

# Le «rehaussement» auditif

**Laurent Demany et Samuele Carcagno**

Institut de Neurosciences Cognitives et Intégratives d'Aquitaine

Université de Bordeaux et CNRS (UMR 5287)

146, rue Léo Saignat

33076 Bordeaux

E-mail : Laurent.Demany@psyac.u-bordeaux2.fr

**Résumé**

Le système auditif tend à rehausser (accentuer) des changements spectraux entre sons successifs. Ceci permet de mieux détecter et identifier des événements nouveaux dans des environnements acoustiques complexes. Nous décrivons ici plusieurs variétés de rehaussement auditif, et nous exposons le rôle que pourrait jouer l'adaptation neuronale dans ce phénomène.

**Abstract**

The auditory system tends to enhance spectral changes between successive sounds. This enhancement facilitates the detection and the identification of novel events in complex acoustic environments. We describe here some instances of auditory enhancement, and the role that might be played by neural adaptation in this phenomenon.

**V**enant d'achever sa conférence, le conférencier demande : «Y a-t-il une question dans la salle ?». Une seule main se lève, au fond de l'amphithéâtre qui est bondé. Mais cela suffit pour attirer immédiatement l'attention visuelle du conférencier.

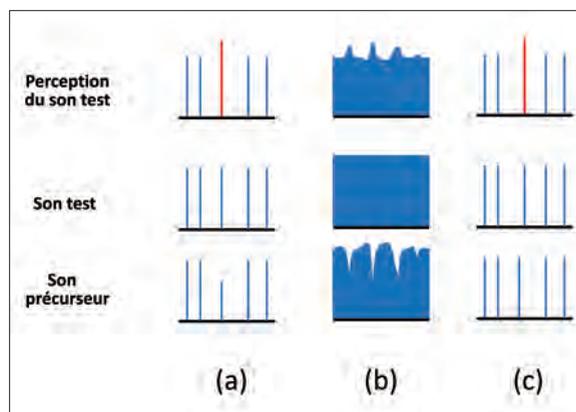
De façon analogue, les humains sont capables de détecter automatiquement des changements spectralement locaux dans des scènes acoustiques complexes. À cette capacité est associé un phénomène auditif qui sera appelé ici «rehaussement» (le phénomène est habituellement désigné en anglais par le terme «*enhancement*»). Le but de notre article est de décrire plus précisément le rehaussement auditif et de présenter aussi les hypothèses actuelles concernant son origine physiologique.

## Trois exemples de rehaussement

Un ensemble de sons purs synchrones et égaux en intensité, comme celui représenté au milieu de la colonne gauche (a) de la figure 1, est généralement perçu comme un seul objet sonore ; on ne distingue pas les hauteurs tonales de ses composants individuels.

Mais supposons que ce son «test» soit précédé d'un son «précurseur» tel que celui représenté en bas de la colonne.

L'unique différence entre les deux sons réside dans le fait que l'un des composants du son test se trouve atténué dans le son précurseur. En conséquence de la présentation du précurseur, le composant qui est atténué dans ce dernier sera perceptivement rehaussé dans le son test. Sa hauteur tonale deviendra audible.



**Fig. 1 : Trois exemples de rehaussement auditif :**  
(a) rehaussement d'un son pur suite à une augmentation de son intensité relative ; (b) modification de la perception d'un bruit suite à la présentation préalable d'un autre bruit ; (c) rehaussement d'un son pur suite à un changement de sa fréquence. Dans chacun des neuf panneaux, l'axe horizontal représente la fréquence et l'axe vertical l'intensité.

Comme illustré en haut de la colonne, le rehaussement se traduira par l'impression que le composant en question est non seulement plus intense que les autres composants du test, mais aussi séparé d'eux, comme s'il provenait d'une source acoustique distincte. Le rehaussement sera d'autant plus net que l'atténuation de sa cible sera grande dans le son précurseur [1]. Il sera aussi d'autant plus net que l'intervalle de temps séparant le précurseur du test sera court [2, 3, 4] ; étonnamment, toutefois, le rehaussement peut rester observable pour des intervalles de plusieurs secondes [2].

