

Psychoacoustique

Daniel Pressnitzer



Introduction

Processus perceptifs et cognitifs en audition

- Construire une représentation mentale du monde acoustique
- Exploiter les informations qu'il contient

Une activité naturelle pour le cerveau humain, et pourtant mal comprise et encore impossible à reproduire artificiellement

Introduction

Pourquoi étudier ces processus?

- Curiosité
- Applications pratiques (estimation de nuisances, design sonore, codage audio, parole...)
- Aspects thérapeutiques (pathologies, prothèses...)
- Aspects musicologiques

Psychoacoustique

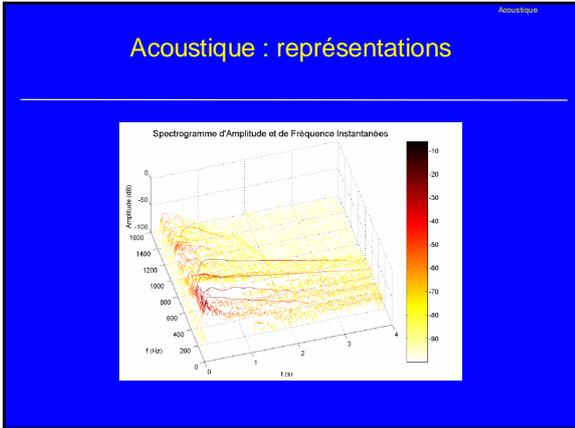
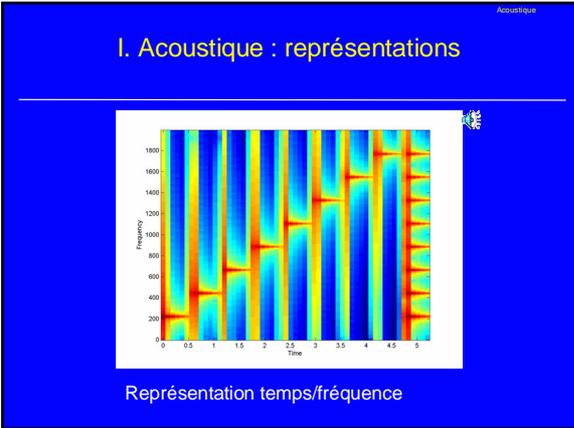
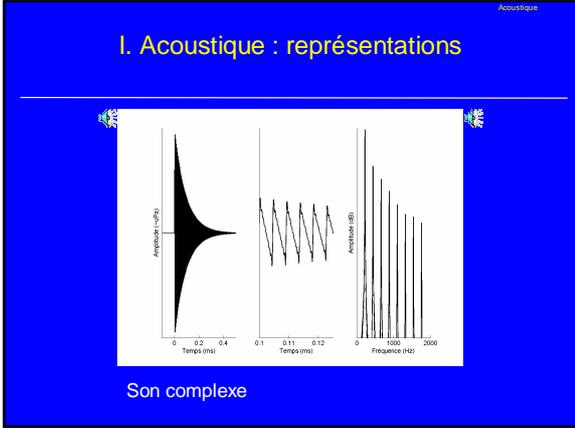
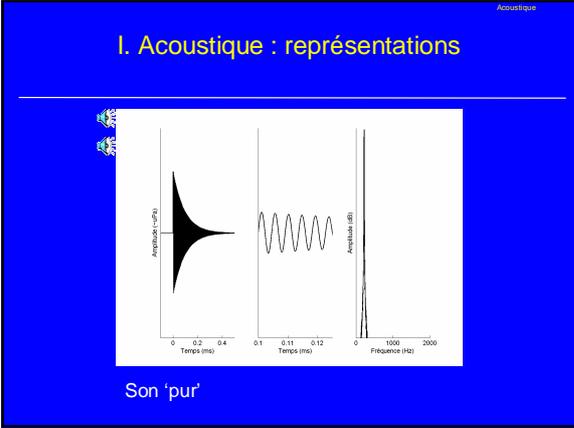
- I. Acoustique
- II. Méthodes psychophysiques
- III. Anatomie et fonctionnement du système auditif
- IV. Caractéristiques élémentaires
- V. Attributs perceptifs
- VI. Localisation
- VI. Organisation auditive

I. Acoustique

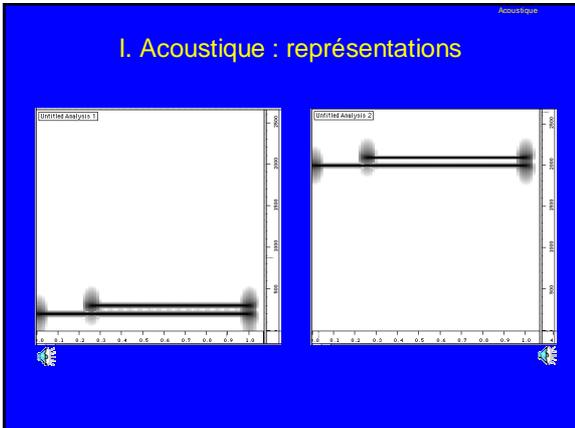
- Une seule réalité physique
- *Mais multitude de représentations*

I. Acoustique : représentations

- Représentation temporelle: pression au cours du temps
- Représentation spectrale: contenu fréquentiel (Fourier)
- Représentations temps/fréquence



- Acoustique : représentations
- Existence de plusieurs représentations mathématiques
 - Prise en compte de la perception?



