

OD DataSIM – cours AUDIO

Acoustique, audio et applications

Analyse perceptive de signaux audio

J-F PETIOT

◆ PLAN – (cours 2h)

- Le signal sonore
 - Représentations du son - décomposition de Fourier – analyse temps/fréquence, sonagramme –
 - Les différents types de sons
 - Quelques descripteurs caractéristiques
 - Attributs perceptifs d'un son
- Acoustique
 - Sources - propagation
 - Directivité
 - Niveaux sonores – le décibel
- Perception acoustique – qualité sonore
 - Psychoacoustique
 - Les tests d'écoute

◆ PLAN

- Analyses subjectives/objectives

- Principe général
- Rappels sur le modèle linéaire
- Cartographie des préférences

◆ Tp (4h) : analyse de la qualité sonore perçue

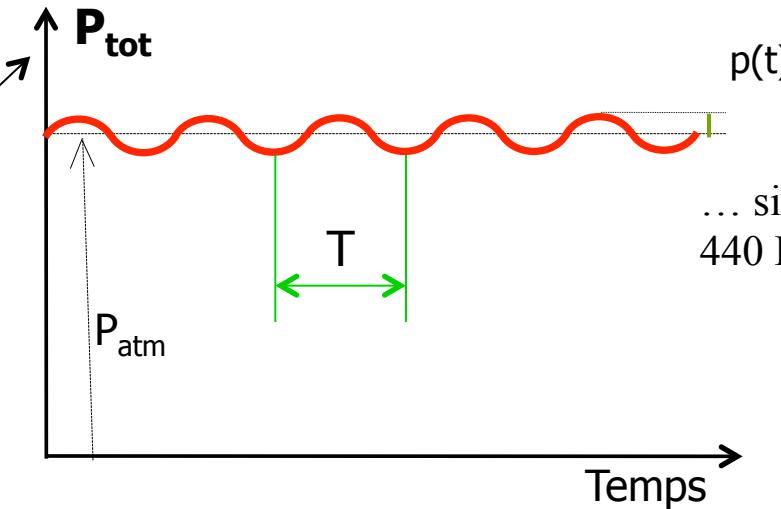
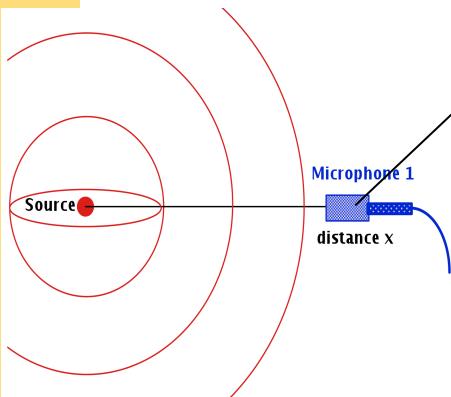
- Sons de « toqué » de planche de bord automobile



Le signal sonore

Signal sonore

◆ Variation de pression dans le milieu considéré



$$P_{\text{tot}} = P_{\text{atm}} + p(t)$$

$$p(t) = p_0 \cos(2\pi ft + \varphi)$$

Onde transversale



Onde acoustique = Onde longitudinale



Direction de propagation

NB : les sons ont besoin d'un milieu **compressible** pour se propager

Pas de propagation du son dans le vide

- ◆ les sons ne se propagent pas dans le vide
- ◆ l'onde sonore se propage dans tout milieu possédant :
 - une MASSE
 - une ELASTICITE (compressible)

- ◆ CELERITE c en m/s
 - Air (20°C) : 342 m/s
 - Air (37°C) : 352 m/s
 - Eau 1460 m/s :
 - Bois 1000 à 2000 m/s
 - Béton 3500 m/s
 - Brique 2500 m/s
 - Acier 5000 à 6000 m/s

$$c_{gaz} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

Coefficient isentropique

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$c(T) \approx 20\sqrt{T}$$

L'air est un milieu non dispersif pour le son : la **célérité est indépendante de la fréquence** (toutes les ondes se déplacent à la même vitesse) : c'est heureux pour pouvoir écouter de la musique !

Cette propriété n'est plus vraie à très fort niveau sonore (le tonnerre et son "roulement") ou pour les ultrasons.

transmission aérienne et solidaire

1 - transmission aérienne

2 - réverbération

3 - transmission aérienne directe

4 - transmission latérale d'un bruit aérien

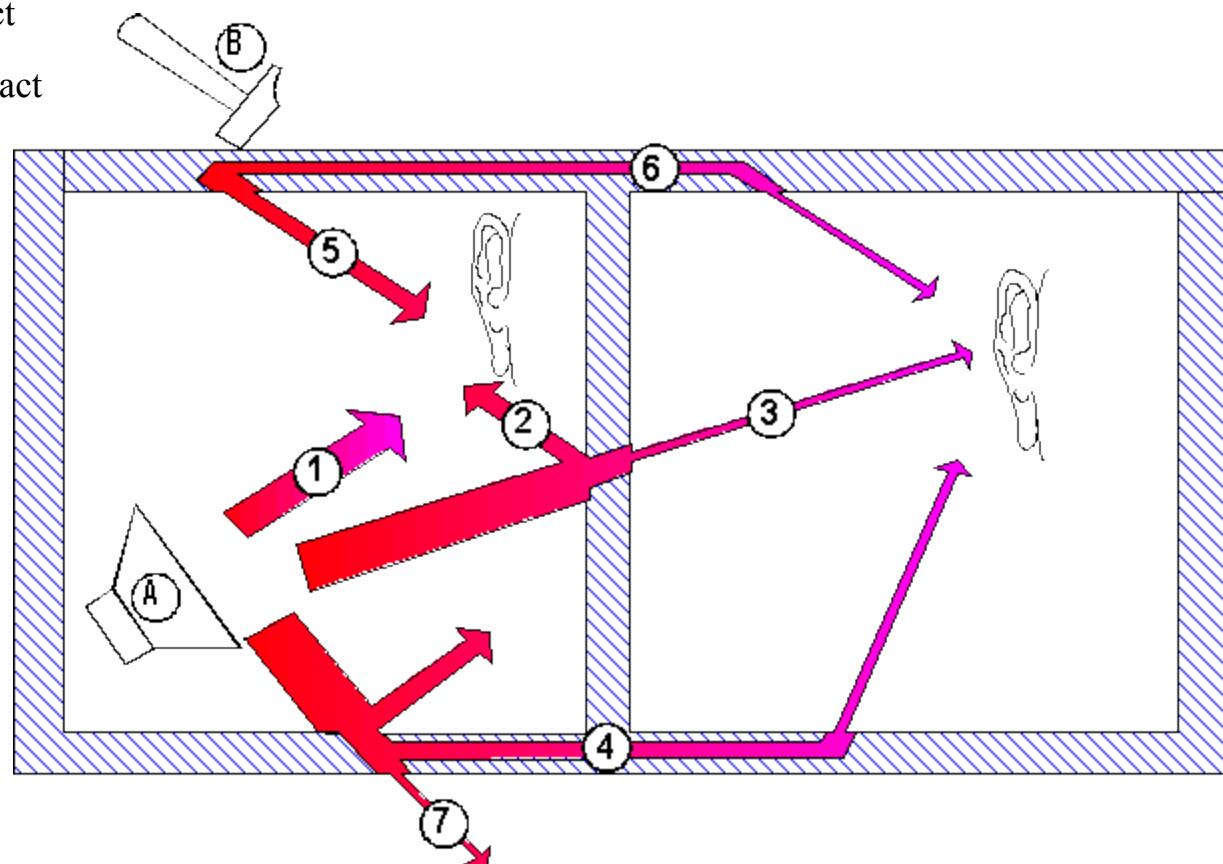
5 - réémission d'un bruit d'impact

6 - transmission d'un bruit d'impact

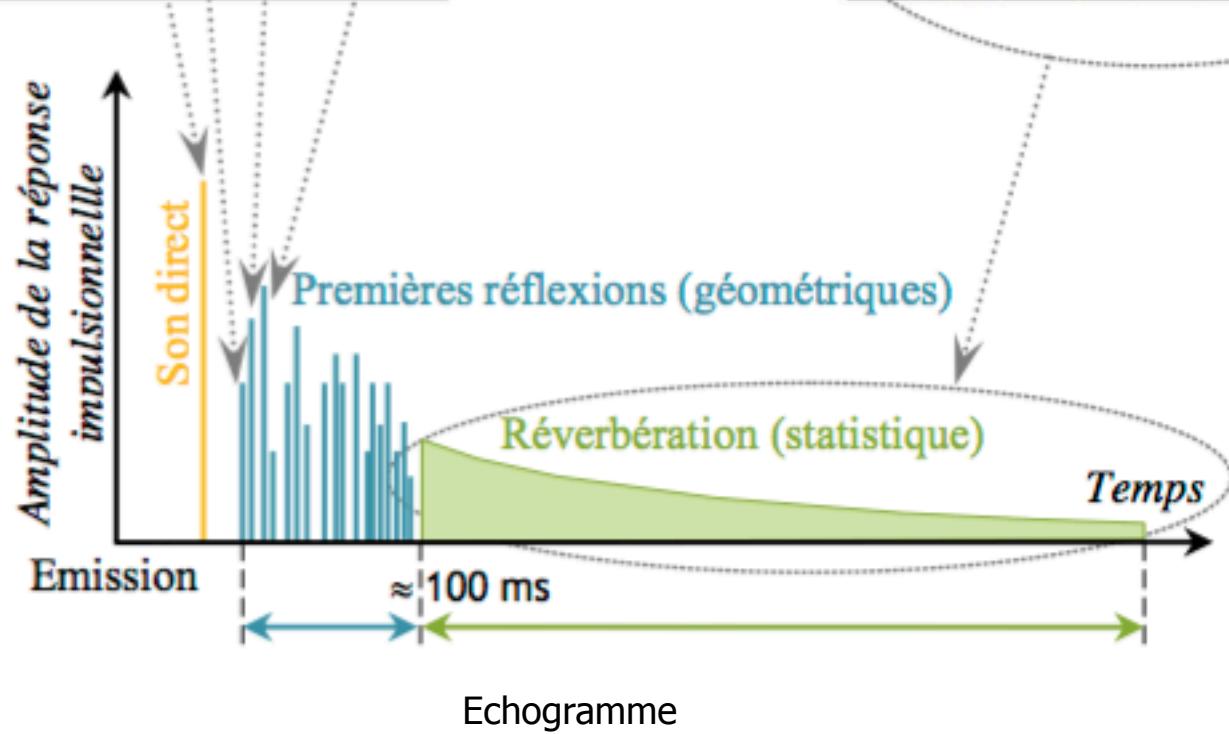
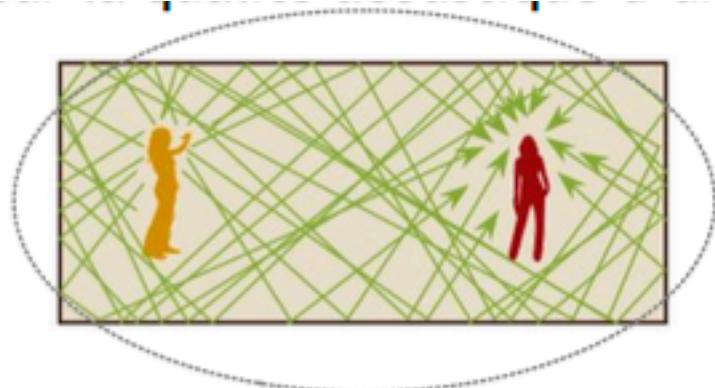
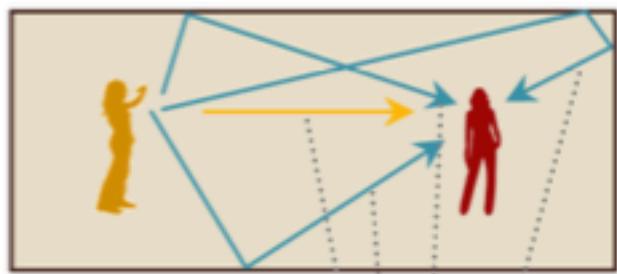
7 - transmission aérienne directe