La colonne médiane (b) de la figure 1 présente une variante de rehaussement proche de celle illustrée en (a). Cette fois, le spectre des sons précurseur et test est continu plutôt qu'en raies ; il s'agit donc de bruits. Le spectre du test est plat tandis que celui du précurseur présente des échancrures. Le rehaussement se traduira ici par une coloration subjective du son test, objectivement incolore : on y percevra à peu près le symétrique spectral du précurseur [5]. Si par exemple le précurseur possède des échancrures à des fréquences correspondant aux formants d'une voyelle donnée, alors cette voyelle sera entendue dans le son test [6].

Le troisième exemple de rehaussement illustré par la figure 1, dans sa colonne droite (c), diffère des deux autres par le fait qu'ici la source du rehaussement n'est plus une augmentation relative d'intensité mais un changement de fréquence : comme le son test, le son précurseur a un profil spectral plat ; la seule différence entre les deux sons réside dans un décalage fréquentiel du troisième composant. Il en résulte perceptivement un effet identique à celui illustré en (a) [1, 7].

### Rehaussement et masquage proactif

La forme de rehaussement dépeinte à gauche dans la figure 1 peut être objectivée avec une procédure de «masquage proactif» [8, 9]. Le phénomène de masquage proactif se traduit par une élévation (donc une dégradation) du seuil de détection d'un son pur très bref lorsque ce signal est précédé, immédiatement ou presque, par un autre son pur de même fréquence.

Plus celui-ci est intense physiquement, plus grand est son masquage proactif. Considérons le cas d'un masqueur proactif constitué de plusieurs sons purs d'intensités égales et suivi d'un bref signal dont la fréquence est celle de l'une des composantes du masqueur (partie (a) de la figure 2).

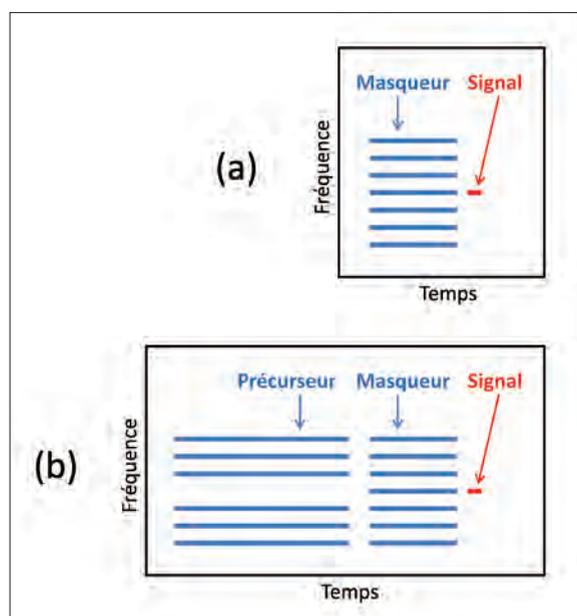


Fig. 2 : Séquences sonores permettant de montrer que le rehaussement s'accompagne d'une augmentation de masquage proactif. Le seuil de détection du signal sera plus élevé (moins bon) dans la séquence (b) que dans la séquence (a).

Il apparaît que si le masqueur est précédé d'un précurseur reproduisant le masqueur mais sans sa composante à la fréquence du signal (partie (b) de la figure 2), le seuil de détection du signal est encore plus élevé [8, 9]. Ceci tient au rehaussement de la composante critique du masqueur par le précurseur (plutôt qu'au masquage du signal par le précurseur). Du point de vue du masquage proactif, tout se passe donc comme si un son pur perceptivement rehaussé était rendu physiquement plus intense.

Il existe plusieurs autres manières d'objectiver le rehaussement, mais celle que nous venons de décrire est particulièrement intéressante car le fait brut qu'elle met en évidence semble avoir des implications concernant le mécanisme du rehaussement. Nous y reviendrons un peu plus loin.

