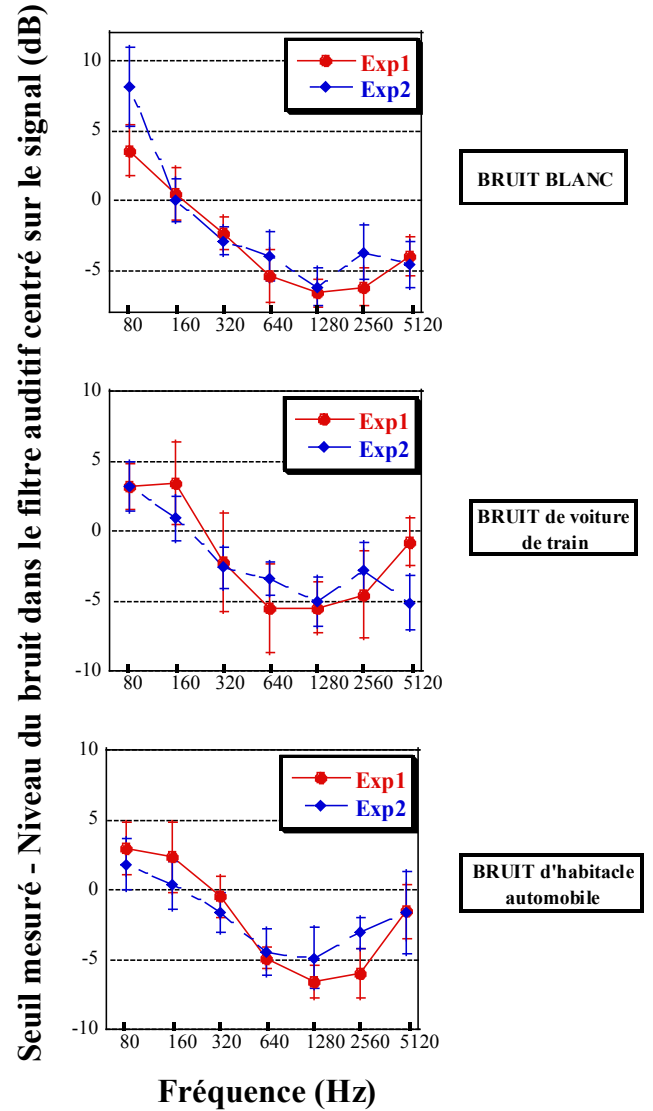


Figure 2 : Variation du facteur K pour les trois masques, au casque étalonné au tympan (Exp1) et en champ libre (Exp2), mesurés sur douze auditeurs.

3 Influence du contenu spectral du masque

3.1 Contexte

La détection d'un son pur dans du bruit peut être dégradée de façon importante lorsqu'il y a incertitude sur le masque, c'est-à-dire lorsque le masque n'est pas exactement le même au cours d'une mesure de seuils par exemple (Neff et Green [11]). On parle de masquage informationnel basé sur l'incertitude IM(U). Oh et Lutfi [12] ont comparé de telles situations de laboratoire à des situations plus appliquées, en sélectionnant 50 sons de notre environnement quotidien (harmonicité d'un klaxon d'automobile, modulation d'amplitude d'un grincement de porte et modulation en fréquence d'un cri de bébé). Ils n'ont pas noté de réelles améliorations de performances de détection malgré une familiarité plus importante des sons de notre quotidien. Durlach et al. [13], partant de conditions à fort taux de masquage informationnel (IM(U)), ont montré qu'en diminuant la similarité entre signal et masque, le masquage diminue de façon notable. Il existe donc un masquage

informationnel basé sur la similarité $IM(S)$. Se trouve-t-on dans une telle situation dans un habitacle automobile : la présence de raies dans le bruit d'habitacle automobile a-t-elle une répercussion sur les seuils masqués ? La question revient à savoir si le modèle énergétique du masquage, à partir de rapports signal sur bruit, est toujours applicable.

3.2 Stimuli

La mesure de seuils de détection de trois sons purs (958 Hz, 1765 Hz, 2824 Hz) dans un bruit de berline essence en 4^e (voir le spectre présenté figure 3), à 70 km/h (3000 tr/min) a été réalisée. Le niveau du masque était fixé à 55 dB SL, par une mesure préalable du seuil absolu du bruit.

