
Comment traduire le degré d'urgence D'une alarme sonore non vocale ?

**A. Guillaume,
L. Pellieux, V. Chastres**
Département de Sciences Cognitives
IMASSA BP 73
91223 BRETIGNY sur ORGE Cedex
aguillaume@imassa.fr

et **C. Drake**
Laboratoire de Psychologie Expérimentale
Institut de Psychologie Université Paris V
71, avenue Edouard Vaillant
92774 BOULOGNE-BILLANCOURT
drake@idf.ext.jussieu.fr

RESUME

Selon Edworthy et Hellier, il est possible de classer des signaux sonores en fonction de la perception de leur degré d'urgence en se basant sur leurs caractéristiques acoustiques. Ces résultats ne sont pas retrouvés lorsque les auditeurs sont sous une forte charge de travail. Pour mieux comprendre les processus cognitifs impliqués, deux expérimentations sont réalisées : l'une avec des signaux construits selon les indications d'Edworthy, l'autre avec des alarmes réelles enregistrées sur les avions militaires. Un premier groupe d'auditeurs détermine pour chaque paire de séquences quel signal est le plus urgent et quantifie la différence. Un deuxième groupe quantifie uniquement la différence perçue entre les séquences sans notion d'urgence. Les résultats obtenus par analyse multidimensionnelle montrent que, pour les signaux construits, la distribution spatiale des séquences est très proche dans les deux groupes ce qui n'est pas le cas pour les signaux enregistrés. Ces observations nous amènent à considérer des processus cognitifs complexes faisant appel en particulier au vécu du sujet.

MOTS-CLES

Perception auditive-alarme sonore-degré d'urgence-caractéristiques acoustiques-processus cognitifs

1 INTRODUCTION

Le concept d'alarme ne peut se concevoir en dehors de sa justification et de son environnement sonore. Ainsi une alarme anti-effraction dans une maison peut être excessivement forte et désagréable puisque le but de cette alarme est de provoquer la fuite. Dans le milieu aéronautique, lors de la survenue d'un dysfonctionnement, l'alarme doit avoir un effet distracteur par rapport à la tâche principale afin d'attirer l'attention du pilote sans générer, cependant, de trop fortes perturbations et, de plus, constituer une source d'informations pertinentes. Deux types d'informations peuvent être transmises :

- une indication sur la gravité du dysfonctionnement constaté qui pourrait être traduite par des variations des caractéristiques de l'alarme modulant la perception du degré de l'urgence du pilote.
- une indication sur la cause originelle de l'alarme grâce à une iconographie sonore adaptée.

Lorsqu'une alarme sonore est adaptée, elle augmente la probabilité d'une réaction efficace de l'opérateur aux conditions d'urgence et diminue le temps de réaction. Cependant dans de nombreux cas le degré de l'urgence perçue d'une alarme n'est pas adapté au degré d'urgence réel. Le principe "better safe than sorry" (Patterson, 1990) rend ces alarmes plutôt nuisibles qu'utiles. Les problèmes

constatés par Patterson, Edworthy, Shailer, Lower et Wheeler (1986), Sorkin, Kantowitz et Kantowitz (1988) trouvent leur origine dans le fait que les alarmes ont été ajoutées au fur et à mesure des besoins et n'ont pas fait l'objet d'une conception globale et réfléchie. Or en aéronautique, les alarmes sonores trouvent leur justification dans le fait que l'audition est un sens d'alerte primaire. Elles sont efficaces dans l'angle solide 4π stéradians de l'espace quelque soit la position de la tête et/ou la direction du regard. Elles présentent des avantages supplémentaires dans le domaine de l'aéronautique militaire :

- leur technologie ne réclame pas d'espace sur le tableau de bord déjà surchargé de l'aéronef.
- de façon encore plus spécifique, dans le domaine militaire, elles fournissent des entrées sensorielles moins altérées que les entrées visuelles lors de l'exposition des pilotes à l'hypoxie ou aux forces d'accélération +Gz (dirigées dans l'axe tête-siège).

