



Mesures de seuils de détection de signaux d’alerte ferroviaires en présence de bruit de fond

G. Rabau^a, J. Chatron^a et J.-P. Gettliffe^b

^aLMA-CNRS, UPR 7051, Aix-Marseille Univ, Centrale Marseille, 31 chemin Joseph-Aiguier, F-13402 Marseille Cedex 20, France

^bAgence d’Essai Ferroviaire, 21, avenue du Président Allende, 94407 Vitry Sur Seine, France
rabau@lma.cnrs-mrs.fr

La question de la perception de signaux d'alarme dans le cadre de port de Protection Individuelle Contre le Bruit (PICB) est cruciale dans certains domaines. Il faut pouvoir protéger les personnes contre le bruit au poste de travail tout en permettant une bonne détection des signaux d'alarme et d'alertes. Le cas précis étudié ici concerne la protection des agents de la SNCF contre le bruit à leur poste de travail. La question est de savoir si le port de PICB altère la bonne perception des signaux d'alarme et d'alerte. Pour étudier cette question nous avons mis au point un protocole de mesure de détection de différents signaux d'alerte dans 3 situations sonores (une situation sonore est un triplé constitué d'un PICB, d'un bruit de fond masquant et d'un signal d'alarme). Nous avons tracé les fonctions psychométriques pour chaque auditeur autour de la valeur "100 % de réponses positives". Pour les 3 situations sonores testées les alarmes restent audibles par tous les auditeurs : il y a une différence d'au minimum 6 dB(A), favorable à la détection, entre les seuils mesurés et les niveaux réels des alarmes. Ces résultats seront analysés et discutés dans le cadre plus général de la détection de signaux complexes dans du bruit.

1 Introduction

La SNCF a entamé la démarche d'étendre la protection de l'audition, par PICB, de ses agents qui peuvent être soumis parallèlement au risque ferroviaire. Cette démarche est orientée vers deux catégories de risques ferroviaires et trois métiers :

- risque de heurt par un train : agents de maintenance des voies ferrées et agents des gares,
- aptitude sécurité dans le cadre de la conduite : conducteurs des trains.

Pour mener à bien ces recherches, elle a fait appel au CNRS pour développer une méthode industrielle de mesure des seuils de perception de signaux d'alarme dans le bruit ambiant.

Lors du test proposé, la personne mise en situation devra dire si elle perçoit ou non le signal d'alarme dans le bruit de fond. Pour pouvoir se rapprocher de la valeur "100 % de réponses positives", seule valeur qui puisse maintenir un haut niveau de sécurité, nous devons définir la fonction psychométrique de chaque auditeur. Cette "mesure" peut s'avérer très longue mais pas forcément obligatoire sur l'ensemble des auditeurs si, par exemple, cette fonction psychométrique varie peu d'un individu à l'autre pour chacun des cas traités.

Dans un premier temps une série de tests a été réalisée au LMA avec les signaux de la SNCF sur quelques auditeurs afin de choisir et définir la procédure la mieux adaptée à cette étude (et nous permettre de déterminer si les différences inter-individuelles sont, ou non, significatives).

La procédure expérimentale "définitive" étant choisie, nous avons développé un programme pour l'exécution automatique des tests dans un local spécialement aménagé par la SNCF selon notre cahier des charges. Parmi les contraintes prises en compte pour la mise au point des tests dans ce local de l'AEF (Agence d'Essais Ferroviaires), on peut noter les points suivants :

- tests en champ libre monophonique (les PICB portés par les agents SNCF imposent le champ libre). Le bruit et le signal d'alarme seront diffusés par une source unique,
- tous les signaux proviennent d'une base de données SNCF.

Les auditeurs ont été sélectionnés par la SNCF (établissements de production aidés de la médecine du travail). Avant le début des tests de mesure de seuil, la sensibilité auditive (équivalente à un audiogramme) est réalisée sur place afin de nous assurer que chaque auditeur est normo-entendant. Les signaux ont été fournis par la SNCF (bruits de fond et signaux d'alerte) dès le début de

l'étude. Les résultats obtenus à l'issue des tests ont été analysés et comparés avec des calculs réalisés à l'aide d'un logiciel (développé au LMA) de prédiction d'audibilité d'un signal multi-émergences masqué par un bruit quelconque.