A - source de bruit aérien

B - source de bruit solidaire ou d'impact



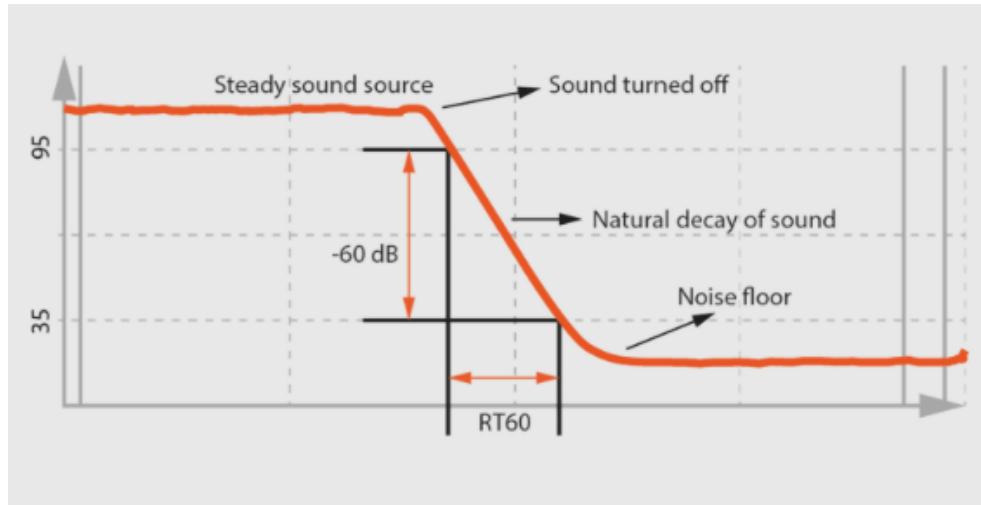
Champ sonore



Temps de réverbération RT60

Caractérisation d'une salle : le RT60

"*temps pour que le son décroisse de 60dB après l'arrêt de la source*"



Modèle de Sabine [1898]

$$RT_{60} = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

V : volume de la salle

A : aire d'absorption équivalente de la salle

α_i : coefficient d'absorption de la paroi i
(dépend de la fréquence)

S_i : surface de la paroi i

Autre indice : indice de clarté C_{50}

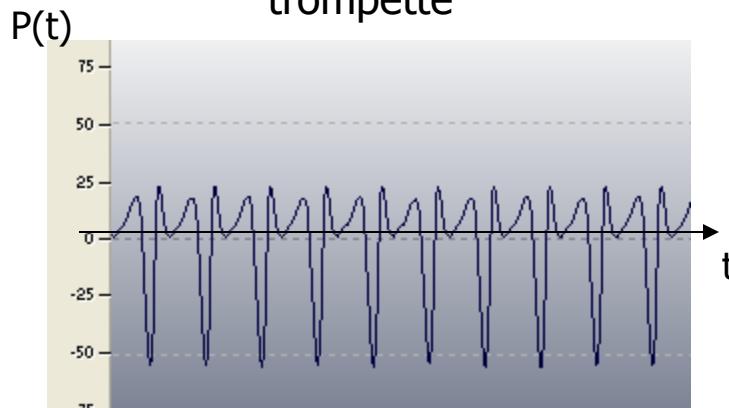
$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\text{energie de 0 à 50ms}}{\text{energie après 50ms}} \right)$$

Représentations du son

- Représentation temporelle
 - Amplitude de la pression en fonction du temps



trompette



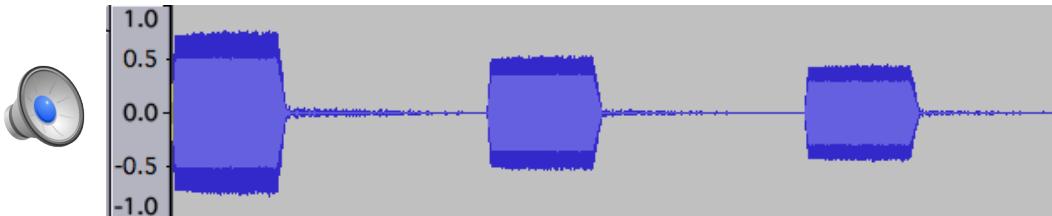
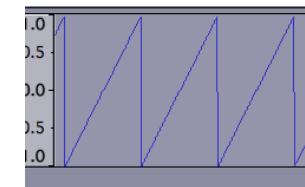
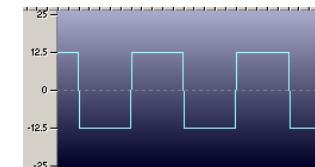
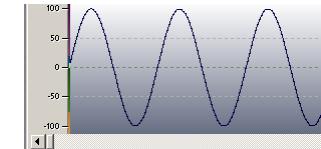
Editeur audio

Audacity (freeware)

Soundforge

Wavelab

Différentes formes d'ondes



Donne une information sur le positionnement des évènements **dans le temps**, mais ne permet pas d'accéder au **contenu fréquentiel**

Théorie de J. Fourier

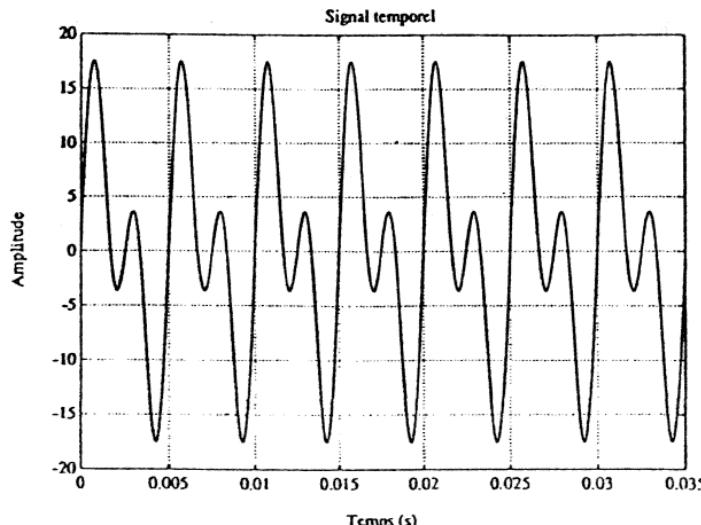
- Analyse harmonique

Tout signal périodique peut se décomposer en une somme infinie de sinusoïdes élémentaires appelées harmoniques, dont les fréquences sont les multiples entiers d'une même fréquence F, la fréquence fondamentale.