II. Méthodes psychophysiques

- II.1 Introduction
- II.2 Seuils de détection
- II.3 Lois psychophysiques
- II.4 Théorie de la détection du signal
- II.5 Estimation directe
- II.6 Autres outils

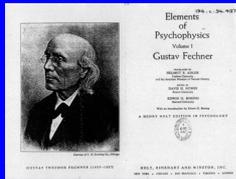
II.1 Psychophysique

- Lien entre expérience subjective et description physique
- Problème fondamental: impossible de savoir ce qui se passe dans la tête des gens
- ... en fait, difficile de savoir ce qui se passe dans notre propre tête

Besoin de méthodes *expérimentales rigoureuses*

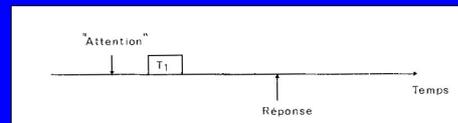
II.1 Psychophysique

Gustav Theodor Fechner (1860)



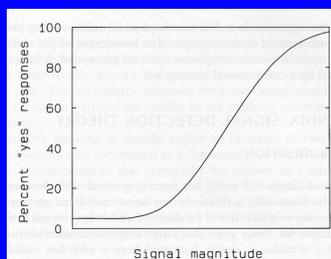
- La « science exacte des relations fonctionnelles ou relations de dépendance entre le corps et l'esprit »
- Objections James, Bergson, etc...

II.2 Seuils de détection



- Mesure de la plus petite 'intensité' physique détectable

II.2 Seuil de détection

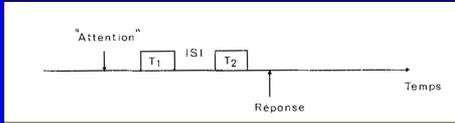


- Fonction psychométrique
- Seuil = X % correct

II.3 Lois de Fechner

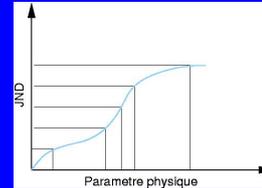
- Lien entre mesures physiques et échelles de sensations
- Lois psychophysiques: $S = f(\varphi)$
- Problématique de la mesure des sensations

II.3 Lois de Fechner



- Seuil différentiel (just noticeable difference ou jnd)

II.3 Lois de Fechner

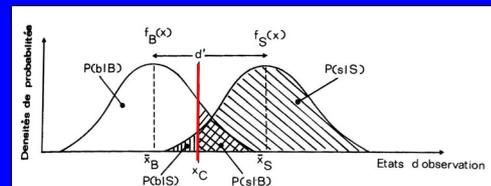


- Hypothèse: $jnd =$ unité de sensation
- Si $\Delta\phi/\phi = cte$ (loi de Weber), $S \sim \log(\phi)$

II.4 Théorie de la détection du signal

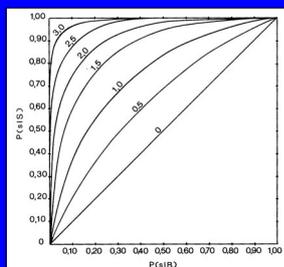
- Variabilité inter-sujets
 - Variabilité intra-sujet
 - Variabilité du critère de réponse
- > approche statistique et modèle de décision (Swets, Tanner)

II.4 Théorie de la détection du signal



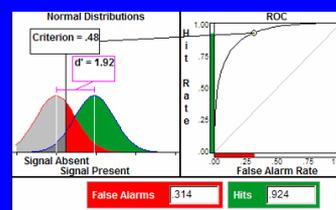
- Discriminabilité: $d' = z(\text{détection correcte}) - z(\text{fausse alarme})$
- Indépendant du critère x_C

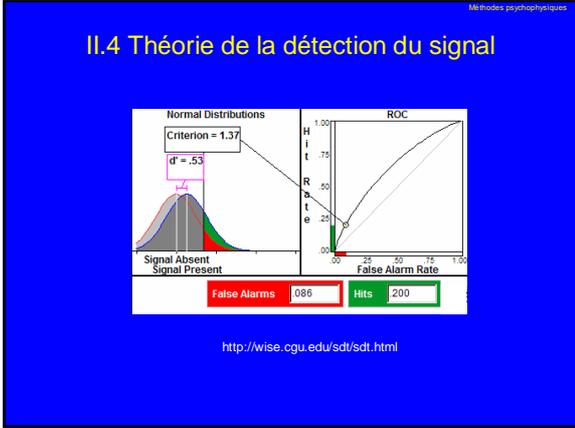
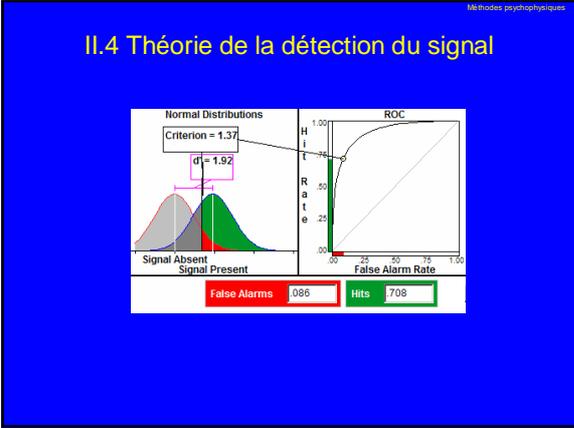
II.4 Théorie de la détection du signal



- Courbes ROC (récepteur-opérateur)

II.4 Théorie de la détection du signal



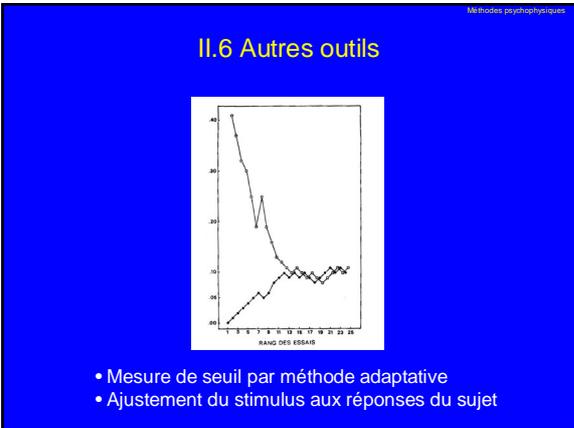
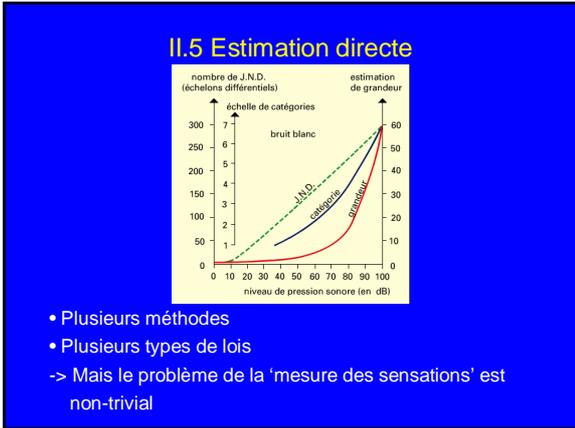