2 Choix et constitution des situations sonores

Les signaux ont été enregistrés (ou récupérés sur d'anciennes campagnes de mesure) par la SNCF afin de constituer la base de données audio à partir de laquelle ont été élaborés nos signaux pour les tests psychoacoustiques.

Après écoute et analyse de ces signaux nous avons choisis 3 situations à étudier représentatives pour la SNCF. Une situation est un triplet constitué d'un bruit de fond masquant, d'un signal d'alarme et d'un PICB.

Pour les Conducteurs

Situation 1 :

Bruit de Fond : locomotive type BB 15000 à 160 km/h d'un niveau de 80.0 dB(A)

Alarmes : "VACMA" relâchement

PICB : Bouchon Moulé Individuel (avec filtre RC15)

Situation 2 :

Bruit de Fond : locomotive type BB 15000 à 160 km/h d'un niveau de 80.0 dB(A)

Alarmes : "VACMA" Appui

PICB : casque "Clarity"

Pour l'infrastructure (INFRA)

Situation 3 :

Bruit de Fond : chantier « Bourrage » seul d'un niveau de 101.6 dB(A)

Alarmes : Trompe Grande Puissance type St Dizier

PICB : casque "MSA"

3 Choix de la méthode

Afin d'approcher la valeur de 100 % de réponses positives à la question : "Ai-je entendu le signal d'alarme émerger du son que je viens d'écouter ?", nous devons mesurer la(les) fonction(s) psychométrique(s) représentative(s) de l'ensemble de la population à tester dans le but d'encadrer les niveaux significatifs de l'alarme. L'idéal, si les niveaux ont été bien choisis, est que chaque

auditeur réponde au moins une fois "oui" et au moins une fois "non" lors d'une session de tests. Dans la mesure où l'on cherche à atteindre la valeur 100% de réponses positives, une plus grande proportion de réponses "oui" est préférable. La meilleure méthode sera celle pour laquelle le compromis, entre précision du résultat, rapidité et facilité de mise en œuvre par rapport à la population visée pour les tests, sera optimal.

3.1 Choix du test

Parmi toutes les méthodes de la psychophysique, trois méthodes peuvent répondre à notre besoin :

- la méthode adaptative "X down Y up",
- la méthode du "tracking de Békésy" en présence d'un bruit de fond,
- la méthode du stimulus constant.

Après différents essais en laboratoire, nous avons choisi la méthode du stimulus constant. Rappelons que cette méthode consiste à présenter aléatoirement aux auditeurs des sons, dans notre cas un bruit de fond d'un niveau fixé par la SNCF, auquel est ajouté un signal d'alarme de niveau variable, par exemple entre, -10 dB et +10 dB SPL autour du seuil à mesurer. Cela suppose donc que l'on effectue des "pré-tests" pour déterminer approximativement la valeur du seuil et ce pour chaque situation sonore. Chaque niveau doit être présenté un même nombre de fois. S'il y a 10 niveaux d'intensité différente, on peut présenter chacun de ces niveaux 10 fois, soit un total de 100 essais. Ensuite on calcule la proportion de réponses "oui, j'entends l'alarme" vs "non, je n'entends pas l'alarme" pour chaque niveau. En reportant sur un graphique le pourcentage de réponse "oui, j'entends l'alarme" en fonction du niveau en dB de l'alarme présentée, on obtient la fonction psychométrique des auditeurs. De la courbe psychométrique, on peut déduire par extrapolation toutes les valeurs de seuil entre 0 et 100 % de réponses correctes.

Cette méthode présente deux avantages essentiels pour cette étude. Premièrement on obtient directement la fonction psychométrique de chacun des auditeurs. Deuxièmement la mise en œuvre pour les expérimentateurs et les auditeurs est simple (question simple "j'entends, j'entends pas" !). Si le seuil approximatif a été correctement encadré lors des pré-tests, une dizaine de points permettront de tracer la fonction psychométrique de chaque auditeur. Donc on présentera 10 niveaux différents de l'alarme pour chaque situation sonore. En jouant 10 fois chacun de ces sons (soit 100 présentations au total), en terme statistique, on s'assure que la courbe tracée est correcte. Pour des sons de 1s, en prenant en compte le temps de réponse de chaque auditeur (de l'ordre de 2s) cela nous conduit à un test d'une durée d'environ 5 minutes, ce qui tout à fait acceptable.