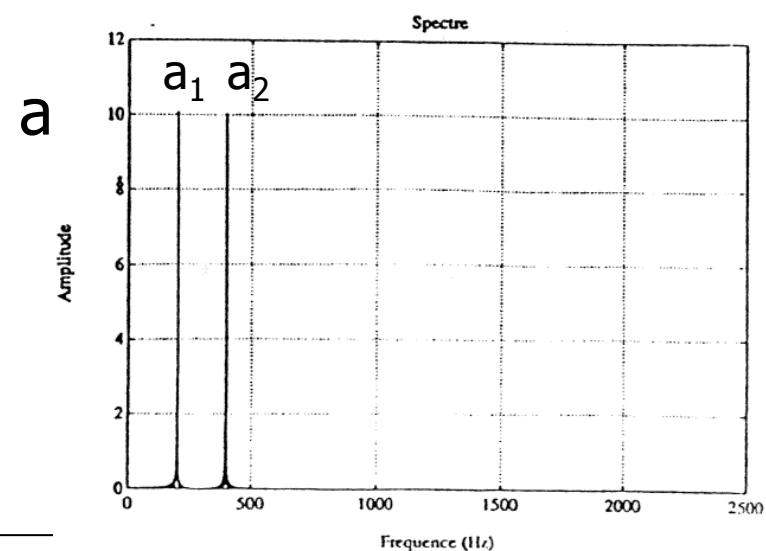
- Représentation spectrale : exemple

$$s(t) = a_1 \sin(2\pi F \cdot t) + a_2 \sin(4\pi F \cdot t)$$

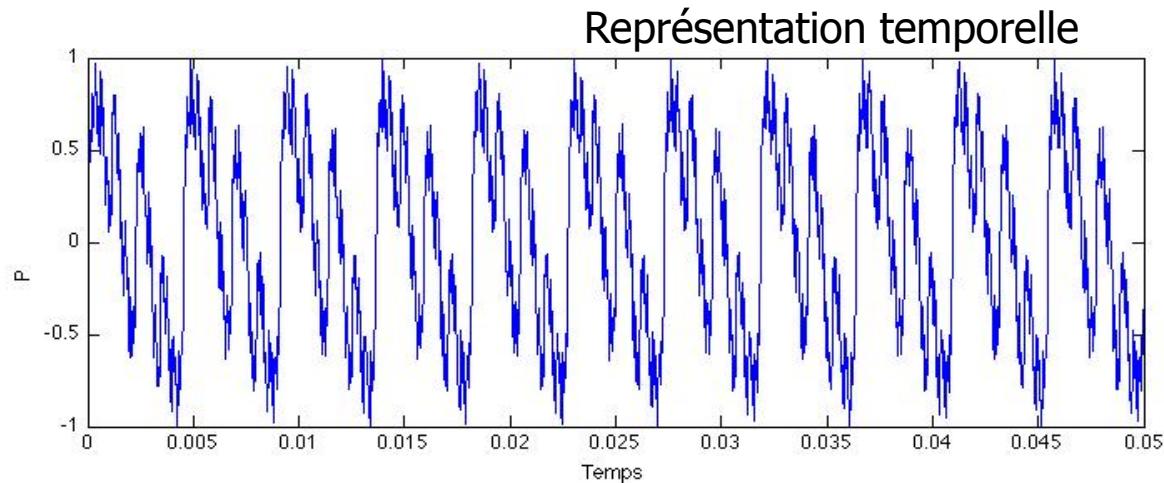
Représentation temporelle



Représentation spectrale



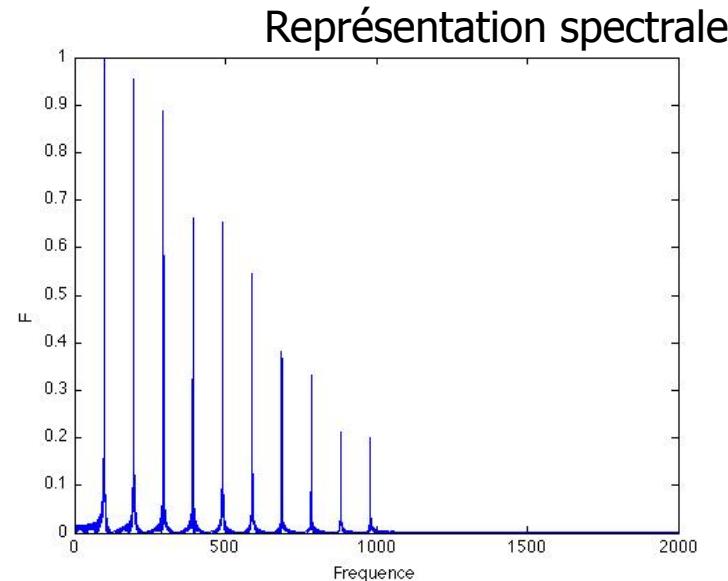
Exemple : son harmonique



Analyse spectrale

10 harmoniques (multiples d'une même fréquence F)
F = 98Hz

$$s(t) = \sum_{n=1}^{10} a_n \sin(2\pi n F t)$$

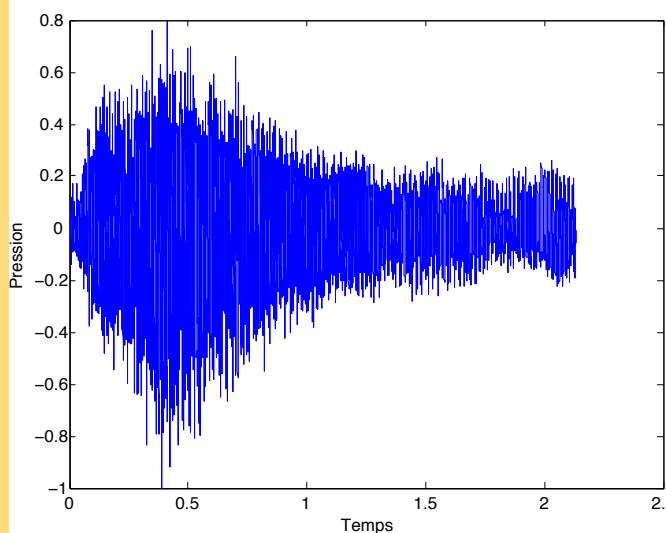


Généralisation aux signaux quelconques : Analyse spectrale

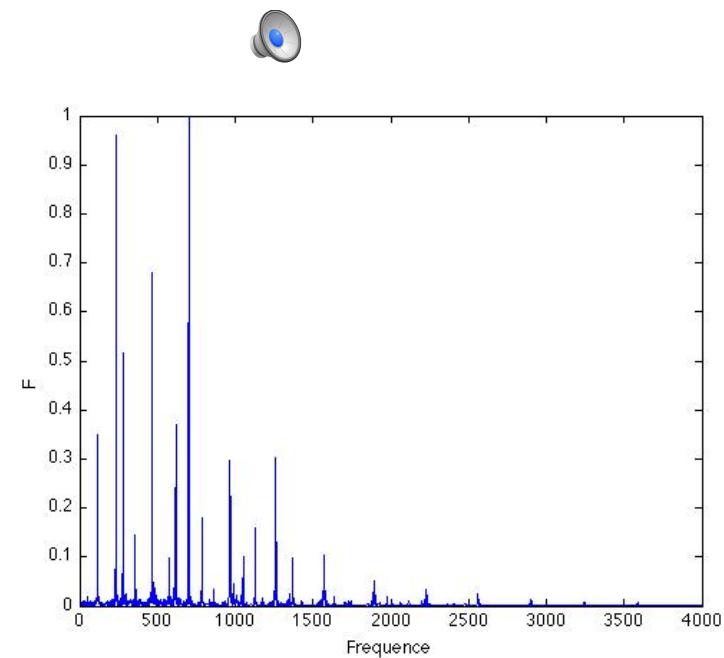
Signal non périodique

- La transformée de Fourier permet de déterminer l'évolution de la courbe du spectre (spectre continu)
- Si le signal est échantillonné (son numérique), la transformée de Fourier discrète (DFT – avec le cas particulier de l'algorithme FFT) permet de calculer des points de la courbe du spectre

Exemple



Représentation temporelle



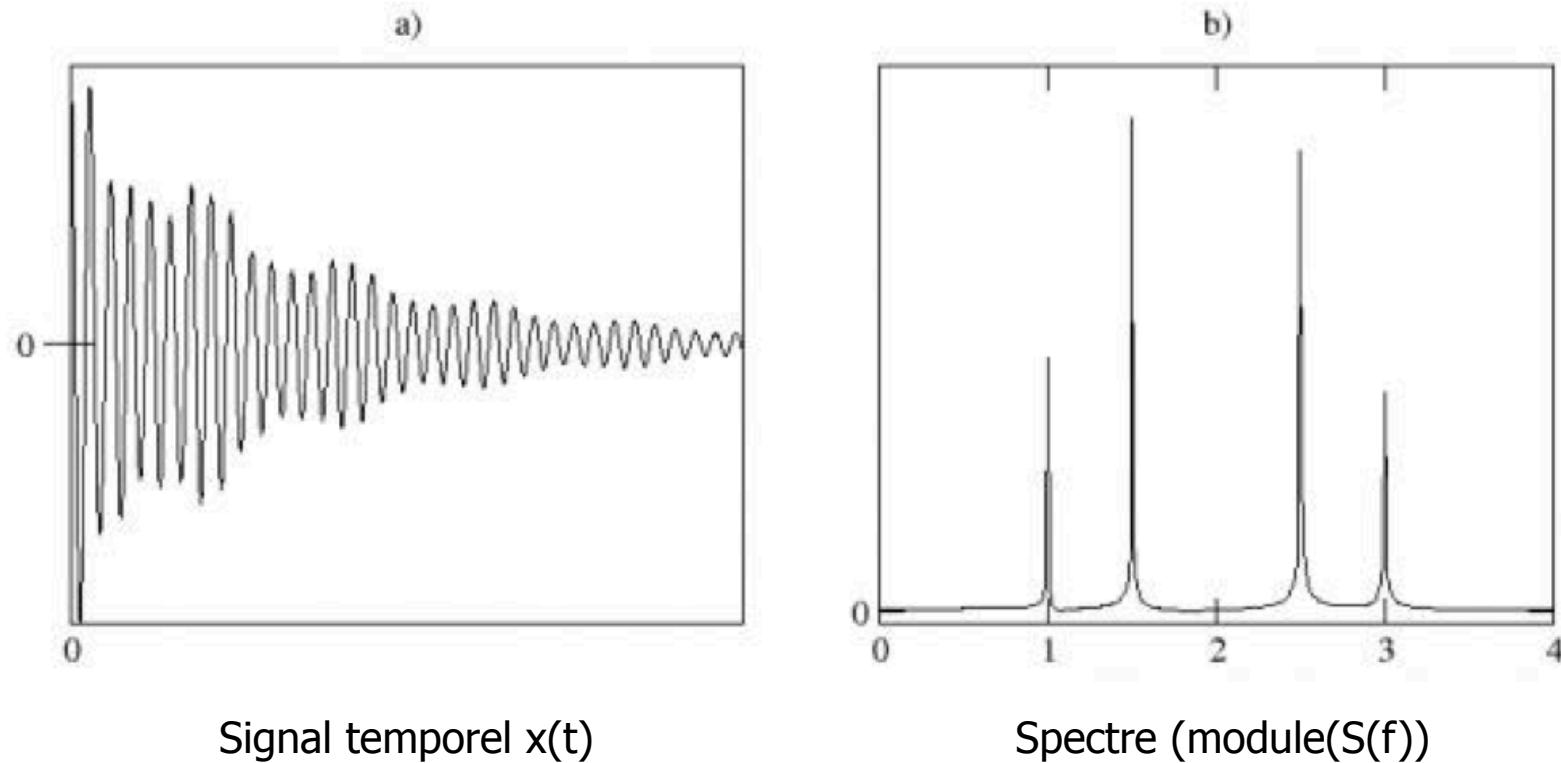
Représentation spectrale (FFT)

Rappel : Transformée de Fourier

- La transformée de Fourier d'un signal $x(t)$ est donnée par :