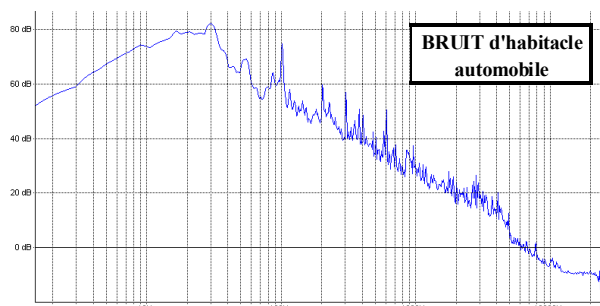


Figure 3 : Spectre du bruit d'habitacle automobile, utilisé lors de l'expérience 3 (fréquence d'échantillonnage : 48828Hz, nombre de points de la FFT : 32768).

3.3 Procédure et mode de reproduction

L'écoute était effectuée en diotique via le casque Sennheiser HD650 étalonné au tympan. La procédure était identique à celle des expériences précédentes.

3.4 Auditeurs

Douze auditeurs de 22 à 52 ans (la moyenne d'âge était de 29 ans), ne présentant aucune déficience auditive, ont participé aux mesures des seuils absolus et des différents seuils masqués. Seuls cinq d'entre eux avaient participé aux deux premières expériences.

3.5 Résultats et discussion

La figure 4 présente l'évolution du facteur K (différence en dB entre le seuil masqué et le niveau de bruit masquant calculé dans le filtre de type Roex centré sur la fréquence du signal). Un test de conformité (comparaison de la moyenne d'une population normale à une valeur de référence μ_0) a été effectué. L'hypothèse de conformité est rejetée avec un risque d'erreur pratiquement nul ($p < 0.05$) : il y a une élévation significative du facteur K due au contenu spectral du masque.

L'élévation des seuils et donc du facteur K (par rapport aux expériences précédentes) est-elle due à du masquage énergétique provoqué par la présence de raies marquées dans le bruit automobile ? Cette élévation est-elle due à un autre type de masquage (informationnel par exemple) ?

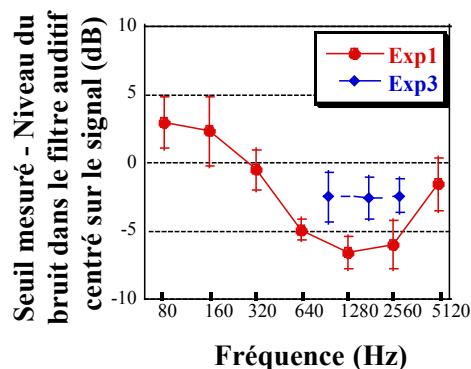


Figure 4 : Variation du facteur K pour 958 Hz, 1765 Hz et 2824 Hz dans un bruit de voiture comparé aux résultats de l'Exp1 (voiture enregistrée en soufflerie), sur douze auditeurs.

3.6 Tone in Masker Function

Afin d'interpréter les résultats obtenus, nous avons adapté l'équation (1) en ne calculant non plus des rapports signal sur bruit à la sortie des filtres auditifs mais des rapports de pattern d'excitation. D'après Moore [2], la courbe d'excitation d'un son pur de fréquence f est déduite à partir des filtres auditifs de fréquences voisines.