Ce qui intéresse la SNCF c'est la valeur du seuil proche de 100 % de réponses positives. Les niveaux de présentation des alarmes doivent donc être choisis pour se rapprocher de cette valeur. Après de multiples essais sur 15 auditeurs du LMA nous avons déterminé les niveaux et le pas entre niveau pour chaque situation.

Nous avons vérifié que ces niveaux sont valables pour tout type d'auditeur normo-entendant présentant cependant des capacités auditives différentes. Il y a très peu de variabilité interindividuelle pour ces mesures de seuil.

La moyenne des fonctions psychométriques de tous les auditeurs nous donnera une valeur bien représentative du

niveau à partir duquel chaque alarme est audible pour les situations testées et dans les conditions du test.

3.2 Déroulement des tests

Choix des niveaux :

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment voici le choix des niveaux de présentations pour les alarmes :

- ✓ Situation Un : 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84 dB SPL
Soit 68.6, 70.6, 71.6, 72.6, 73.6, 74.6, 75.6, 76.6, 77.6, 79.6 dB(A) (un bruit de fond de 80 dB(A))
- ✓ Situation Deux : 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71 dB SPL
Soit 54.8, 56.8, 57.8, 58.8, 59.8, 60.8, 61.8, 62.8, 63.8, 65.8 dB(A) (un bruit de fond de 80 dB(A))
- ✓ Situation Trois : 88.5, 90.5, 91.5, 92.5, 93.5, 94.5, 95.5, 96.5, 97.5, 99.5 dB SPL
Dans ce cas les niveaux sont égaux en dB SPL et dB(A). Le bruit de fond est de 101.6 dB(A).

Pré-écoute des signaux:

Avant de mesurer son seuil et pour se familiariser avec les sons du test, l'auditeur peut écouter une séquence test autant de fois qu'il le désire. Cette séquence est composée du bruit de fond de la situation, d'un court silence, puis du bruit de fond et de son alarme associée, l'alarme étant diffusée à un niveau suffisant pour être facilement distinguée du bruit de fond.

Le pré-test :

Le pré-test sert à valider, sur chaque auditeur, le choix des niveaux d'alarme. Il s'agit d'une présentation unique de chacun des 10 niveaux d'alarme choisis masqués par le bruit de fond associé. Les 10 sons d'une durée d'une seconde sont présentés successivement, l'auditeur répond si oui ou non il a entendu l'alarme dans le bruit de fond.

Dans de ce pré-test, nous avons inséré un son qui ne contient pas d'alarme. Nous vérifions ainsi que l'auditeur répond bien "non je n'ai pas entendu le signal d'alarme" pour le son qui en est dépourvu et que parmi les neuf autres signaux il réponde au moins un "oui" et au moins un "non" ; auquel cas le seuil recherché est idéalement encadré. Ce test est très important car il sert à la fois d'apprentissage pour l'auditeur et de vérification pour l'expérimentateur sur la fiabilité des réponses des auditeurs. Durée du test : environ 3 minutes.

Le test de mesure de seuil :

Le test de mesure de seuil est exécuté sur les 10 niveaux d'alarme ci-dessus répétés 10 fois (100 présentations au final – durée du test environ 10 minutes).

4 Description de la salle de test

L'Agence d'Etude Ferroviaire (AEF) dispose d'une salle réverbérante avec un local attenant. Il a été possible de transformer ces pièces en salle de test. Nous avons fourni à la SNCF un cahier des charges indicatif pour la réalisation de cette salle de test. Ce cahier des charges était le suivant :
- tests en champ libre monophonique (les PICB portés par les agents SNCF imposent le champ libre),

- le bruit et le signal d'alarme seront diffusés par une source unique,
- les dimensions minimales utiles doivent être de 5 m x 3 m (L x l) avec une hauteur de plafond de 2,5 m,
- installation de laine de roche sur tous les murs et au plafond avec un plénum (espace) entre ce revêtement et les murs,
- le sol est traité par une simple moquette épaisse
- rendre les murs du local non parallèles et le plafond incliné si possible,
- installation d'une porte type sas acoustique entre la salle de test et le local de mesure.

NB : les auditeurs (normo-entendant et/ou déficients auditif, les deux avec leur audiogramme correspondant de moins de 6 mois) seront sélectionnés par la SNCF-médecine du travail.