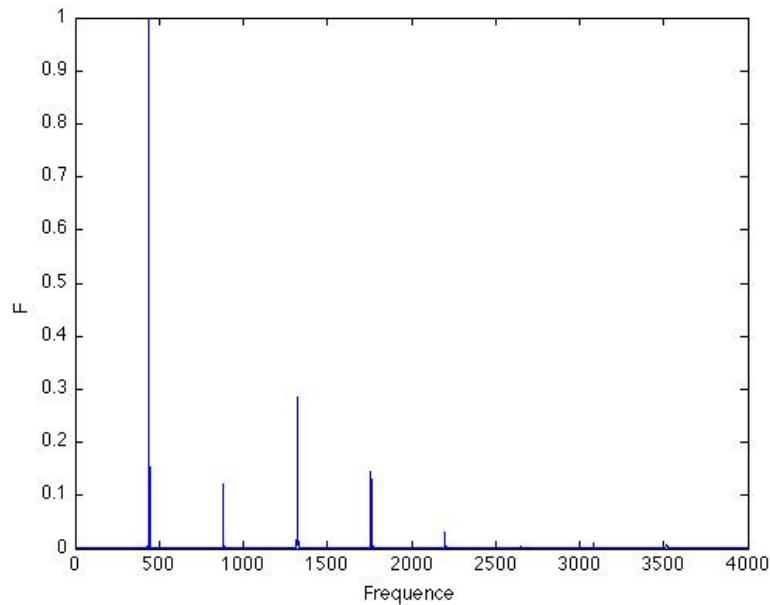
$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

Cette transformation donne une fonction complexe $S(j\omega)$ dont on extrait le spectre en prenant le module $S(\omega)$ en se limitant au fréquences positives

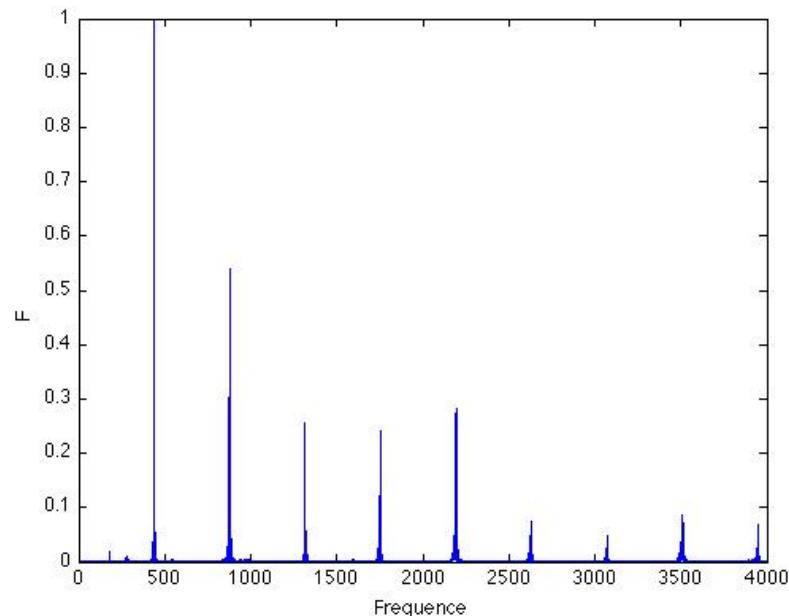


Analyse spectrale

- ◆ L'analyse spectrale est un premier moyen pour caractériser le timbre d'un son, d'un instrument, d'une voix
- ◆ Elle représente le niveau moyen des harmoniques d'une note



clarinette

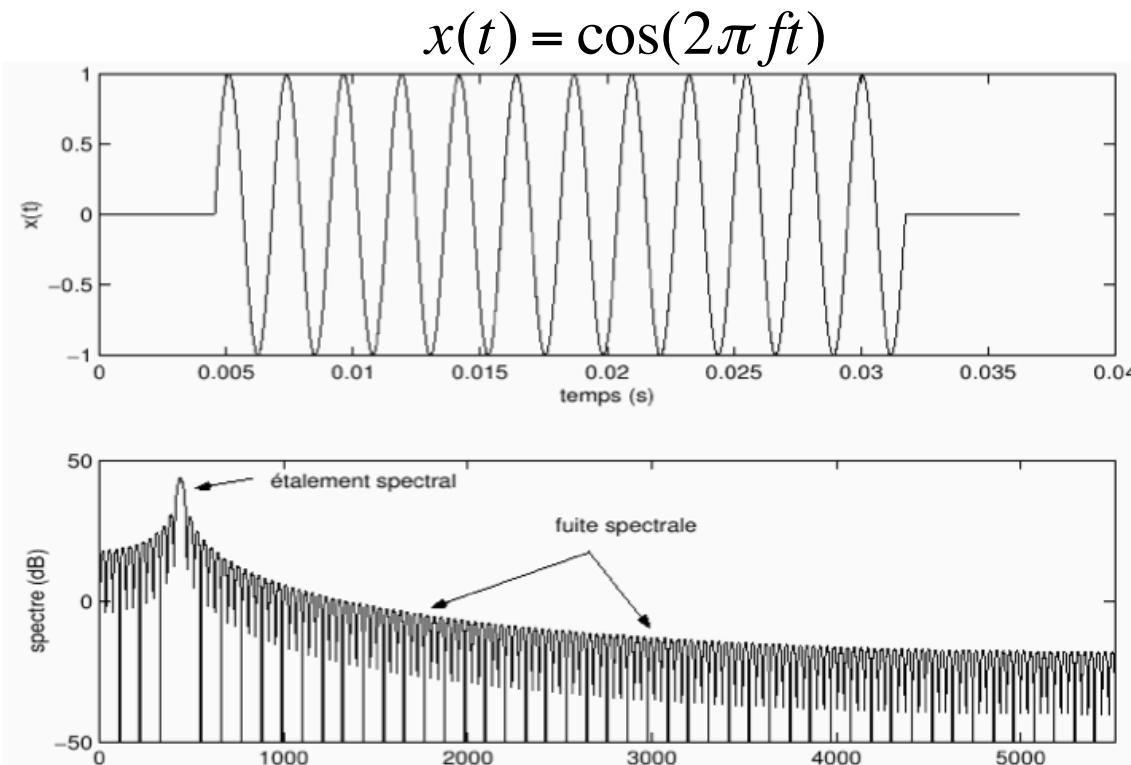


violon



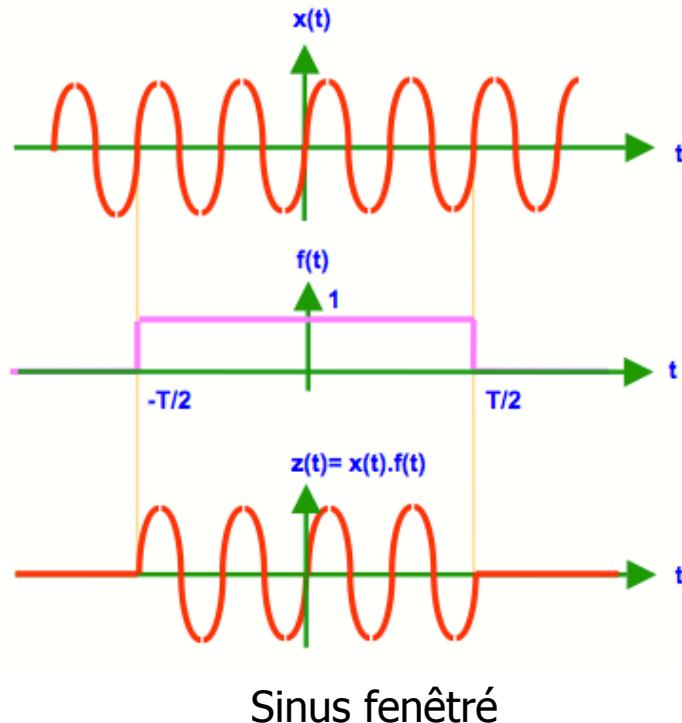
Influence de la fenêtre d'analyse

- ◆ Les signaux sont toujours de durée limitée (Support temporel fini)
 - Multiplication du signal par une fenêtre d'analyse (exemple : fenêtre rectangulaire)
- ◆ Cette multiplication a deux conséquences sur l'analyse spectrale :
 - L'étalement spectral
 - La fuite spectrale
- ◆ Différentes fenêtres
 - Rectangulaire
 - Kaiser
 - Hamming
 - Hanning
 - Blackman

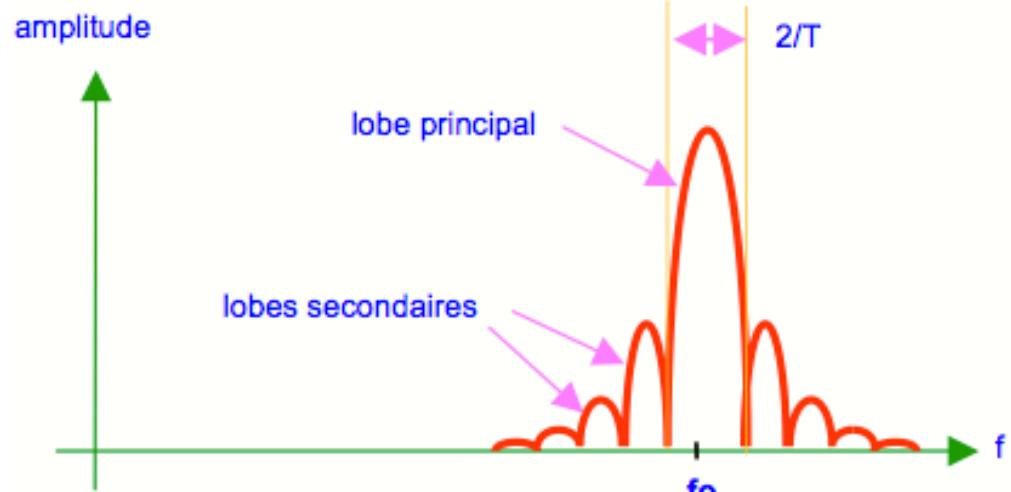


Différents compromis fuite/étalement en fonction du choix de la fenêtre d'analyse (voir cours)