### Rehaussement et tonotopie

On sait que le système auditif périphérique effectue une décomposition spectrale des sons. Il peut être décrit comme un grand ensemble de filtres dont la bande passante est à peu près proportionnelle à la fréquence caractéristique. Cette sélectivité fréquentielle permet de bien séparer les unes des autres, spatialement (on dit aussi «tonotopiquement»), les cinq ou six premières harmoniques d'un son complexe périodique au profil spectral plat. Par le moyen illustré à gauche dans la figure 1, il est facile de rehausser très fortement l'une de ces harmoniques. Le rehaussement devient de moins en moins prononcé lorsque le rang de l'harmonique-cible s'élève, ce qui est explicable par le fait que l'harmonique devient alors de moins en moins séparable tonotopiquement de ses voisines. Toutefois, Hartmann et Goupell [10] ont trouvé qu'en faisant alternativement apparaître et disparaître une harmonique de rang 20 ou même plus, il est encore possible de la rendre audible individuellement. Cette étonnante observation donne à penser que le rehaussement (et plus généralement l'analyse perceptive de la composition spectrale d'un son) peut dans une certaine mesure se réaliser sans l'aide d'indices tonotopiques, et donc sur la base d'indices purement temporels. L'hypothèse en question reste cependant à confirmer. Dans une autre recherche qui visait à établir la possibilité d'un rehaussement sans indice lié à la tonotopie du système auditif périphérique, notre laboratoire n'a pas obtenu de succès probant [11].

### Le caractère «pré-cognitif» du rehaussement

On pourrait imaginer que le rehaussement est au moins en partie la conséquence d'une comparaison que fait consciemment le sujet entre ses perceptions des sons se présentant successivement à lui. Mais en réalité, les mécanismes en jeu semblent être essentiellement «pré-cognitifs», autrement dit indépendants de la perception consciente. C'est ce que suggère une recherche que nous avons récemment réalisée [12]. Comme illustré par la figure 3, les sujets avaient ici à détecter un son pur masqué par six autres sons purs, tous ces sons purs étant synchrones. Le masqueur et le signal étaient tantôt sans précurseur et tantôt précédés par une séquence de précurseurs dont les composants avaient les mêmes fréquences que celles du masqueur.

Dans l'une des conditions expérimentales, baptisée SYNCH, les composants de chacun des précurseurs étaient synchrones, comme celles du masqueur ; les précurseurs étaient donc similaires au masqueur perceptivement. Dans une autre condition, ASYNCH, les composants des précurseurs étaient par contre asynchrones, ce qui produisait une forte dissimilarité perceptive entre précurseurs et masqueurs. Il est apparu que la présentation des précurseurs améliorait la détection du signal à un degré très voisin dans les conditions SYNCH et ASYNCH.

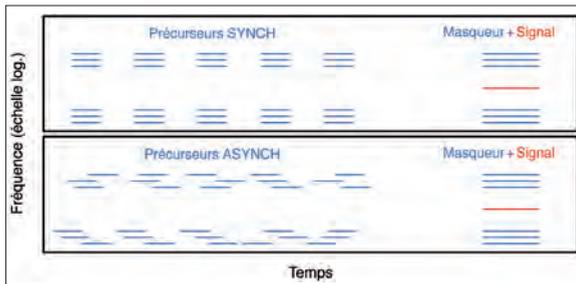


Fig. 3 : Séquences sonores employées dans les conditions SYNCH et ASYNCH d'une expérience de Carcagno, Semal, et Demany (sous presse).

Des faits physiologiques congruents avec cette hypothèse ont été observés dans le mésencéphale du ouistiti [14].

Le rehaussement est observable non seulement quand les sons précurseur et test sont présentés à la même oreille (ipsilatéralement) mais aussi - quoiqu'à un degré moindre - lorsqu'ils sont présentés à des oreilles opposées (contralatéralement) [3, 7, 15, 16]. Par ailleurs, le rehaussement est également observable chez des sujets percevant les sons par l'intermédiaire d'un implant cochléaire [17]. Ces deux faits indiquent que du rehaussement peut être généré au-delà de l'oreille interne. Il existe vraisemblablement des sources distinctes de rehaussement dans le système auditif. C'est ce que suggère une étude des présents auteurs [3] dans laquelle les sons précurseur et test étaient présentés soit ipsilatéralement, soit contralatéralement. Nous avons mesuré, dans ces deux conditions, le déclin du rehaussement lorsque l'intervalle de temps séparant le précurseur du test variait de 10 à 600 ms. Le déclin s'est avéré plus rapide dans la condition ipsilatérale que dans la condition contralatérale. On peut rendre compte de ce résultat en supposant que du rehaussement est générable d'une part à la périphérie du système auditif et d'autre part plus centralement, sur la base de deux formes d'adaptation neuronale différant l'une de l'autre par leurs caractéristiques temporelles [18].