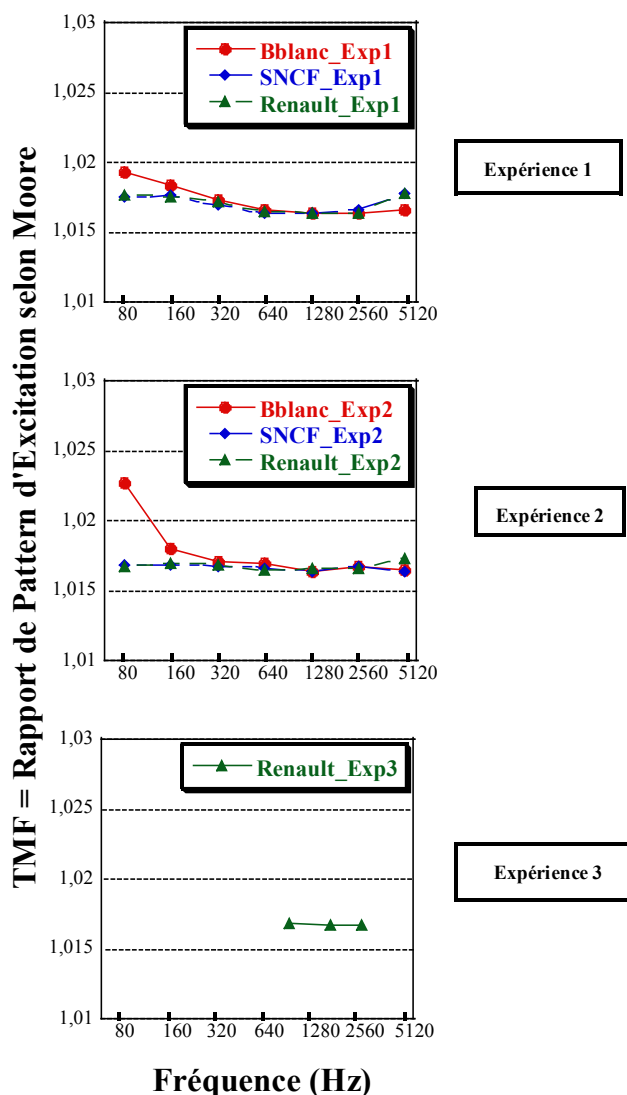


Figure 5 : Variation du TMF (rapport de pattern d'excitation) pour les différentes conditions expérimentales.

A partir de ces diagrammes, nous avons établi un critère, le TMF (Tone in Masker Function), moyenne sur toutes les largeurs de bande ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) du rapport du pattern d'excitation du masque en présence du signal au seuil sur le pattern d'excitation du masque (équation 2) :

$$TMF = \frac{1}{nbERB} \sum_{nbERB} \frac{pattern\ d'excitation(Signal\ au\ seuil + Masque)}{pattern\ d'excitation(Masque)} \quad (2)$$

Sur toutes les conditions expérimentales, le TMF, tracé sur la figure 5, varie peu autour de sa valeur moyenne de 1.017.

L'élévation des seuils masqués mesurée au cours de l'expérience 3 semble être explicable par les modèles de masquage énergétique puisque les valeurs du TMF pour ces fréquences sont égales à celles obtenues pour les expériences 1 et 2.

Pour voir l'influence de la valeur du seuil sur le TMF nous avons fait varier celui-ci de plus ou moins 10 dB SPL autour de la valeur mesurée pour les trois fréquences testées lors de l'expérience 3. Les valeurs du TMF évoluent peu en fonction du niveau. Les seuils calculés à l'aide de ces courbes, correspondant à un TMF de 1.017, sont très proches des seuils mesurés (voir figure 6).

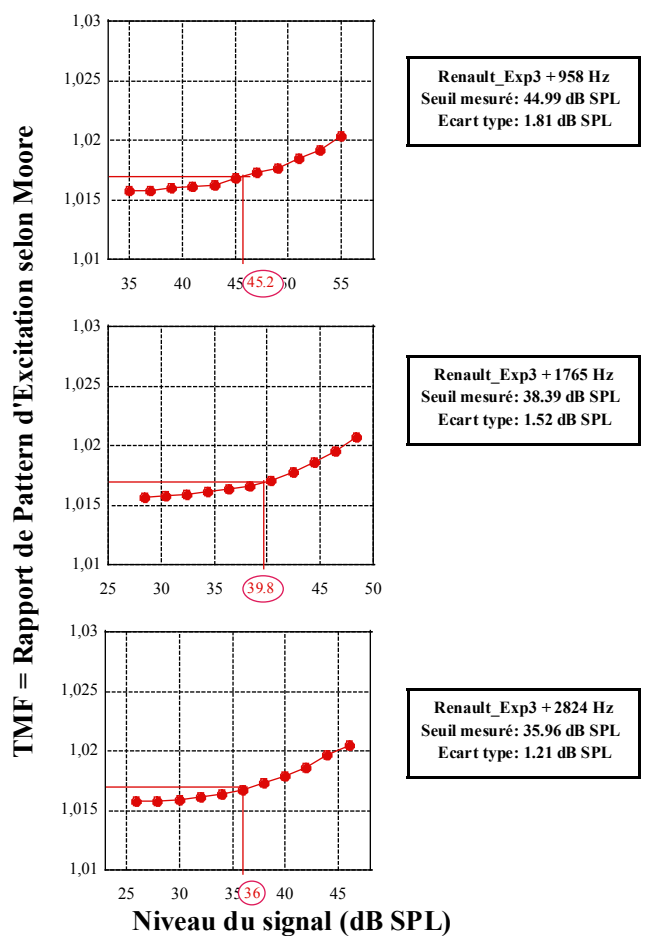


Figure 6 : Evolution du TMF autour du seuil mesuré pour chaque fréquences testée lors de l'expérience 3.