Exemple : cas du sinus + fenêtre rectangulaire



Sinus fenêtré



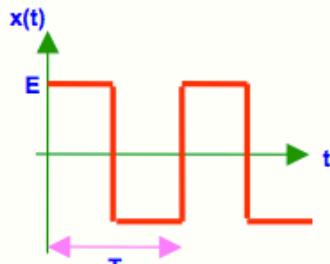
Spectre : sinus cardinal

Conséquence : un signal de durée finie n'est pas à bande de fréquence limitée

Il existe des contributions (certes très faibles) sur toute la bande de fréquence)

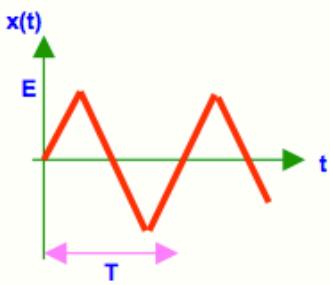
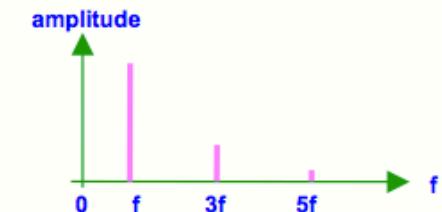
Spectre usuel de formes d'ondes classiques

oscilloscopogramme

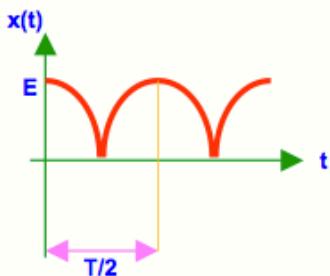
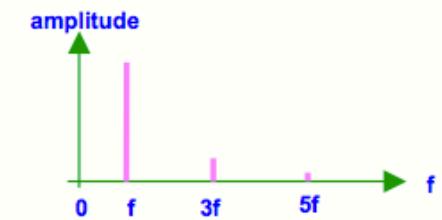


$$x(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \frac{\sin(5\omega t)}{5} + \dots \right]$$

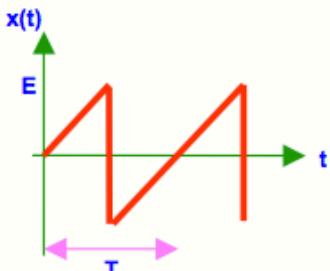
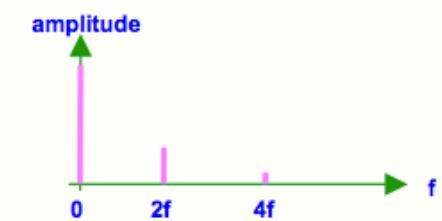
spectre



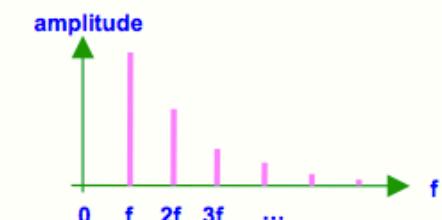
$$x(t) = \frac{8E}{\pi^2} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(3\omega t)}{3^2} + \frac{\sin(5\omega t)}{5^2} - \dots \right]$$



$$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[1 + \frac{2 \cos(2\omega t)}{3} - \frac{2 \cos(4\omega t)}{15} + \dots \right]$$



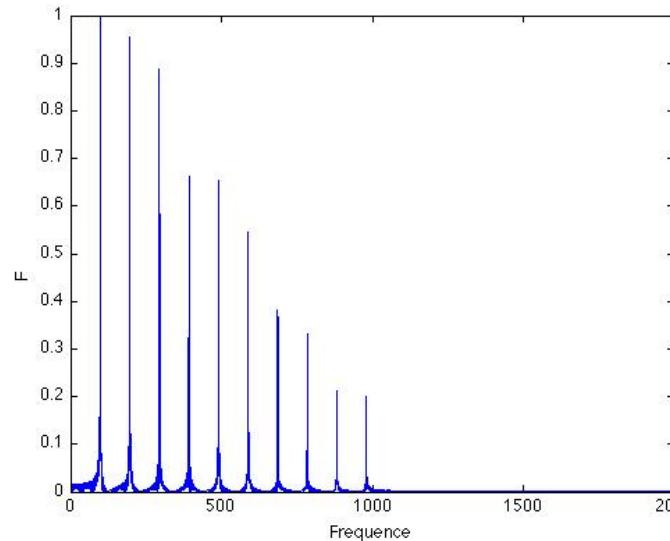
$$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(2\omega t)}{2} + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \dots \right]$$



Analyse spectrale

Représentation spectrale

- Donne une information globale "moyenne" sur tout le signal
- Adaptée pour les sons périodiques bien établis (régime permanent)
- Impossible de "suivre" l'évolution du signal



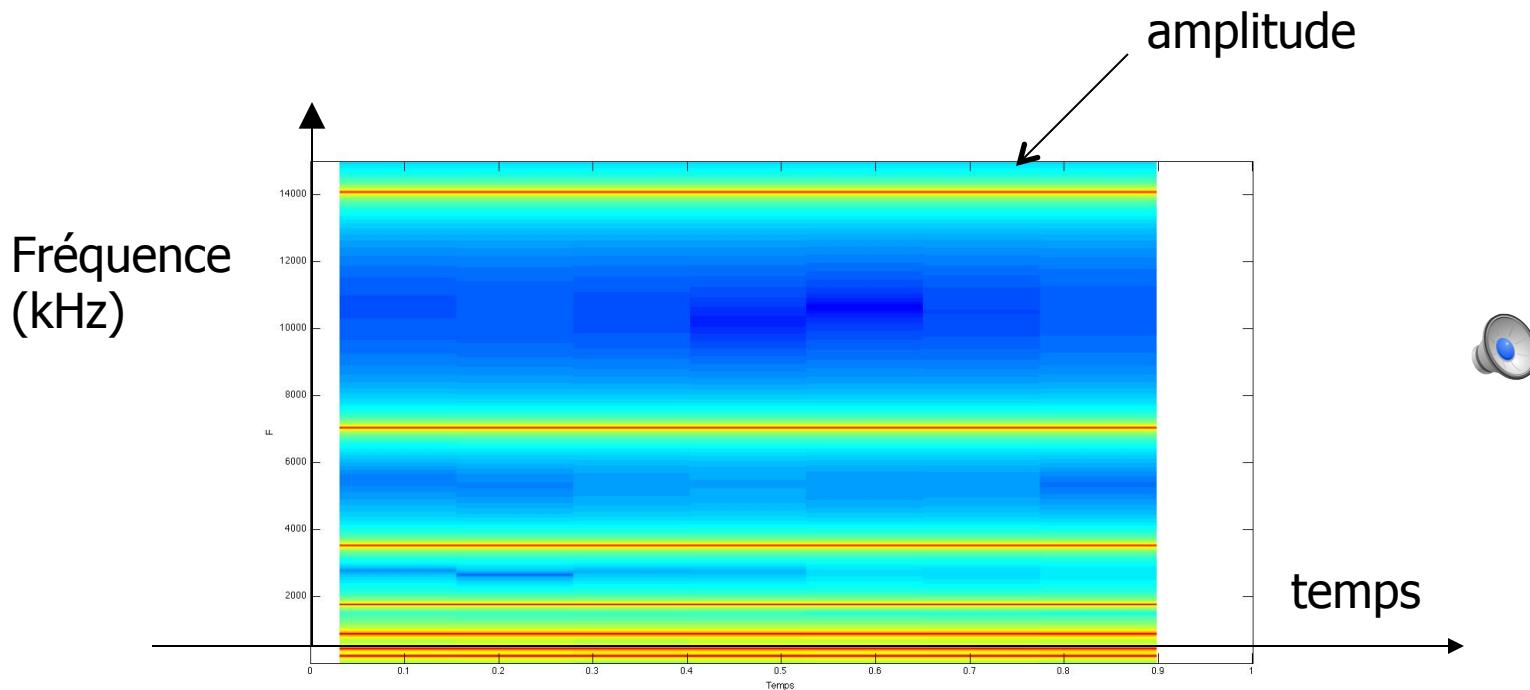
=>Analyse temps - fréquence



Représentations temps/fréquence

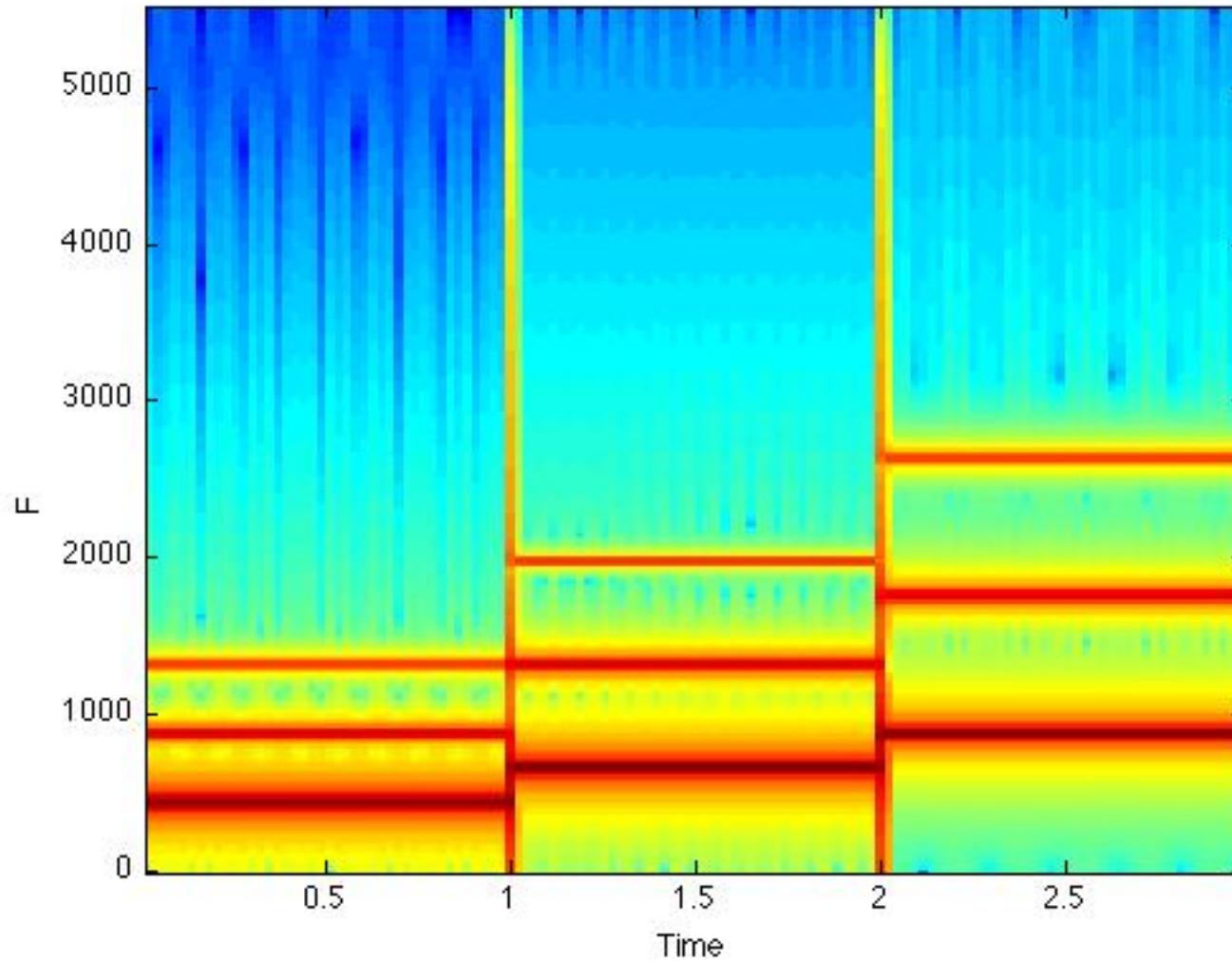
- Spectrogramme (*SonagrammeTM*)