Alors que la mise en place des alarmes était conjoncturelle et sans réflexion spécifique tant sur les caractéristiques propres de chaque alarme que sur leur intégration en tant que système d'alarmes, Patterson (1990) propose de résoudre les problèmes d'adaptation des alarmes avec leur fonction en concevant une alarme ayant une hiérarchie structurelle : l'unité de base est l'impulsion d'une durée de 100 à 300 ms. Cette impulsion est répétée plusieurs fois à différentes hauteurs et/ou à différentes intensités, selon différents tempi. L'ensemble composé de plusieurs impulsions successives constitue la bouffée sonore. Elle dure approximativement 2 s et ressemble à une mélodie atonale rythmique. La combinaison de ces bouffées forme l'alarme complète. Cette dernière ménage des silences entre les bouffées de façon à laisser à l'équipage la possibilité de communiquer et de réagir de façon adaptée.

En ce qui concerne le contenu spectral et l'intensité des alarmes, ils sont choisis de façon à éviter le masquage par les fréquences dominantes des cabines de pilotage. Pour obtenir une audition fiable de l'alarme (100% de détection), il est nécessaire qu'au moins 4 composants spectraux de l'alarme soient à 15 dB au-dessus du seuil d'audition de chacun d'eux (Patterson, 1990). Le contenu spectral et l'intensité des alarmes déterminés, il s'agit de rechercher s'il est possible de définir des alarmes dont les caractéristiques acoustiques peuvent être reliées à la perception d'un certain degré de l'urgence par les opérateurs. Edworthy, Loxley et Dennis (1991) et Hellier, Edworthy et Dennis (1993) cherchent alors à définir les caractéristiques physiques des séquences qui permettent de traduire différents degrés d'urgence. Ils proposent des séquences qui sont d'autant plus urgentes que la hauteur est élevée, le tempo rapide et les harmoniques irrégulières. Cependant, Burt, Bartolome, Burdette et Comstock (1995) remarquent que la perception du degré de l'urgence de séquences synthétisées selon les indications d'Edworthy et coll. (1991) et Hellier et coll. (1993) résiste très mal à une charge de travail importante et ils mettent en cause la conception de ces dernières.

Les buts de cette étude sont de confirmer les résultats d'Edworthy et Hellier par une analyse multidimensionnelle et d'essayer de comprendre les raisons pour lesquelles les critères permettant de définir le degré d'urgence ne restent pas pertinents lorsque l'auditeur est sous forte charge de travail. Pour cela, deux expériences sont menées en parallèle : l'une sur des signaux créés selon les indications de Hellier afin de traduire une perception de l'urgence croissante, l'autre sur des alarmes réelles enregistrées dans les aéronefs militaires.

2 PREMIERE EXPERIENCE

2.1. Méthodologie

La première expérience est réalisée dans le but de vérifier les résultats de Hellier et coll. (1993) par une méthode d'analyse multidimensionnelle. Les séquences créées par Hellier de façon à traduire une perception de l'urgence croissante sont synthétisées et sont présentées par paires. Les auditeurs doivent réaliser une tâche de choix forcé et une tâche de jugement de dissemblance concernant leur perception de l'urgence des séquences présentées. Cette étude est réalisée afin d'appréhender les principales dimensions qui sous-tendent la perception de degré d'urgence à partir de séquences synthétiques. L'intérêt de l'approche multidimensionnelle est que nous ne faisons aucune hypothèse a priori ni sur le nombre ni sur la nature des dimensions qui sous-tendent la représentation perceptive employée par les sujets pour comparer les stimuli.