II.5 Estimation directe

- Estimation ou production de rapports
- Loi de Stevens: $S \sim A \phi^k$

Variable Sensorielle	Exposant	Type de stimulation	Variable Sensorielle	Exposant	Type de stimulation
Score	0,6	Son pur à 1000 Hz	Goût	0,8	Saccharine
Vibration	0,95	600 Hz sur le doigt	Goût	1,3	Sel
Vibration	0,6	250 Hz sur le doigt	Goût	1,3	Sel
Éclairement	0,5	Source ponctuelle, dans l'obscurité	Durée	1,1	Bourfées de bruit blanc
Luminance	1,2	Reflectance de papier gris	Taux de répétition	1,0	Lumières, son, touches, coasts
Vitesse visuelle	1,2	Petit luminance mobile	Écartement des doigts	1,3	Épaisseur de lit de bois
Longueur visuelle	1,0	Lignes horizontales	Pression sur la peau	1,1	Force relative sur la peau
Surface visuelle	0,7	Carrés lumineux	Force de préhension	1,7	Dynamomètre à main
Odeur	0,55	Parfums de café	L'odorant	1,48	Trichostèmes
Odeur	0,6	Heptane	Réponse tactile	1,5	Grain de toile abrasive
Température	1,0	Froid sur la bras	Durée tactile	0,8	Grainne abrasive entre les doigts
Température	1,0	Chaleur sur la bras	choc électrique	1,5	Échec à travers les doigts

Tableau 1 : Liste d'exposants de la fonction puissance de Stevens, avec les grandeurs physiques et sensorielles concernées (d'après Stevens, 1986).

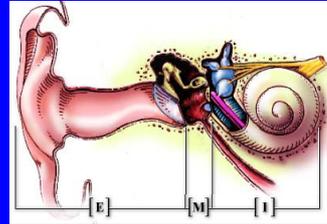


- ### II.6 Autres outils
- Jugements de dissemblance
 - Echelles sémantiques
 - Catégorisation libre
 - ...

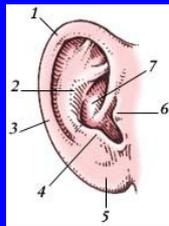
III. Anatomie et physiologie du système auditif

- III.1 Oreille externe et moyenne
- III.2 Oreille interne: la cochlée
- III.3 Le nerf auditif
- III.4 Centres supérieurs de traitement

III. Anatomie et physiologie du système auditif



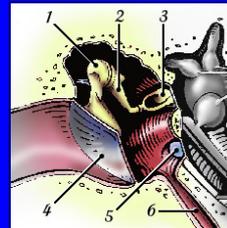
III.1 Oreille externe



1. Hélix
2. Anthélix
3. Pavillon
4. Antitragus
5. Lobule
6. Tragus
7. Conque de l'auricule

- Amplification (+15 dB autour de 2kHz)

III.1 Oreille moyenne



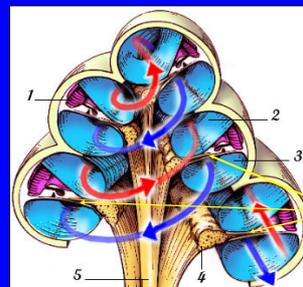
1. Marteau
2. Enclume
3. Etrier
4. Tympan
5. Fenêtre ronde
6. Trompe d'Eustache

- Adaptation d'impédance (+25dB)
- Réflexe stapédien

III. 2 Oreille interne



III. 2 Oreille interne: cochlée



1. Canal cochléaire
2. Rames vestibulaire
3. Rampe tympanique
4. Ganglion spiral
5. Nerf cochléaire

Membrane basilaire

III. 2 Oreille interne: membrane basilaire

Systeme auditif

Onde propagée
Amplitude des déplacements de la membrane basilaire en fonction de la fréquence.

Base 1 2 3 4 Apex

50 Hz
300 Hz
1600 Hz
3000 Hz
1 kHz
20 kHz

© Stephan Reinhardt

III. 2 Oreille interne: membrane basilaire

Systeme auditif

5 kHz
500 Hz
20 Hz
1 kHz
20 kHz

•Codage tonotopique

Hermann von Helmholtz

Systeme auditif

Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik (1877)

Georg von Békésy

Systeme auditif

270

III. 2 Oreille interne: organe de Corti

Systeme auditif

Inner Ear
Cochlear Structure
Single Cochlear Turn

III. 2 Oreille interne: organe de Corti

Systeme auditif

Cellule ciliée interne

Cellules ciliées externes

III. 2 Oreille interne: cellules ciliées

III. 2 Oreille interne: cellules ciliées internes

- Transduction
- Codage temporel

III. 2 Oreille interne: cellules ciliées externes

- Electromotilité
- Tonotopie active (hautes fréquences)