5 Résultats obtenus à l'issue des mesures effectuées à la SNCF

Dans les locaux de l'AEF, 2 tests psychoacoustiques ont été réalisés sur chaque auditeur.

Il s'agissait :

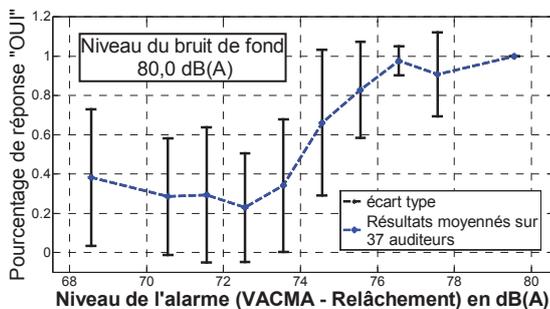
- d'un audiogramme (méthode de Békésy) pour vérifier les capacités auditives des auditeurs
- de la mesure des seuils d'audition pour les alarmes dans les 3 situations. Seules les personnes ne possédant pas de PICB "Bouchons Moulés Individuels (BMI)" n'ont pas passé le test de la situation n°1.

Chaque auditeur a passé ces 2 tests dans la même journée dans un ordre aléatoire. Nous disposons ainsi pour chaque auditeur d'un audiogramme récent.

Sur une période de 2 semaines, 40 personnes ont passé le test de mesure de seuils de détection de signaux d'alerte en présence de bruit de fond pour la situation n°1, 51 personnes pour la situation n°2 et 50 pour la situation n°3.

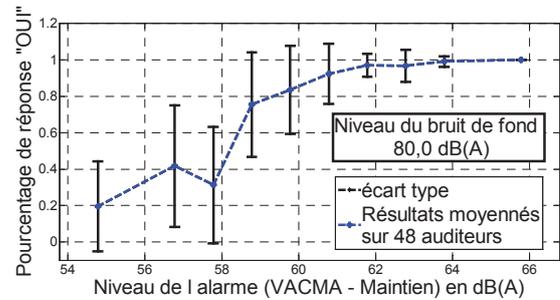
Tous les auditeurs testés sont des agents de la SNCF. Ils ont une connaissance des situations sonores entendues. Tous les audiogrammes des auditeurs étaient suffisamment bons pour qu'il n'ait pas d'influence sur les résultats des tests.

Pour chaque auditeur nous avons calculé la moyenne du nombre de réponse à la question "ai-je entendu l'alarme" pour chaque niveau d'alarme testé. Enfin, pour chacune des situations sonores nous avons calculé et tracé la moyenne et l'écart type des réponses individuelles. Ces résultats sont présentés sur les courbes 1 à 3 ci-dessous.



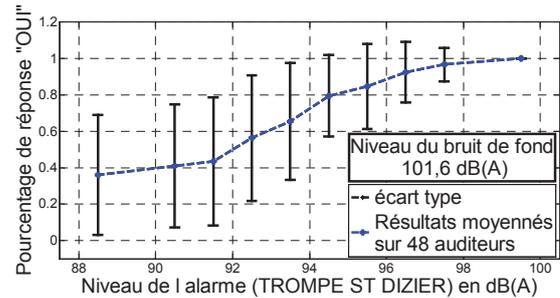
Courbe 1 : Situation Un : Bruit de fond = BB15000 à 160 km/h – Alarme = VACMA relâchement – PICB = BMI

Niveau alarme « réel » = 85,5 dB(A) et seuil proche de 79,5 dB(A) (écart de 6 dB(A))



Courbe 2 : Situation Deux : Bruit de Fond = BB15000 à 160 km/h – Alarme = VACMA Appui – PICB = Casque Clarity

Niveau alarme réel = 71,8 dB(A) et seuil proche de 65,8 dB(A) (écart de 6 dB(A))



Courbe 3 : Situation Trois : Bruit de Fond = Chantier « Bourrage » - Alarme = Trompe St Dizier – PICB = Casque MSA

N alarme = 116,5 dB(A) et seuil proche de 99,5 dB(A) (écart de 17 dB(A))

Pour les 3 situations sonores, les niveaux testés ont été bien choisis puisqu'ils nous permettent d'atteindre les 100 % de réponses correctes "seule valeur qui puisse maintenir un haut niveau de sécurité". Par opposition il n'y a pas de valeurs proches de 0 % de réponse positive.