- Basé sur une Transformée de Fourier à court terme (TFCT sur des trames temporelles qui se recouvrent)
- Compromis précision fréquentielle/résolution temporelle)
 - pour avoir une bonne précision fréquentielle, il faut une trame longue, comportant beaucoup de points – pour avoir une bonne résolution temporelle, il faut considérer beaucoup de trames, courtes, donc de nombreuses fenêtres d'analyse



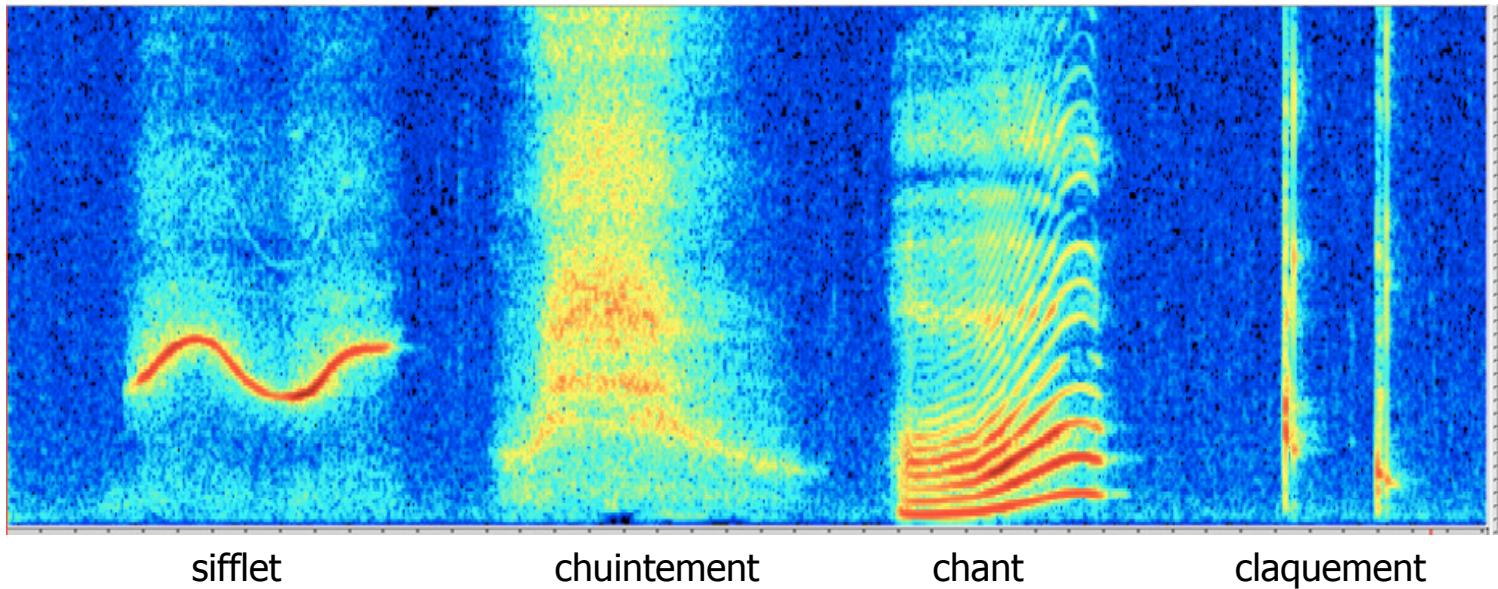
Spectrogramme

- Représentation temps/fréquence



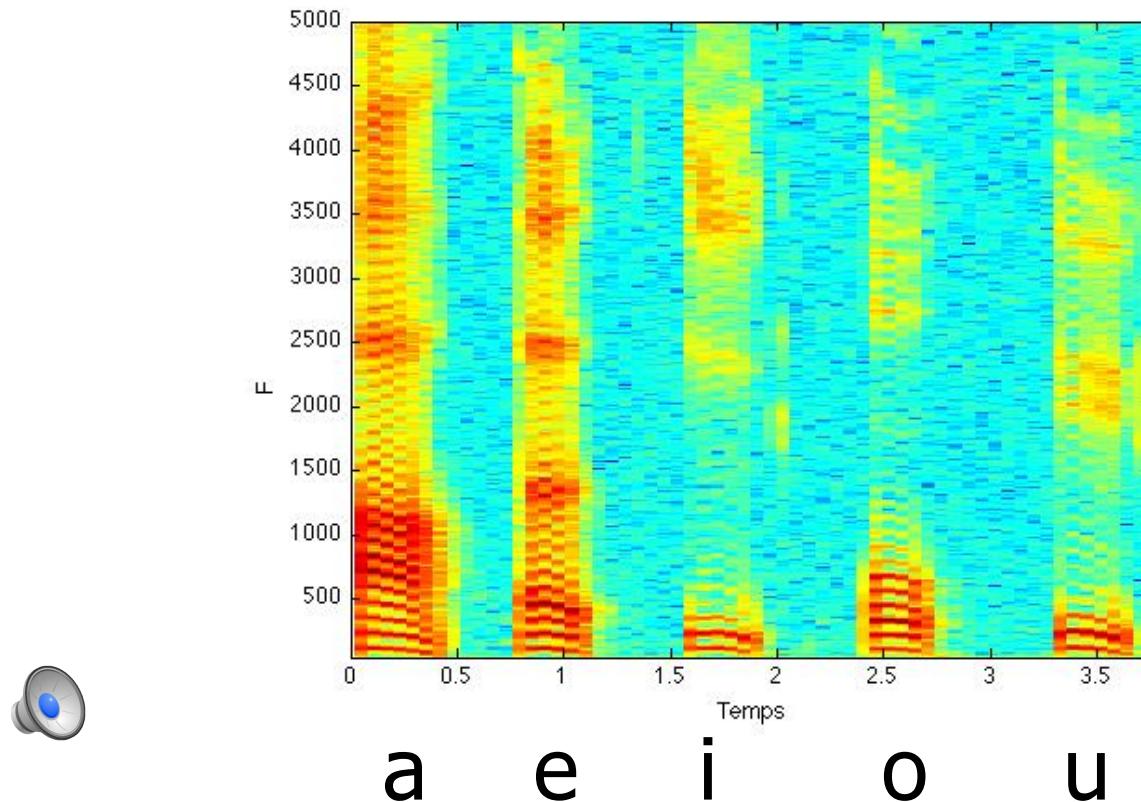
Spectrogramme

- exemple



Spectrogramme

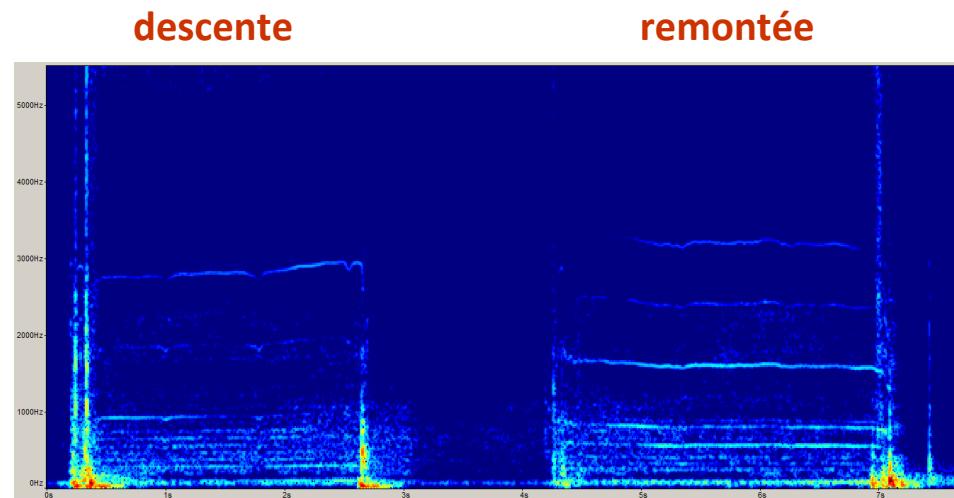
- Représentation temps/fréquence
 - un outil idéal pour visualiser et “lire” les sons :
 - A UTILISER SANS MODÉRATION !