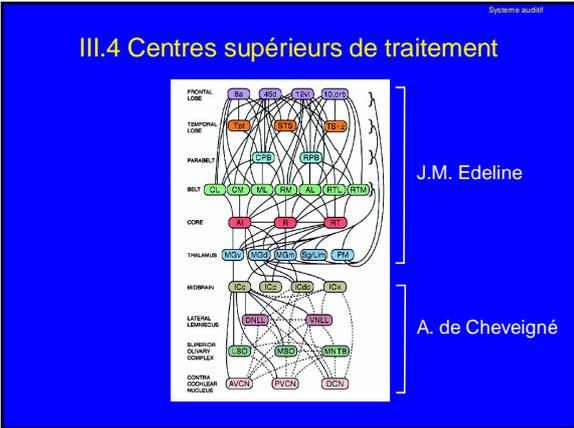
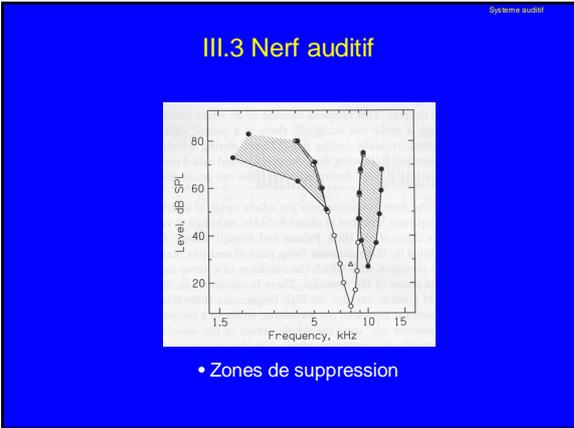
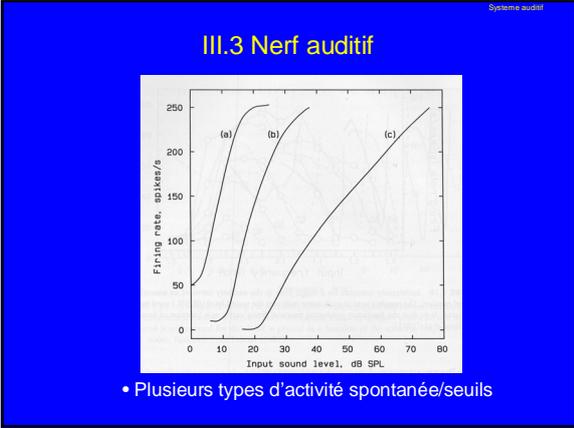
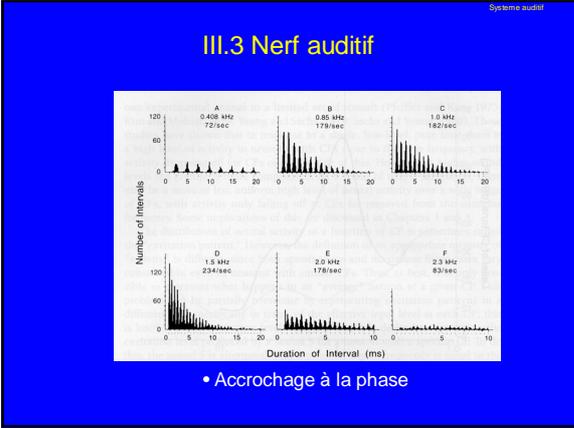
Traumatismes acoustiques

III.3 Nerf auditif

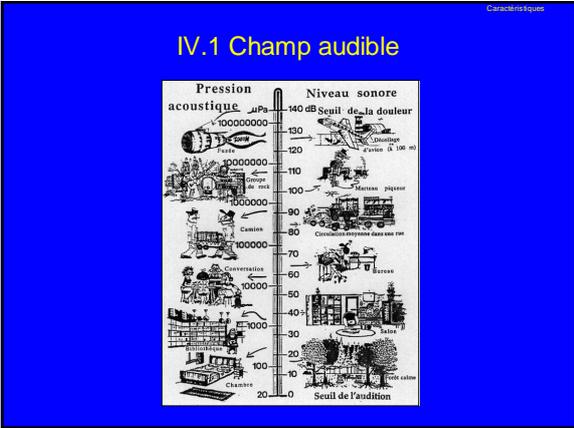
- 30000 fibres afférentes
- Type 1: 90%, cellules ciliées internes
- Type 2: 10%, cellules ciliées externes
- 1500 fibres efférentes