Nos hypothèses sont que nous devrions retrouver un classement des séquences proche du classement théorique de Hellier lors de la tâche de choix forcé. L'analyse de proximité réalisée à partir des réponses obtenues dans la tâche de jugement de dissemblance devrait montrer que les facteurs influençant le plus la perception de l'urgence selon Hellier tels que la hauteur, le tempo, le degré d'harmonicité sont fortement corrélés avec la première dimension de l'espace décrivant les réponses des sujets. D'autres facteurs moins prégnants vis à vis de la perception de l'urgence tel que le contour de hauteur ou la durée de l'attaque ou de l'extinction pourraient aussi participer de façon non négligeable à la définition de ces dimensions.

Une seconde expérience est réalisée sur un autre groupe d'auditeurs avec les mêmes stimuli. Dans ce cas, la tâche est un jugement de dissemblance et les notions d'urgence ou d'alarme ne sont pas mentionnées. L'analyse de proximité permet de représenter l'espace perceptuel des auditeurs, à priori, fortement lié aux propriétés acoustiques des séquences. En comparant les espaces perceptuels obtenus avec les deux groupes, la part des processus liés aux propriétés acoustiques peut être distinguée de celle faisant intervenir des processus cognitifs de plus haut niveau. Les résultats attendus sont que l'analyse de proximité montre que les réponses des sujets sont liées aux caractéristiques acoustiques des séquences et que la notion de l'urgence est distribuée sur un plus grand nombre de dimensions de l'espace décrivant les réponses des auditeurs.

2.2. Les stimuli

Les stimuli sont les treize séquences définies par Hellier et coll. lors de la phase de synthèse des expérimentations. Ces signaux de 1 à 13 sont conçus suivant ses principes théoriques afin de provoquer chez les auditeurs une perception décroissante de l'urgence. Cet ordre définit le classement théorique des signaux. Ils ont été créés grâce au logiciel Quack. Les stimuli ont tous une durée d'environ deux secondes (moyenne de 2,105 secondes comprise entre 1,91 et 2,317 secondes) et ont été égalisés en sonie à l'issue de leur synthèse. Ces stimuli sont présentés par paires successivement dans le temps. Toutes les paires possibles sont réalisées ($((13 \times 12) / 2 = 78$ paires) et sont entendues dans les deux ordres possibles soient au total 156 paires de séquences ($[(13 \times 12) / 2] \times 2$).

2.3. Les sujets

Deux groupes expérimentaux composés de sujets différents ont participé chacun à une phase différente de cette expérimentation. Le premier groupe est composé de 23 auditeurs. Les sujets sont âgés de 34,6 ans en moyenne (23 ans à 54 ans). Tous les sujets ont respecté la consigne. Le deuxième groupe est composé de 26 auditeurs. Les sujets sont âgés de 34,8 ans en moyenne (17 ans à 56 ans). Deux sujets n'ayant pas respecté la consigne, leurs performances n'ont pas été prises en considération dans l'analyse des résultats. Un audiogramme normal était requis pour pouvoir participer aux expérimentations. Les sujets étaient d'origine professionnelle très variée (étudiants, médecins, instituteurs, techniciens...).

2.4. Les méthodes d'analyse

L'analyse de proximité est un outil mathématique qui permet de représenter sur un plan ou un espace les similarités trouvées expérimentalement. Elle n'est pas tant une procédure exacte, qu'une manière de réorganiser des objets, afin de parvenir à une configuration qui approche au mieux les distances observées (Schiffman, Reynolds et Young, 1981). Il s'agit d'organiser les séquences en fonction des dissimilarités exprimées par les réponses des sujets. La structure géométrique obtenue est interprétée comme le reflet des qualités de perception mises en œuvre par les auditeurs ou comme le reflet de la structure des représentations mentales qui leur permettent de faire des comparaisons méthodiques. La régression multiple incrémentielle ascendante permet ensuite d'établir des relations entre les coordonnées des séquences dans cet espace et les caractéristiques acoustiques des séquences. Sur le plan numérique, il s'agit d'ajuster une droite à un ensemble de points. Cet ajustement est réalisé selon le principe d'une estimation des moindres carrés.