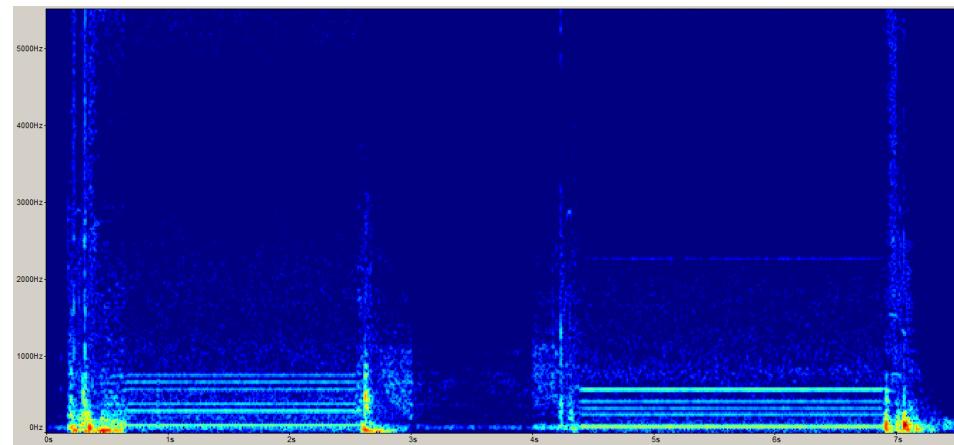
Lève vitre [source Genesis]



original

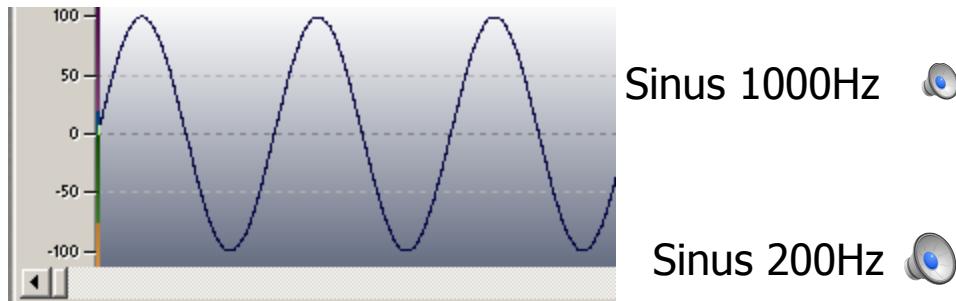


modifié



Différentes familles de sons

- 1 : Son pur
 - Une seule fréquence



spectre

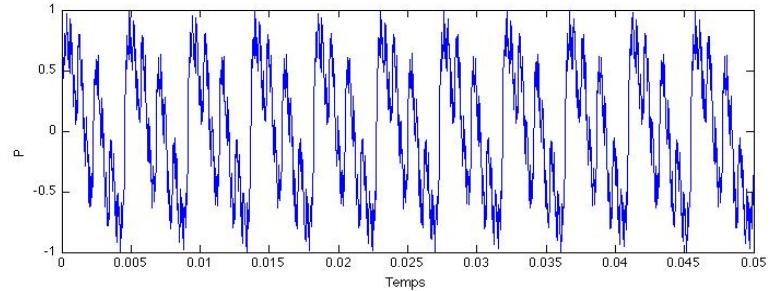
- 2 : Son complexe harmonique
 - Son par essence périodique
 - Superposition de sinusoïdes, dont les fréquences sont multiples de la FREQUENCE FONDAMENTALE F
 - Spectre de raies (on parle d'**harmoniques**)

$$\text{Fréquence de l'harmonique } n: F_n = n \times F$$

NB : La fondamentale correspond à l'harmonique 1

Les différentes harmoniques d'une note

- Son complexe harmonique

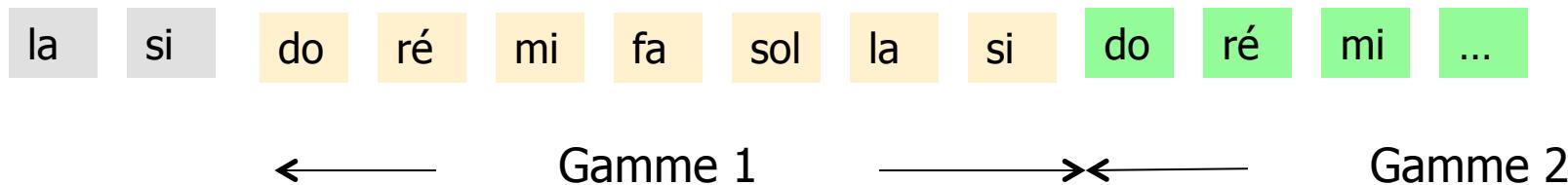


harmonique	freq	
Harmonique 1	F	
Harmonique 2	2F	
Harmonique 3	3F	
Harmonique 4	4F	
Harmonique 5	5F	
Harmonique 6	6F	
Harmonique 7	7F	
Harmonique 8	8F	
Harmonique 9	9F	
Harmonique 10	10F	



Fréquences des notes : Le tempérament égal

- Les notes de la gamme : gamme diatonique occidentale : 7 notes



- La “distance” entre deux notes s’appelle un **intervalle**
- L’octave** est l’intervalle qui sépare 2 notes de même nom
- L’intervalle d’octave est défini par un rapport de fréquence de 2

$$\frac{f_{do_2}}{f_{do_1}} = 2$$

Plus généralement

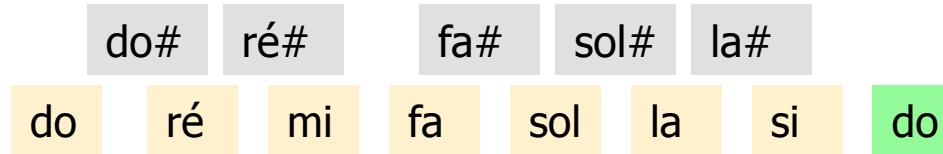
$$\frac{f_{do_n}}{f_{do_{n-1}}} = 2$$

- Pour fixer les fréquences des notes, il faut se fixer une référence
- La norme ISO16 fixe la fréquence du La3 (A4 pour les anglo-saxons) à 440Hz**

$$f_{la_3} = 440 \text{ Hz}$$

Fréquences des notes : Le tempérament égal

- On crée 12 notes dans une gamme (gamme chromatique)



- On choisit que le rapport de fréquence entre 2 notes consécutives de la gamme soit le même, quelque soient les notes
- Quel est ce rapport ?

$$\frac{f_{X_n}}{f_{X_{n-1}}} = \sqrt[12]{2}$$

- Comment trouver la fréquence d'une note X en connaissant la fréquence d'une référence X_0 , et le nombre de demi tons n qui séparent X de X_0 ?

$$\frac{f_X}{f_{X_0}} = (2)^{\frac{n}{12}}$$

Fréquences des notes : Le tempérament égal

- Tableau des fréquences (Hz) des notes de la gamme

$F_X/F_{La3} = 2^{n/12}$; n étant le nombre de demi-tons séparant X de La3

	-1	0	1	2	3	4
do	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50
si	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77
la#	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33
la	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00
sol#	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61
sol	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99
fa#	23,12	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99
fa	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46
mi	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26
ré#	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25
ré	18,35	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33
do#	17,32	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37

Attention à la notation anglosaxone

- notes de la gamme en lettres



Le La3 correspond au A4 $f_{A4} = 440 \text{ Hz}$

	0	1	2	3	4	5
C	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50
B	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77
A#	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33
A	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00
G#	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61
G	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99
F#	23,12	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99
F	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46
E	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26
D#	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25
D	18,35	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33
C#	17,32	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37

Le centième de demi-ton : le cent

Un cent correspond à un rapport de fréquence d'un centième de demi-ton

Unité très pratique pour évaluer des défauts de justesse

L'écart **d'un cent** correspond au rapport : $\sqrt[1200]{2}$

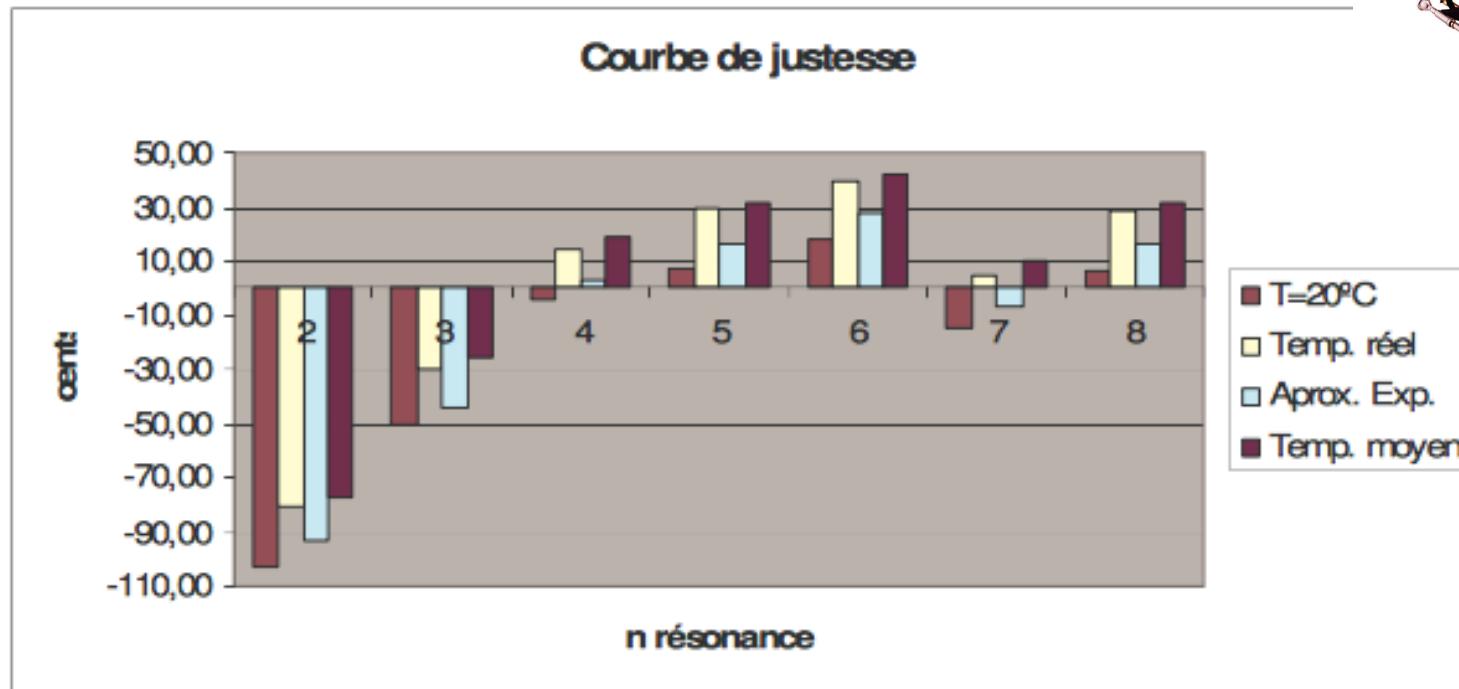
L'écart en cent de deux notes de fréquence f1 et f2 est donné par :

$$ecart(cent) = 1200 \cdot \log_2 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)$$