## Une source potentielle de rehaussement : l'adaptation neuronale

A tous les étages du système auditif, la réponse d'un neurone à un son pur stationnaire s'affaiblit au cours de ce son, et sera également plus faible si le son est répété après une brève pause. C'est ce qu'on appelle l'adaptation neuronale. Elle semble pouvoir jouer un rôle dans le rehaussement par le fait qu'un neurone se comporte généralement comme un filtre passebande.

Reconsidérons de ce point de vue le premier exemple de rehaussement donné dans la figure 1. En réponse au son test, les neurones préférentiellement sensibles aux composantes spectrales qui ne sont pas la cible du rehaussement devraient manifester davantage d'adaptation que les neurones répondant à la cible, car celle-ci était atténuée dans le précurseur. On comprend ainsi que la cible soit subjectivement plus intense que les autres composantes du son test.

Le scénario que nous venons de décrire a une réalité dans le nerf auditif [13]. Mais cela ne suffit pas pour expliquer qu'une composante spectrale rehaussée ait un effet de masquage proactif plus fort, et soit perceptivement plus intense, que la même composante non rehaussée. Afin de rendre compte de cette apparente amplification, Viemeister [8, 9] a supposé que :

- dans le système auditif, des composantes spectrales simultanées tendent à s'inhiber mutuellement ;
- l'adaptation neuronale produite par un précurseur se traduit non seulement par un affaiblissement, dans le son test, des composantes qui ne sont pas la cible du rehaussement, mais également par une réduction de leur inhibition de la composante cible.

## Le cas particulier du rehaussement par changement de fréquence

Comme illustré dans la partie droite de la figure 1, un son pur peut être rehaussé par un changement de sa fréquence. Un changement de 6 % (un demi-ton) suffit pour produire un fort rehaussement [1, 7]. Puisqu'un tel changement produit inévitablement une augmentation de l'excitation de certains neurones dans un ensemble neuronal fonctionnant comme un analyseur de spectres, on pourrait penser que le rehaussement par changement de fréquence ( $R_F$ ) repose sur le même mécanisme physiologique que le rehaussement par élévation d'intensité ( $R_I$ ). Mais il existe aujourd'hui plusieurs raisons de croire que tel n'est pas le cas. Par exemple, alors que  $R_I$  diminue nettement quand les sons précurseur et test sont présentés contralatéralement plutôt qu'ipsilatéralement, ce n'est pas vrai pour  $R_F$  [7]. Une série d'expériences menées dans notre laboratoire mais ne portant pas sur le rehaussement nous a conduit à suggérer que le système auditif contient des détecteurs automatiques de changements fréquentiels [19, 20, 21]. Il est plausible que ces détecteurs jouent un rôle crucial dans  $R_F$ .

## La valeur fonctionnelle du rehaussement

En soi, l'audition est une modalité sensorielle particulièrement adaptée au signalement de nouveautés inattendues dans l'environnement. Un explorateur marchant dans la jungle ne détectera pas visuellement le tigre qui approche derrière lui. Et si l'explorateur ne pouvait détecter le tigre que par des sensations tactiles, son avenir serait fortement compromis. Son audition, cependant, lui permettra de détecter le bruit suspect d'une brindille qui se casse sous une patte du tigre, à une distance qui donne le temps de réagir efficacement.

Le phénomène de rehaussement, pour sa part, facilitera la détection du bruit suspect si la jungle grouille au même moment d'autres sons, stationnaires ou répétitifs. Ainsi, le rehaussement «aiguise» en quelque sorte l'aptitude générale du système auditif à détecter des nouveautés inattendues dans l'environnement. Remarquablement, les nouveautés rehaussées ne se limitent pas à des changements au sein d'un son déjà présent : comme on l'a vu plus haut, le rehaussement peut se réaliser après un silence. Le rehaussement exploite donc une certaine forme, implicite, de mémoire auditive [22]. Cette mémoire implicite est en elle-même fascinante et mériterait qu'on lui consacre de plus nombreuses recherches.