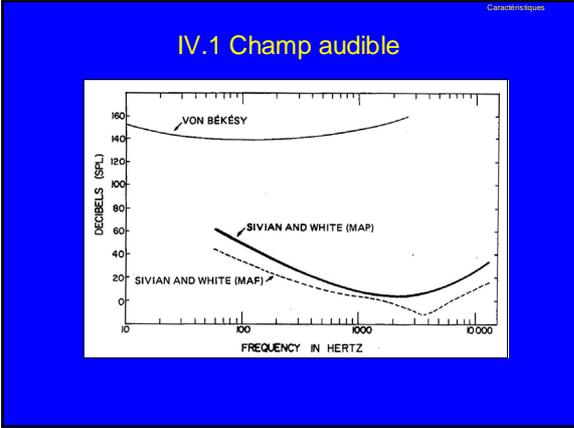
III.3 Nerf auditif

- Fréquences caractéristiques



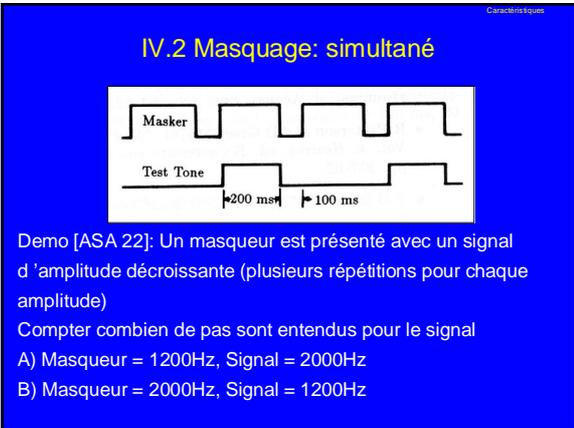
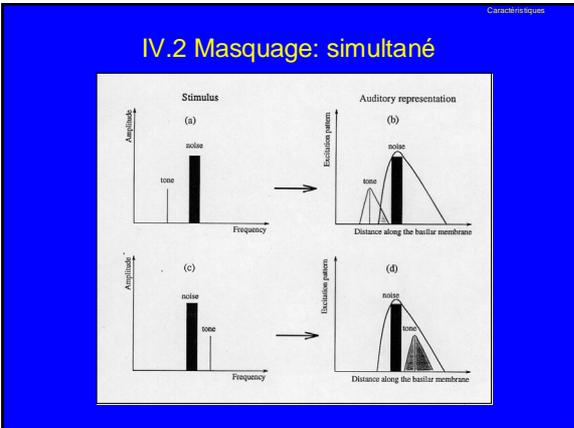
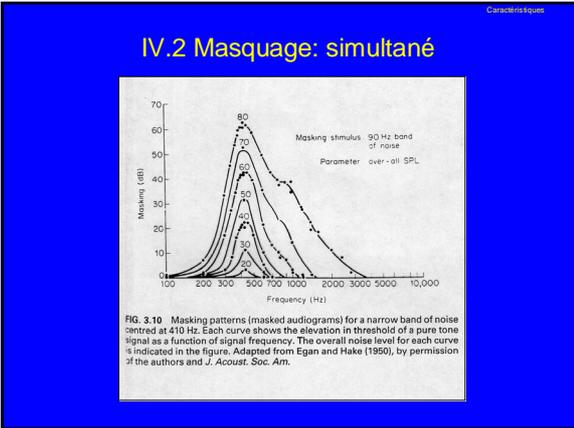
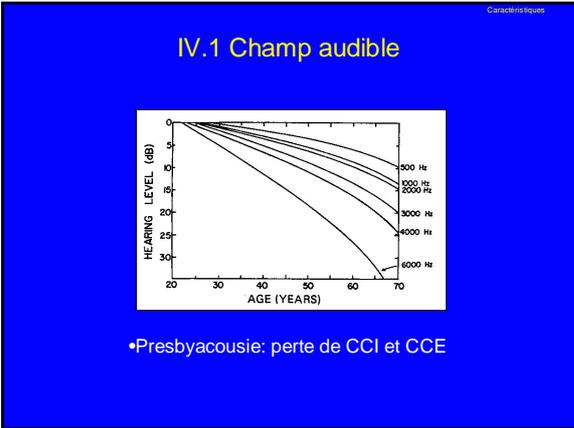
- ### IV. Caractéristiques élémentaires
- IV.1 Champ audible
 - IV.2 Masquage
 - IV.3 La bande critique
 - IV.4 Résolution temporelle
 - IV.5 Sons de distorsion
 - IV.6 Modèles
 - IV.7 Applications: MPEG, implants cochléaires



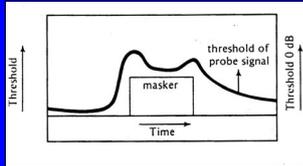


IV.1 Champ audible

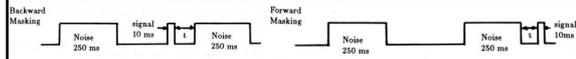
Demo [ASA 17]:
 Sons purs à 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000Hz
 Présentés avec une intensité décroissante, par pas de 5dB
 Compter combien de pas sont entendus pour chaque fréquence



IV.2 Masquage: temporel



IV.2 Masquage: temporel

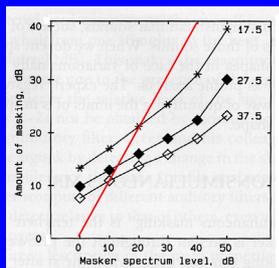


Demo [ASA 23-25]

Le signal est un son pur. Compter blah blah...

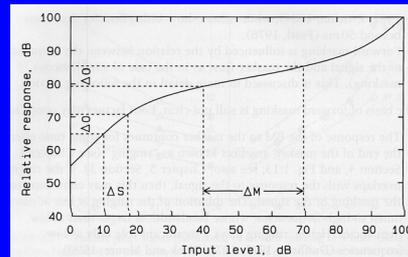
- A) Signal seul
- B) Signal suivi ($t=100\text{ms}, 20\text{ms}, 0\text{ms}$) par un bruit
- C) Signal précédé par le bruit

IV.2 Masquage: temporel



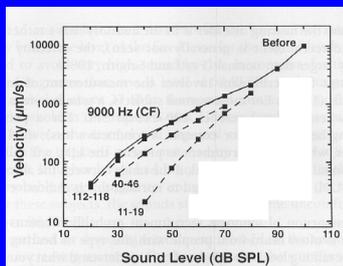
- Existence de compression (non-linéarité)

IV.2 Masquage: temporel



- Existence de compression (non-linéarité)

IV.2 Masquage: temporel



- Sources de la compression : mécanisme actif

IV.3 La bande critique

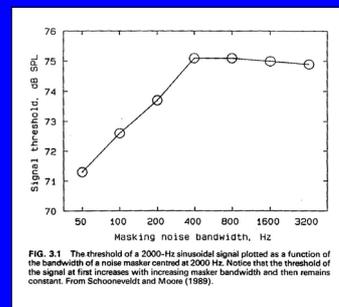


FIG. 3.1 The threshold of a 2000-Hz sinusoidal signal plotted as a function of the bandwidth of a noise masker centered at 2000 Hz. Notice that the threshold of the signal at first increases with increasing masker bandwidth and then remains constant. From Schoonveldt and Moore (1989).