Dans chacune des situations sonores, le dernier niveau testé est entendu 100 % des fois par tous les auditeurs (écart type nul). Donc en prenant en compte ces résultats comme étant une valeur maximale du seuil recherché on obtient :

- pour la situation n°1, un seuil $\leq 79,5$ dB(A) soit 6 dB(A) en dessous du niveau réel de l'alarme (85,5 dB(A))
- pour la situation n°2, un seuil $\leq 65,8$ dB(A) soit 6 dB(A) en dessous du niveau réel de l'alarme (71,8 dB(A))
- pour la situation n°3, un seuil $\leq 99,5$ dB(A) soit 17 dB(A) en dessous du niveau réel de l'alarme (116,5 dB(A)).

Les écarts types sont de plus en plus grands lorsqu'on se rapproche des petites valeurs de réponses positives (0% de réponses positives, partie gauche des courbes en abscisse). Cela montre que pour une même valeur de seuil la manière de l'approcher par les auditeurs est différente. Autrement dit les allures des fonctions psychométriques des auditeurs ne sont pas comparables. Cela ne nous a pas gêné puisque la valeur du seuil recherchée (100 % de réponses positives) est la même pour tous les auditeurs (écart type nul).

Pour les 3 situations étudiées, en conditions de laboratoire, tous les auditeurs ont entendu les alarmes. Les niveaux du seuil de détection de l'alarme dans le bruit sont toujours inférieurs aux niveaux des alarmes fournis par la SNCF. Cet écart est au minimum de 6 dB(A).

6 Principe et résultats de prédiction d'audibilité de signaux présentant des émergences fréquentielles marquées

Lors d'une précédente étude [1] nous avons mis au point des outils prédictifs pour le calcul du seuil de détection masqué d'un signal mono ou multifréquentiel.

A cette occasion nous avons conçu un logiciel qui permet de calculer la différence entre le diagramme d'excitation d'un signal masquant seul et le diagramme d'excitation du signal masquant et du signal masqué (DDE = Différence du Diagramme d'Excitation). Dans le cas d'un signal monofréquentiel, un modèle basé sur le calcul du diagramme d'excitation selon Moore a été utilisé. Nous calculons ainsi la différence entre le diagramme d'excitation du masque seul et le diagramme d'excitation du masque et du signal.

Dans le cas d'un signal multifréquentiel [2] un modèle statistique, basé sur une extension du calcul du d' (l'indice de détection dans la théorie de la détection [3]), nous permet de calculer le seuil de détection d'un tel signal masqué par un bruit quelconque. Ce signal étant caractérisé par n raies fréquentielles de niveaux différents situées chacune dans des filtres auditifs distincts. Pour que ce modèle soit valide il faut que le masque ne contienne pas de raies (ou fortement atténuées) aux mêmes endroits que celles constituant le signal. Nous avons ainsi un modèle global capable de prédire l'audibilité de signaux (sons purs ou combinaison de sinusoides avec différence de niveau entre composantes) dans des bruits masquants quelconques large bande.

Lorsque l'alarme répond aux critères d'utilisation du logiciel (en particulier quand le signal présente des émergences fréquentielles marquées et distinctes) nous allons tester s'il est possible de prédire l'audibilité des alarmes en situation.

6.1 Présentation du logiciel : Différence de Diagramme d'Excitation (DDE)

Le modèle programmé est perceptif (basé sur le calcul du diagramme d'excitation selon Moore [4]). Il intègre les différentes modélisations mises en évidence au cours de l'étude [1]: filtres auditifs de type *Roex*, différence de diagramme d'excitation (DDE), modèle de détection de signaux multifréquentiels non équidéfectables.

L'entrée de ce logiciel est un enregistrement de x secondes. La première étape consiste à déterminer le spectre de l'enregistrement.

Ensuite, dans le cas d'émergence monofréquentielle, pour chacune des composantes qualifiées par l'opérateur comme telle (tonalité), un nouveau masque est calculé de façon à faire disparaître la raie. On détermine ainsi ce que serait le masque en l'absence de la composante fréquentielle. A partir des diagrammes d'excitation du signal et du masque, le critère de détection basé sur la Différence de Diagramme d'Excitation DDE est appliqué. Ainsi, un nouveau spectre est calculé, faisant apparaître les composantes audibles.