## Références bibliographiques

- [1] Demany, L., Carcagno, S., & Semal, C., 2013. The perceptual enhancement of tones by frequency shifts. *Hear. Res.*, 298, 10-16.
- [2] Viemeister, N.F., 1980. Adaptation of masking. In *Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing*, edited by G. van den Brink & F.A. Bilson. Delft University Press, Delft, pp 190-199.
- [3] Carcagno, S., Semal, C., & Demany, L., 2012. Auditory enhancement of increments in spectral amplitude stems from more than one source. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 13, 693-702.
- [4] Cao, X., & Richards, V.M., 2012. Enhancement in informational masking. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 55, 1135-1147.
- [5] Wilson, J.P., 1970. An auditory after-image. In *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing*, edited by R. Plomp & G.F. Smoorenburg. Sijthoff, Leiden, pp. 303-315.
- [6] Summerfield, Q., Sidwell, A., & Nelson, T., 1987. Auditory enhancement of changes in spectral amplitude. *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 700-708.
- [7] Erviti, M., Semal, C., & Demany, L., 2011. Enhancing a tone by shifting its frequency or intensity. *J. Acoust. Soc. Am.* 129, 3837-3845.
- [8] Viemeister, N.F., & Bacon, S.P., 1982. Forward masking by enhanced components in harmonic complexes. *J. Acoust. Soc. Am.* 71, 1502-1507.
- [9] Byrne, A.J., Stellmack, M.A., & Viemeister, N.F., 2011. The enhancement effect: Evidence for adaptation of inhibition using a binaural centering task. *J. Acoust. Soc. Am.* 129, 2088-2094.
- [10] Hartmann, W.M., & Goupell, M.J., 2006. Enhancing and unmasking the harmonics of a complex tone. *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 2142-2157.
- [11] Serman, M., Semal, C., & Demany, L., 2008. Enhancement, adaptation, and the binaural system. *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 4412-4420.
- [12] Carcagno, S., Semal, C., & Demany, L., sous presse. Enhancement of increments in spectral amplitude: Further evidence for a mechanism based on central adaptation. In *Basic Aspects of Hearing: Physiology and Perception*, edited by B.C.J. Moore, R.D. Patterson, I. Winter, R.P. Carlyon, & H.E. Gockel. Springer, New York.
- [13] Palmer, A.R., Summerfield, Q., & Fantini, D.A., 1995. Responses of auditory-nerve fibers to stimuli producing psychophysical enhancement. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 1786-1799.
- [14] Nelson, P.C., & Young, E.D., 2010. Neural correlates of context-dependent perceptual enhancement in the inferior colliculus. *J. Neurosci.* 30, 6577-6587.
- [15] Richards, V.M., Huang, R., & Kidd, G., 2004. Masker-first advantages for cues in informational masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 2278-2288.
- [16] Kidd, G., Richards, V.M., Streeter, T., Mason, C.R., & Huang, R., 2011. Contextual effects in the identification of nonspeech auditory patterns. *J. Acoust. Soc. Am.* 130, 3926-3938.
- [17] Wang, N., Kreft, H., & Oxenham, A.J., 2012. Vowel enhancement effects in cochlearimplant users. *J. Acoust. Soc. Am.* 131, EL421-EL426.
- [18] Ulanovsky, N., Las, L., Farkas, D., & Nelken, I., 2004. Multiple time scales of adaptation in auditory cortex neurons. *J. Neurosci.* 24, 10440-10453.
- [19] Demany, L., & Ramos, C., 2005. On the binding of successive sounds: Perceiving shifts in nonperceived pitches. *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 833-841.
- [20] Demany, L., Semal, C., Cazalets, J.R., & Pressnitzer, D., 2010. Fundamental differences in change detection between vision and audition. *Exp. Brain Res.* 203, 261-270.
- [21] Demany, L., Semal, C., & Pressnitzer, D., 2011. Implicit versus explicit frequency comparisons: Two mechanisms of auditory change detection. *J. Exp. Psychol. Human Percept. Perform.* 37, 597-605.
- [22] Demany, L., & Semal, C., 2008. The role of memory in auditory perception. In *Auditory Perception of Sound Sources*, edited by W.A. Yost, A.N. Popper & R.R. Fay. Springer, New York, 77-113.