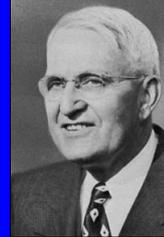
IV.3 La bande critique

Demo [ASA 2-6]

Le signal est un son pur à 2000Hz

- A) signal seul
- B) masqué par un bruit large bande
- C) masqué par une bande de bruit de largeur 1000Hz
- D) largeur 250Hz
- E) largeur 10Hz

IV.3 La bande critique



•Harvey Fletcher, Speech and Hearing (1922)

IV.3 La bande critique

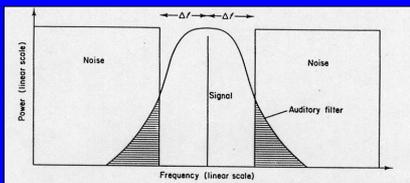
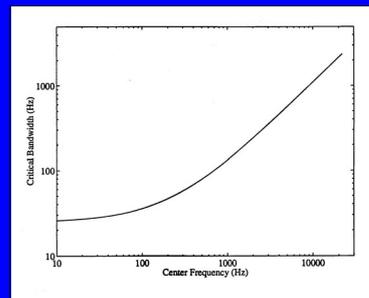


FIG. 3.6 Schematic illustration of the technique used by Patterson (1976) to determine the shape of the auditory filter. The threshold of the sinusoidal signal is measured as a function of the width of a spectral notch in the noise masker. The amount of noise passing through the auditory filter centred at the signal frequency is proportional to the shaded areas.

IV.3 La bande critique



IV.3 La bande critique

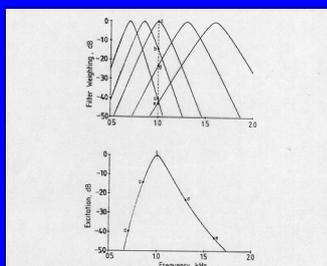
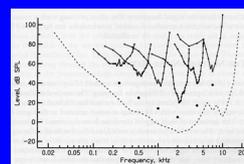
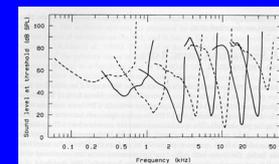


FIG. 3.11 An illustration of how the excitation pattern of a 1 kHz sinusoid can be derived by calculating the outputs of the auditory filters as a function of their centre frequency. The top half shows five auditory filters, centred at different frequencies, and the bottom half shows the calculated excitation pattern. See text for details. From Moore and Glasberg (1983a).

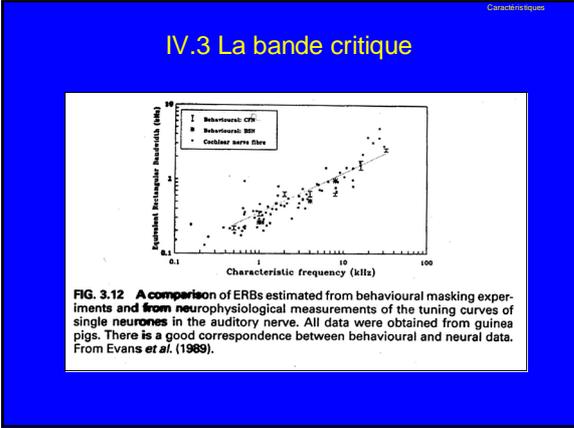
IV.3 La bande critique



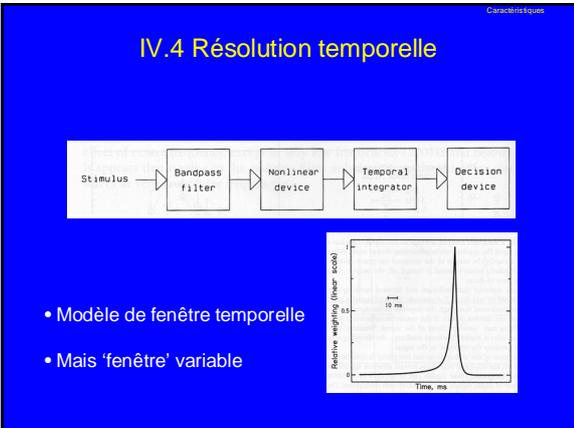
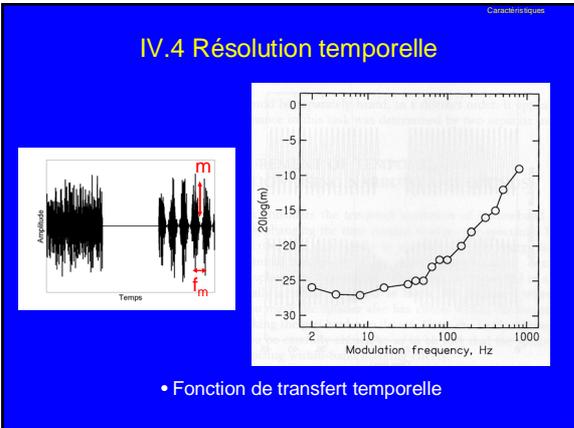
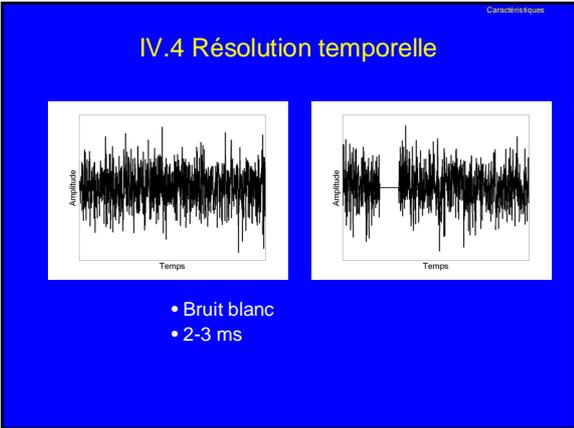
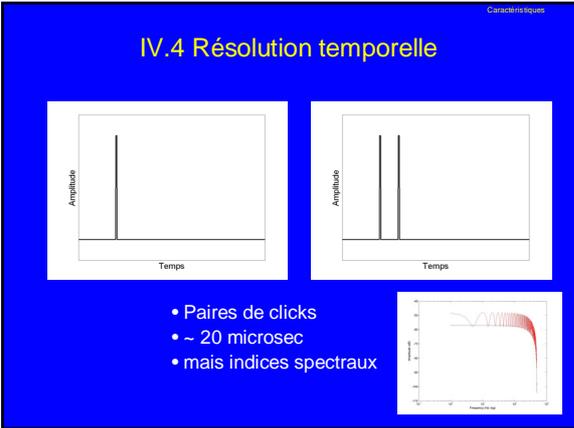
Psychophysique



Physiologie



- ### IV.4 Résolution temporelle
- Notion de résolution temporelle
 - Intégration avec constante de temps
 - Mesure possible: détection d'interruption



Caractéristiques

IV.4 Résolution temporelle

- Perception de l'ordre d'évènements brefs
- Ecoute 'holistique' possible
- Intégration adaptée à la tâche?