Enfin, dans le cas d'un signal multifréquentiel, l'utilisateur choisit sur le spectre les raies à considérer pour former un unique signal à n composantes. Le calcul de l'audibilité du signal se fait à partir du modèle non équidéfectable basé sur le critère monofréquentiel (différence de diagramme d'excitation). La sortie du

programme donne l'audibilité ou non du signal multifréquentiel.

L'organisation du modèle est présentée schématiquement sur la figure 1.

Déroulement du programme :

Etape 0 – Enregistrement du « son » = signal + masque

On fournit au programme un son (en format wav) avec une fréquence d'échantillonnage donnée.

Etape 1 – Analyse du « son » = signal + masque

On fait une analyse fréquentielle en bandes fines, de façon à voir le maximum de « raies »

Etape 2 – Identification du signal et du masque

L'utilisateur, expert, ayant une connaissance à priori du contexte acoustique, détermine le masque (bruit de fond sans le signal à détecter) et les composantes mono ou multifréquentielles constituant le signal.

Etape 3- Cas où le signal est un son pur

Le masque et le signal mono fréquentiel étant choisis et définis, on applique le calcul du DDE.

Etape 4- Cas où le signal est multifréquentiel & dont les composantes sont « suffisamment » éloignées en fréquence (par exemple, dans des filtres auditifs différents)

- A) Le masque et le signal multifréquentiel étant choisis et définis on calcule la DDE de chaque composante constituant le signal multifréquentiel.
- B) Comparaison par rapport aux valeurs mesurées lors de l'étude []
- C) Détermination des seuils masqués individuels, pour chaque composante constituant le signal multifréquentiel
- D) A partir des seuils individuels, calcul de la différence de niveau entre chaque composante
- E) Choix de la composante « de référence »
- F) Calcul du seuil multifréquentiel grâce à la formule de l'amélioration à la détection : **Modèle de sommation statistique pour signaux non équidéfectables**

A la fin du programme il est indiqué si le signal est audible ou non dans le signal complet de départ.

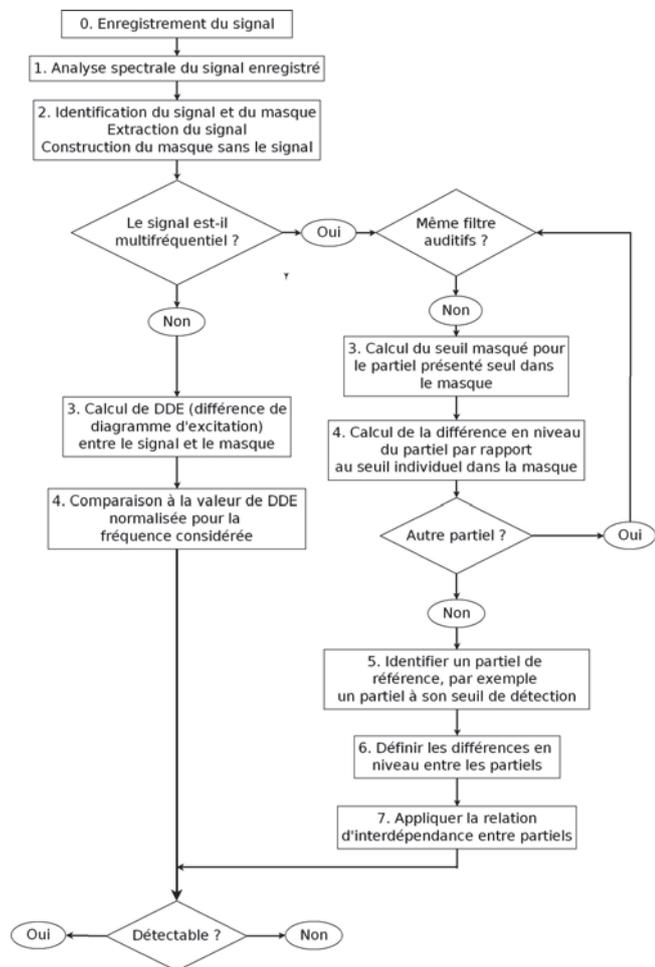


Figure 1 : Diagramme schématisant l'organisation du modèle perceptif pour un signal de type son pur ou multifréquentiel dans un bruit large bande.