2.5. Les résultats

Résultats obtenus avec le premier groupe d'auditeurs concernant la perception de l'urgence

Pour chaque séquence, on comptabilise le nombre de fois où il a été choisi comme le plus urgent de la paire présentée. Cela permet d'obtenir un classement " expérimental " des alarmes. La corrélation entre le classement expérimental et le classement théorique est très forte ($r = 0,94, p < 0,0001$). Il est donc possible de classer les séquences selon trois catégories : peu urgent, d'urgence modérée et très urgent.

Les séquences sont réparties de façon pertinente par l'analyse de proximité dans un espace à 3 dimensions. Sur le premier axe, les séquences très urgentes (sons 1, 2 et 5) s'opposent aux séquences peu urgentes (sons 9, 10, 11, 12 et 13). La corrélation entre les coordonnées des séquences sur l'axe 1 et le classement théorique des séquences est très bonne ($r = 0,912, p < 0,0001$) de même que celle avec le classement expérimental des auditeurs ($r = 0,990, p < 0,0001$). L'axe 1 représente bien la perception de l'urgence. Nous regardons quels facteurs acoustiques des séquences permettent de traduire cette perception grâce à la régression multiple incrémentielle ascendante sur l'axe 1. L'équation s'écrit donc : $Y = -0,78 \text{ G.H.} + 0,397 \text{ Env.} + 0,424 \text{ R.H.} + 0,318 \text{ Tempo} - 1,022$

Quatre facteurs interviennent de façon significative dans l'équation de régression et permettent d'expliquer 94,8 % de la variance ($p < 0,0001$). Ce sont la gamme de hauteur (G.H.), l'enveloppe (Env.), la régularité harmonique (R.H.) et le tempo. On retrouve bien les résultats décrits par Hellier et coll. (1993) et Edworthy et coll. (1991).

Résultats obtenus avec le deuxième groupe d'auditeurs concernant les différences entre les séquences

L'analyse de proximité montre que les coordonnées des sons sur l'axe 1 décrivent quasiment parfaitement le classement théorique de Hellier et coll. (1993). Cela pourrait paraître étonnant étant donné que l'on demandait aux sujets de juger de différences entre les séquences sans qu'apparaisse la notion d'urgence dans les recommandations faites à ce groupe. Cependant, si l'on observe comment se répartissent les différentes caractéristiques acoustiques des séquences sur l'axe 1, on remarque qu'il apparaît une évolution assez régulière de l'ensemble d'entre elles le long de l'axe 1. Ainsi, la hauteur, la gamme de hauteur, le contour de hauteur et la répartition des harmoniques évoluent de façon relativement monotone le long de l'axe 1. Ces résultats seraient dus à la façon dont les treize séquences ont été conçues. Les sujets pourraient avoir établi leur jugement de dissemblance sur la notion de quantité d'information présente dans le signal sonore.

3 DEUXIEME EXPERIENCE

3.1. Méthodologie

La deuxième expérience est réalisée selon le même principe que la première mais avec des séquences qui sont des alarmes enregistrées dans les différents aéronefs militaires. Ces signaux beaucoup plus diversifiés que les séquences étudiées par Hellier permettent-ils de retrouver les résultats obtenus dans la première expérience ? Le but de cette approche est aussi d'élargir le champ de recherche et d'essayer d'identifier d'autres stratégies intervenant dans la perception de l'urgence.

Les hypothèses que nous formulons sont que l'on devrait retrouver des résultats comparables à ceux de Hellier et de l'expérience précédente au moins en ce qui concerne les principaux facteurs tels que la hauteur et le tempo par exemple. Cela montrerait la résistance de ces facteurs pour traduire la perception de l'urgence. La difficulté réside dans le fait qu'il est difficile de définir des paramètres permettant de décrire l'ensemble des alarmes du fait de leur disparité. Ainsi elles sont si différentes que pour certaines d'entre elles (les alarmes continues) la notion de tempo n'a pas de sens. D'autres facteurs peuvent influencer la perception de l'urgence selon un mode non abordé par Edworthy ou Hellier, à savoir l'expérience vécue de l'auditeur.