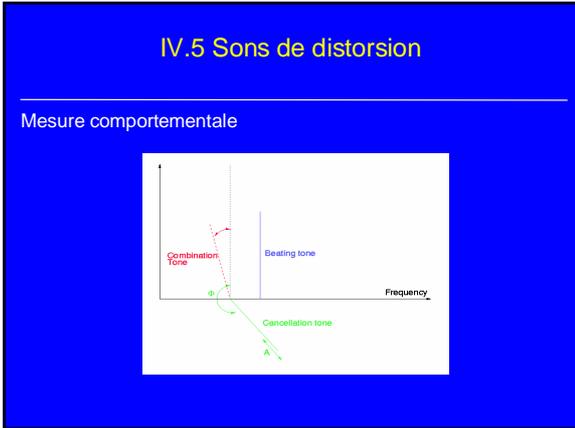
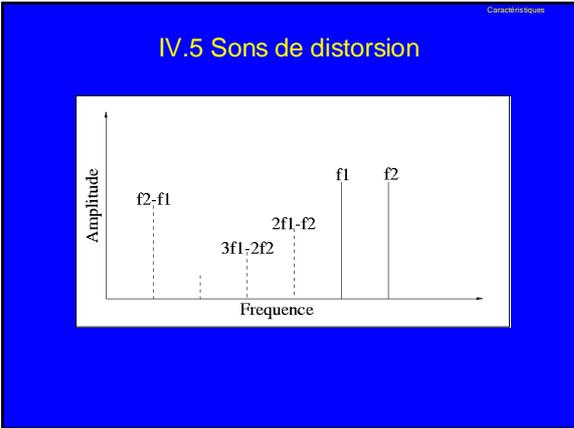
[Démonstration Warren 32, 35]

IV.5 Sons de distorsion

Sons de Tartini



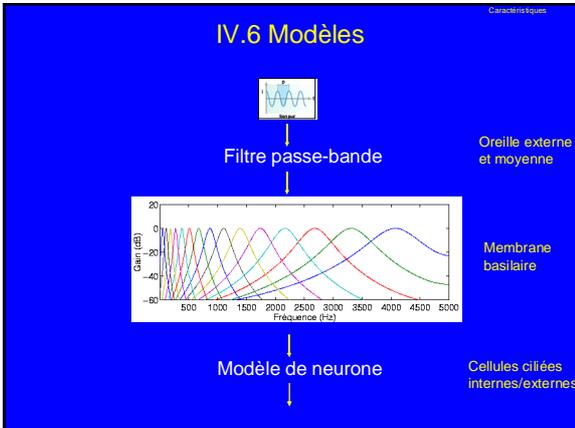
400 & 500 Hz = 4th and 5th harmonics of 100 Hz	400 & 533 Hz = 3rd and 4th harmonics of 133 Hz	400 & 600 Hz = 2nd and 3rd harmonics of 200 Hz
Difference tone: 500 - 400 Hz = 100 Hz	Difference tone: 533 - 400 Hz = 133 Hz	Difference tone: 600 - 400 Hz = 200 Hz

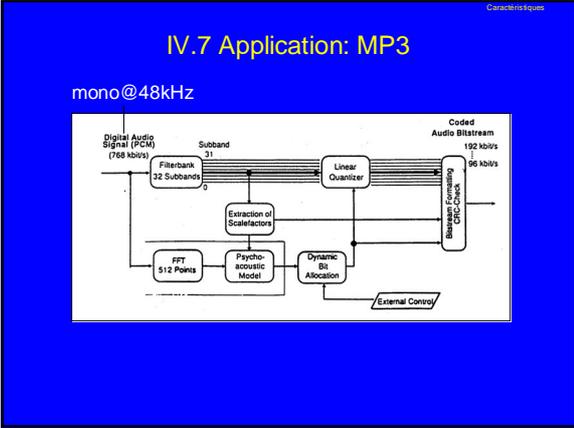
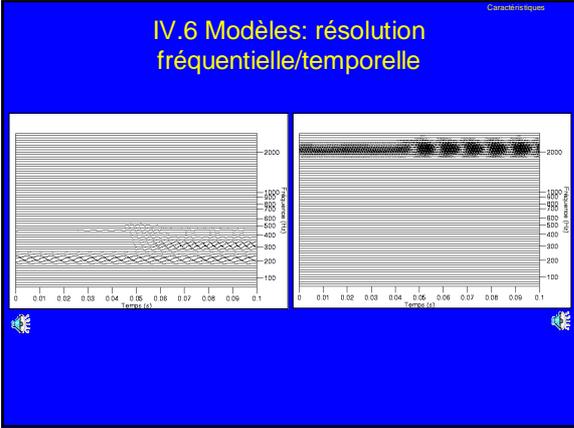



Caractéristiques

IV.5 Sons de distorsion

Demo [ASA 68]
 Deux sons purs sont présentés à 1000 et 1200Hz
 On rajoute un son pur à 804Hz
 Nb: $2f_1 - f_2 = 800\text{Hz}$