Il y a donc deux programmes distincts gérant, pour le premier, une seule émergence fréquentielle (calcul du DDE = Différence de Diagramme d'Excitation) et pour le second plusieurs émergences fréquentielles (application du critère issu de la théorie de la détection).

5.2 Résultats issus du logiciel DDE multifréquentiel

Nous avons appliqué le calcul prédictif d'audibilité d'émergences fréquentielles aux situations 1 et 2. Nous avons tenu compte du port des PICB en filtrant les signaux avec des filtres représentatifs de ceux apportés par les protecteurs auditifs. Dans les deux cas, pour les niveaux d'alarme réels, elles ont été prédites comme audibles. Ces résultats sont donc conformes à ceux obtenus avec les tests perceptifs. Ce résultat est très encourageant. En effet ce logiciel pourrait être un outil de prédiction efficace pour l'audibilité des alarmes dans un bruit de fond.

Des essais plus nombreux et systématiques sont encore indispensables pour conclure dans ce sens et éviter ainsi ou au moins réduire les tests psychoacoustiques actuellement nécessaires.

5 Conclusion et perspectives

Pour les 3 situations sonores testées les alarmes, à leur niveau réel, sont audibles. Il y a une différence d'au

minimum 6 dB(A), favorable à la détection, entre les seuils mesurés et les niveaux réels des alarmes. Ces résultats, pour l'instant, ne sont valables que pour les 3 situations testées. Pour chaque nouvelle situation à tester il faudra impérativement respecter la marche à suivre et le protocole depuis la prise de son jusqu'à la restitution dans la salle de l'AEF.

Ces tests ont été réalisés en conditions de laboratoire et non sur le terrain (les sons étaient écoutés dans une salle aménagée spécialement, les auditeurs étaient des volontaires plutôt sensibilisés à la problématique étudiée, ils connaissaient les situations sonores et étaient concentrés sur la tâche à effectuer).

Pour compléter ces résultats nous avons utilisé un logiciel que nous avons développé lors d'une précédente étude pour la SNCF [1]. Ce logiciel permet de calculer si des signaux présentant des pics fréquentiels marqués (l'alarme dans notre cas) sont audibles en présence d'un bruit de fond masquant quelconque. Nous avons appliqué ce calcul aux situations 1 et 2. Dans les 2 cas, pour les niveaux réels fournis par la SNCF, les alarmes ont été jugées audibles. Ces premiers résultats sont encourageants et montrent que ce logiciel pourrait vraisemblablement être utilisé pour prédire l'audibilité des alarmes dans différentes situations sonores.

Maintenant que la SNCF dispose d'une méthode éprouvée, il s'agit de développer cette méthode sur l'ensemble du projet :

- 160 agents de production, dans les métiers pris en compte, feront les tests de détection d'alarme dans le bruit,
- 49 situations acoustiques différentes dites de référence ont été définies en termes de criticité vis-à-vis du rapport signal/bruit,
- un ou deux PICB ont été sélectionnés,
- l'ensemble des combinaisons conduit à 120 cas étudiés.

Les courbes psychométriques ainsi obtenues avec et sans PICB permettront de qualifier l'impact du port des PICB sélectionnés.

Ces tests de détection sont complétés par :

- des tests menés en situation de travail pour valider les PICB choisis avec les futurs porteurs (confort, absence de mise en danger, etc.),
- des tests sur l'intelligibilité des mots ferroviaires avec et sans PICB.

D'autres méthodes de simulation numérique sont aussi testées pour appréhender leurs limites et éviter, dans le futur, des tests systématiques en chambre d'écoute.

Références

- [1] DUBOIS F., Détection de signaux émergents au sein d'habitacles : Mesures et Modélisation, Thèse de Doctorat, Université d'Aix Marseille (2010).
- [2] BACON S. P., GRIMAULT N. et LEE J., Spectral integration in bands of modulated or unmodulated noise, Journal of Acoustical Society of America, **112** (1), 219-226 (2002).
- [3] GREEN D.M. et SWETS J.A., Signal Detection Theory and Psychophysics. New York: Wiley (1966)
- [4] MOORE B.C.J., GLASBERG B.R. et BAER, A model for predicting of threshold, loudness and partial

loudness, Journal of Audio Engineering Society, **45 (4)**,
204-240 (1997)