3.2. Les stimuli

Les stimuli sont représentés par trente-cinq alarmes qui ont été enregistrées dans les différents aéronefs de l'Armée de l'Air. Leur durée est de 4,1 s en moyenne. Elle est comprise entre 3,98 s et 4,05 s pour 31 alarmes. Pour des raisons techniques, la durée de quatre alarmes diffère de ces valeurs : 3,455 s ; 4,41 s ; 5,211 s ; 6,34 s. Ces séquences sont très disparates et on distingue globalement trois types de séquences : les séquences continues, les séquences alternées et les séquences discontinues ou intermittentes. Ces stimuli sont présentés par paires successivement dans le temps. Toutes les paires possibles sont réalisées ($(35 \times 34) / 2 = 595$ paires).

3.3. Les sujets

Deux groupes expérimentaux composés de sujets différents ont participé chacun à une phase différente de cette expérimentation. Le premier groupe est composé de 25 auditeurs. Les sujets sont âgés de 34,8 ans en moyenne (19 ans à 56 ans). Le deuxième groupe est composé de 20 auditeurs de moyenne d'âge 30 ans (23 ans à 55 ans). Un audiogramme normal était requis pour pouvoir participer aux expérimentations. Les sujets étaient d'origine professionnelle très variée.

3.4. Les méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse sont équivalentes à celles utilisées dans la première expérience.

3.5. Les résultats

Il est intéressant de noter que les choix des auditeurs sont cohérents entre eux pour la plupart des alarmes alors qu'il s'agit de séquences très disparates en comparaison de ceux présentés dans l'expérience précédente. L'analyse de proximité permet de distribuer les points correspondant aux réponses des auditeurs dans l'espace. On remarque que l'urgence est très bien représentée sur la première dimension et il est possible de classer ces alarmes selon trois catégories : peu urgentes, d'urgence modérée et très urgentes. Certaines séquences sont cependant jugées de façon très différente par les sujets. Il est à noter que les séquences alternées sont perçues comme nettement plus urgentes que les autres séquences. Ce classement ne peut pas s'expliquer complètement par leurs caractéristiques acoustiques. Ainsi la séquence 13 correspond à l'alternance de deux fréquences l'une à 795 Hz et l'autre à 985 Hz avec un tempo de 507 ms est au quatrième rang des séquences les plus urgentes, alors que le son 10 classé au 11^{ème} rang est un son intermittent présentant une fréquence de 2750 Hz et un tempo de 233 ms. Il semble bien que ce soit ce phénomène d'alternance qui soit déterminant. Une hypothèse permettant d'expliquer ce phénomène est que nous entendons régulièrement dans notre environnement quotidien ou diffusées par les médias des alarmes qui présentent justement une alternance de deux fréquences. Cette dernière pourrait en quelque sorte représenter un prototype des alarmes. Ainsi l'environnement culturel du sujet modèlerait son concept d'alarme. Une autre façon d'expliquer ce résultat est qu'un stimulus nouveau attire plus l'attention qu'un bruit ancien car il est porteur de plus d'informations. Ainsi l'alternance de deux sons attirerait plus l'attention des sujets qu'un son continu ou que le même son perçu de façon intermittente. Ce phénomène a été décrit par Bregman (1990). L'auditeur s'habitue à un signal continu et relâche son attention. Lorsqu'un bruit nouveau survient, l'attention auditive du sujet se déplace vers ce bruit.

4 DISCUSSION

L'analyse multidimensionnelle montre que les distributions spatiales obtenues dans les deux groupes pour les sons synthétisés selon les critères de Hellier sont similaires. La question est alors de comprendre à partir de quels critères effectifs les auditeurs ont porté leur jugement. Hellier et coll.