IV.7 Application: MP3

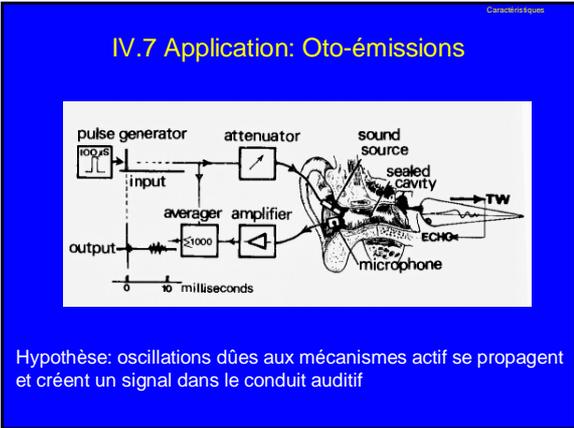
CD stereo: $44.1 \times 16 \times 2 = 1410$ kbps

Compression MP3 (Lame, www.mp3dev.org)

256 kbps	
128 kbps	
64 kbps	
32 kbps	

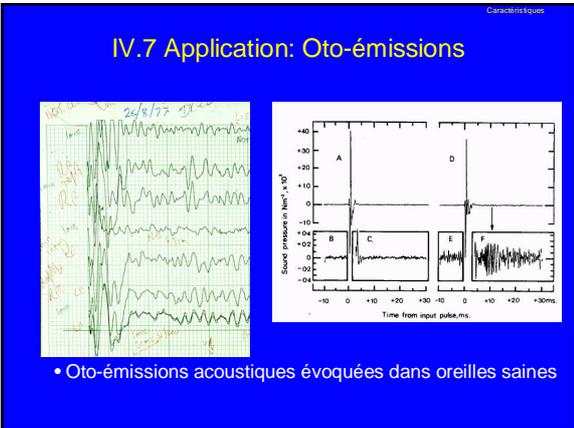
Comparison:

- fs = 8kHz (256 kbps)
- fs = 4kHz (128 kbps)
- 8 bits (512 kbps)



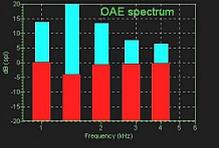
IV.7 Application: Oto-émissions

- Suggéré dès 1948 par Gold pour oreille avec tinnitus
- Nouvelle tentative de mesure en 1977 par Kemp



Caractéristiques

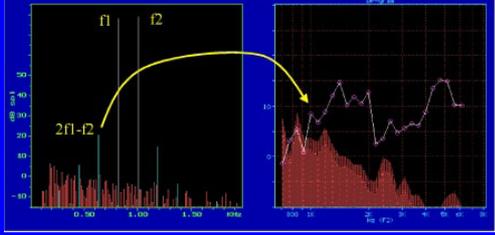
IV.7 Application: Oto-émissions

- Analyse de la structure fréquentielle des émissions

Caractéristiques

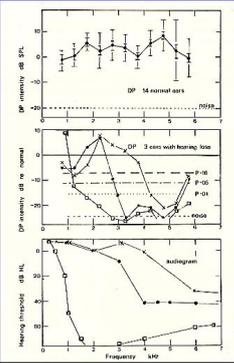
IV.7 Application: Oto-émissions



- Analyse de la structure fréquentielle des émissions
- Emissions par produit de distorsion (DPOAE)

Caractéristiques

IV.7 Application: Oto-émissions



- Corrélation avec pertes auditives

Caractéristiques

IV.7 Application: Oto-émissions

**The Journal of
Laryngology and Otology**
(Founded in 1882 by SIMON, MACEWEN and SIMON WILKINSON)
January 1971

A family with high-tonal objective tinnitus¹
By J. D. GRANVILLE*, R. R. A. COLSON† and BRENDA M. STEVENS†
(Dorchester)

Active low 'objective tinnitus' has been described to this Society quite recently and there are over fifty other reports in the literature; the present case presents two quite unique features. First, the tinnitus appears to be congenital in type and second, unlike previously reported cases which are of either discontinuous clicks or pulsatile beats, it consists of continuous non-pulsatile high-frequency pure tones.

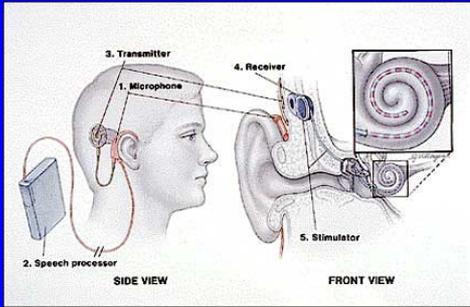
The term 'objective tinnitus' is used here, again, for want of a better term that is still easily recognizable. Strictly speaking though, the word 'tinnitus' refers to a sound heard in the ears.



- Outil de diagnostic clinique 'objectif'

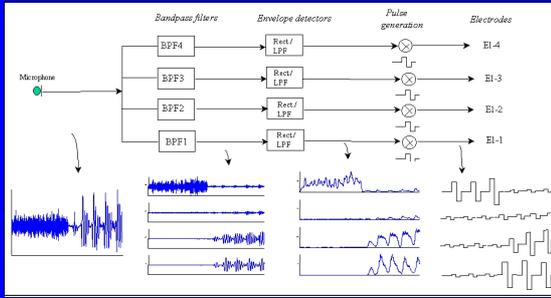
Caractéristiques

IV.7 Application: implants cochléaires



Caractéristiques

IV.7 Application: implants cochléaires



IV.7 Application: implants cochléaires

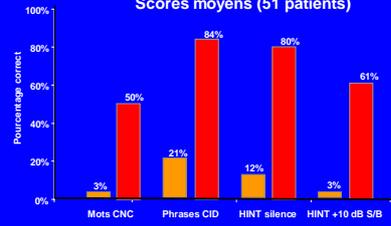
Simulations de l'algorithme de traitement

Bandes 1 2 3 4 6 8



IV.7 Application: implants cochléaires

Scores moyens (51 patients)



Etude Advanced Bionics™