Pour confirmer ces résultats, le TMF a été testé sur des sons indépendant de ces campagnes de mesures (voir Table 1).

Peu de critères physiques sont actuellement à la disposition des industriels comme réel outil de prédiction de l'audibilité de bruits émergents. Les premiers résultats concernant le TMF semblent encourageants.

Masque	Signal	TMF
TGV à 300km/h	4000 Hz	1.0176
Berline essence à 90km/h	1108 Hz	1.018
Berline essence à 90km/h	2216 Hz	1.0172

Table 1 : Valeurs de TMF pour des sons indépendants des campagnes de mesures précédentes.

4 Conclusion et perspectives

Ce travail de recherche sur la détection d'émergences au sein de bruits large bande a permis d'étudier non seulement d'un point de vue fondamental les modèles de masquage mais aussi de définir d'un point de vue appliqué des critères afin de visualiser ce que l'on entend.

Des choix importants ont dû être effectués (sons stationnaires, signaux en phase, etc.), l'idée étant d'avancer pas à pas, en confrontant systématiquement des résultats du domaine fondamental et des situations appliquées.

L'écoute au casque étalonné au tympan a été validée, notamment en basses fréquences, par confrontation à une écoute en champ libre, face à une enceinte monophonique en chambre sourde. Puis, en mesurant les seuils masqués de sons purs dans un bruit d'habitable automobile (présentant des raies émergentes), nous avons défini un critère adapté à la détection, à partir des pattern d'excitation, le TMF.

Il sera intéressant de poursuivre cette validation sur un plus grand nombre de conditions expérimentales, en étudiant notamment la détection de signaux multifréquentiels, équi détectables ou présentant des différences de niveau entre composantes.

Références

- [1] Fletcher H, Auditory Patterns, *Rev. Mod. Phys.* 12, 47-65 (1940).
- [2] Moore B.C.J., *An Introduction to the Psychology of Hearing*, 5th ed. Academic London (2003).
- [3] Watson, "Some Comments on Informational Masking", *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 502-512 (2005).
- [4] Fastl H., "The psychoacoustics of sound-quality evaluation", *Acta Acustica united with Acustica*, 83, 754-763 (1997).
- [5] Rabau G. et Meunier S., "L'étalonnage des casques d'écoute", *Note interne LMA* (2006).
- [6] Fidell S. et al, "Effective masking bandwidths at low frequencies", *J. Acoust. Soc. Am.* 73 (2), 628-638 (1983).

- [7] Houtsma A.J.M., "Hawkins and Stevens revisited insert earphones (L)", *J. Acoust. Soc. Am.* 115 (3), 967-970 (2004).
- [8] Houtsma A.J.M., "A note on pure-tone masking by broadband noise under free-field and insert-phone conditions (L)", *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (2), 490-491 (2005).
- [9] Unoki M. et al, "Comparison of the roex and gammachirp filters as representations of the auditory filter", *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (3), 1474-1492 (2006).
- [10] Glasberg B.R. et Moore B.C.J., "Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise", *J. Acoust. Soc. Am.* 108 (5), 2318-2328 (2000).
- [11] Neff D. L. et Green D. M., "Masking produced by spectral uncertainty with multicomponent maskers", *Perception and Psychophysics*, 41 (5), 409-415 (1987).
- [12] Oh E. L. et Lutfi R. A., "Informational masking by everyday sounds", *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (6), 3521-3528 (1999).
- [13] Glasberg B.R. et Moore B.C.J., "Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise", *J. Acoust. Soc. Am.* 108 (5), 2318-2328 (2000).
- [14] Durlach N. I. et al., "Informational masking: counteracting the effects of stimulus uncertainty by decreasing target-masker similarity", *J. Acoust. Soc. Am.* 114 (1), 368-379 (2003).