(1993) ont construit ces séquences en considérant que plus les signaux étaient imprévisibles et plus la perception de l'urgence était importante. Dans la pratique, ce concept d'imprévisibilité se traduit par une évolution parallèle de la quantité d'information contenue dans les signaux. Ainsi, ils sont construits de telle façon que plus le niveau théorique d'urgence est important, plus la quantité d'information véhiculée par le son est importante : hauteur élevée, tempo rapide, irrégularité harmonique, contour aléatoire. Ce résultat n'est pas retrouvé avec les alarmes enregistrées pour lesquelles un certain nombre de séquences sont classées comme non urgentes alors que leurs propriétés acoustiques auraient du induire les auditeurs à les classer comme très urgentes. Ces observations nous amènent à considérer que des processus cognitifs complexes impliquant la mémoire à long terme et l'expérience de l'auditeur sont impliqués dans le jugement du degré d'urgence des sons présentés. L'approche réalisée par Edworthy permet de fournir des indices pour la fabrication des alarmes. Elle utilise des méthodes de psychophysique qui ont pour but d'établir une correspondance entre un continuum du domaine physique et le continuum correspondant du domaine sensoriel. Le domaine dans lequel elle évolue est trop restreint et doit être élargi. La perception de l'urgence est un domaine de la psychologie et impose l'existence d'une image mentale soumise à des influences des centres supérieurs. Une certaine culture collective véhicule la notion d'alarme et cette dernière est largement marquée par l'environnement quotidien, les médias et les jeux vidéo. L'alternance de hauteur dans les alarmes pourrait s'avérer constituer un prototype. Il est cependant nécessaire de parfaitement cibler la population à laquelle l'alarme s'adresse.

5 CONCLUSION

A l'issue de ce travail, il apparaît clairement qu'il est possible de classer des sons en fonction de la perception du degré d'urgence. Cependant, les critères de réalisation de ce classement sont de deux ordres différents : les premiers correspondraient à des propriétés acoustiques intrinsèques à la séquence appelées invariants perceptifs ; les seconds seraient représentés par des particularités dépendantes de l'expérience vécue du sujet et éventuellement par la mise en jeu de phénomènes attentionnels comme ceux décrits par Bregman (1990).

6 BIBLIOGRAPHIE

- Bregman, A.S.(Eds.). (1990). *Auditory scene analysis*. London : MIT Press.
- Burt, J.L., Bartolome, D.S., Burdette, D.W., & Comstock, J.R. (1995). A psychophysiological evaluation of the perceived urgency of auditory warning signals. *Ergonomics*, 38, 11, 2327-2340.
- Doll, T.J., & Folds, D.J. (1986). Auditory signals in military aircraft : ergonomics principles versus practice. *Applied Ergonomics*, 17, 4, 257-264.
- Edworthy, J., Loxley, S., & Dennis, L. (1991). Improving auditory warning design : relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors*, 33, 205-231.
- Hellier, E.J., Edworthy, J., & Dennis, I. (1993). Improving auditory warning design : quantifying and predicting the effects of different warning parameters on perceived urgency. *Human Factors*, 35, 4, 693-706.
- James, S.H. (1996). Audio warnings for military aircraft. *AGARD*, 596, 7.1-7.17.
- Patterson, R.D., Edworthy, J., Shailer, M.J., Lower, M.C., & Wheeler, P.D. (1986). Alarm sounds for medical equipment in intensive care areas and operative theatres. Report AC598.
- Patterson, R.D. (1990). Auditory warning sounds in the work environment. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B 327, 485-492.
- Schiffman, S.S., Reynolds, M.L., & Young, F.W. (1981). *Introduction to multidimensional scaling. Theory, methods, and applications*. USA : Academic Press.
- Sorkin, R.D., Kantowitz, B.H., & Kantowitz, S.C. (1988). Likelihood alarm display. *Human Factors*, 30, 4, 445-459.