Ex : Le seuil de sensibilité (JND) de l'oreille humaine pour des différences de fréquence est d'environ 5 cents (cf. tests d'écoute)

Exemple : Diagramme de justesse (en cent)

Justesse d'un instrument à vent en fonction de la température T°



Exemple : inharmonicité du piano



Modes de flexion d'une corde vibrante

$$f_n = n \cdot \sqrt{1 + Bn^2} \cdot \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} = nf_0 \sqrt{1 + Bn^2}$$

f_n : fréquence propre des modes

T : tension

μ : masse par unité de longueur

Inharmonicité vient du terme $\sqrt{1 + Bn^2}$ et est due à la raideur des cordes

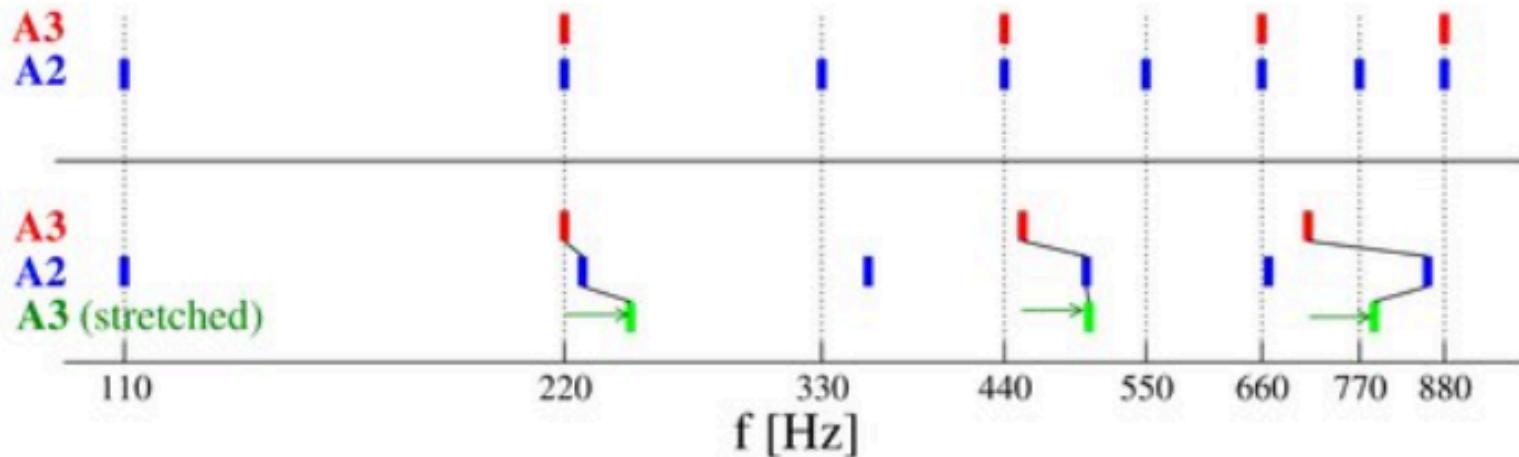
Conséquence : tenir compte de l'inharmonicité pour l'accord

$$B = \frac{\pi^2 E \cdot I}{T \cdot L^2}$$

Exemple : 2 notes A2 et A3 (à l'octave l'une de l'autre)

harmonic:
 $B=0$

A3
A2

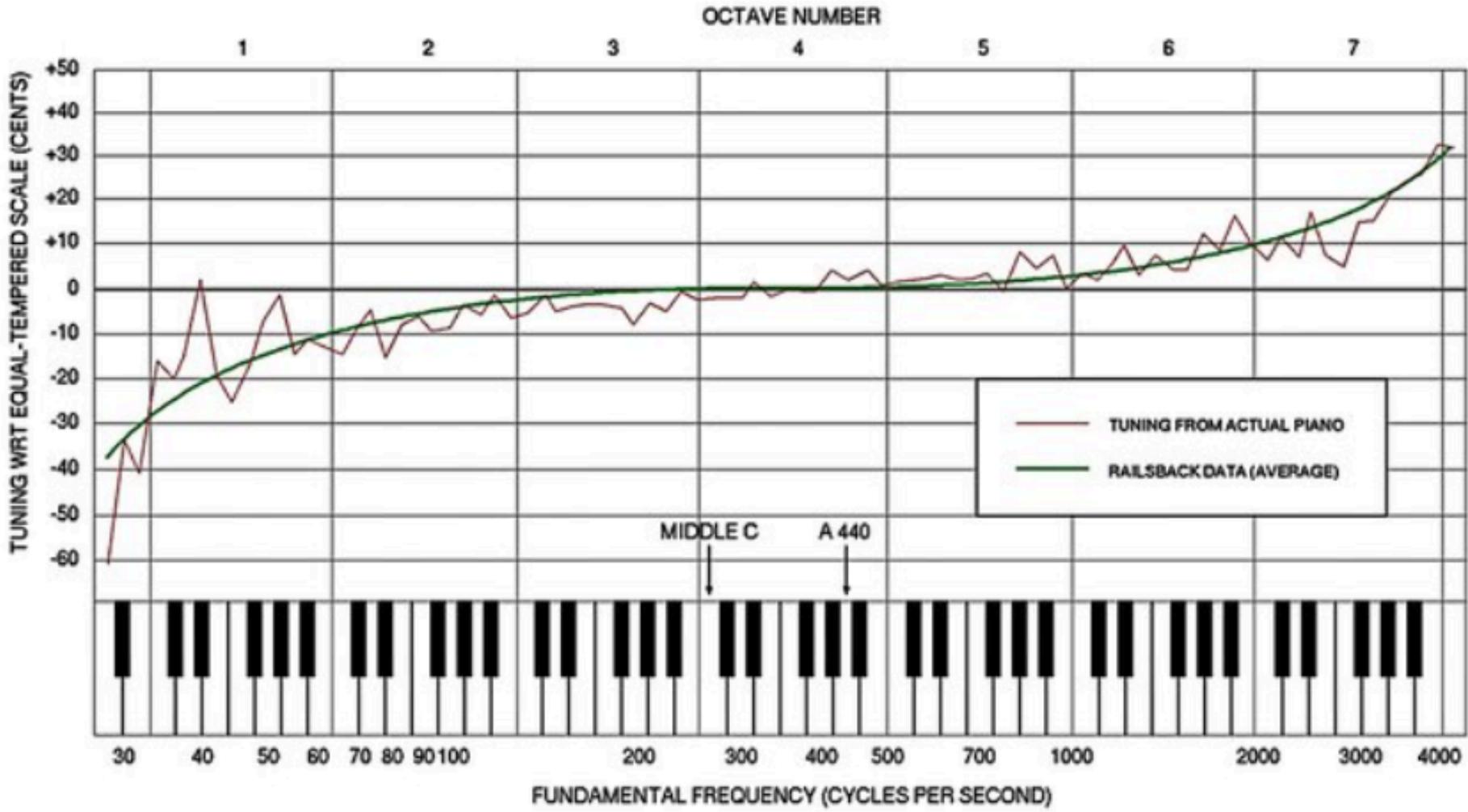


inharmonic:
 $B=0.02$

A3
A2
A3 (stretched)

Exemple : accord du piano

Déviation par rapport au tempérement égal

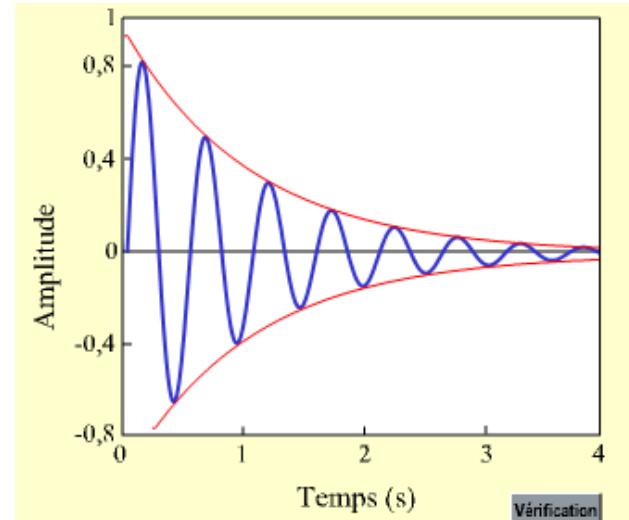


- Différentes familles de sons (2)

- Son pseudo-périodique
 - Formellement non périodique

Le signal revient périodiquement à un maximum (mais ce maximum n'est pas le même)

Cas des instruments en oscillation libre



- Son quasi-périodique [théorie des systèmes dynamiques]

Cas des instruments en auto-oscillation



Sons multiphoniques
(cuivres, flutes)

Son avec deux pulsations ω_1 et ω_2 dans un rapport non rationnel

Notes du loup (violoncelle)
couplage mode de caisse et mode de corde)

- Différentes familles de sons (2)

- 3 : Son complexe inharmonique

- Non périodique
 - Superposition de sinusoïdes, dont les fréquences n'ont pas de rapports particuliers entre elles
 - Spectre de raies (on parle de **partiels**)
 - Exemples : cloches



Sinus 450HZ + sinus 650Hz

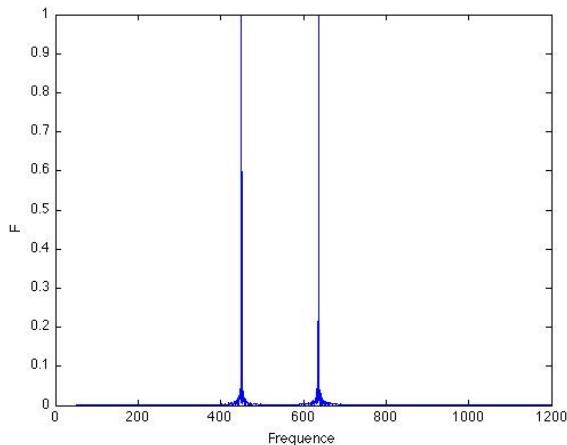
Quarte augmentée

Exemple : carillon

0,5 ; 1 ; 1,2 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 3

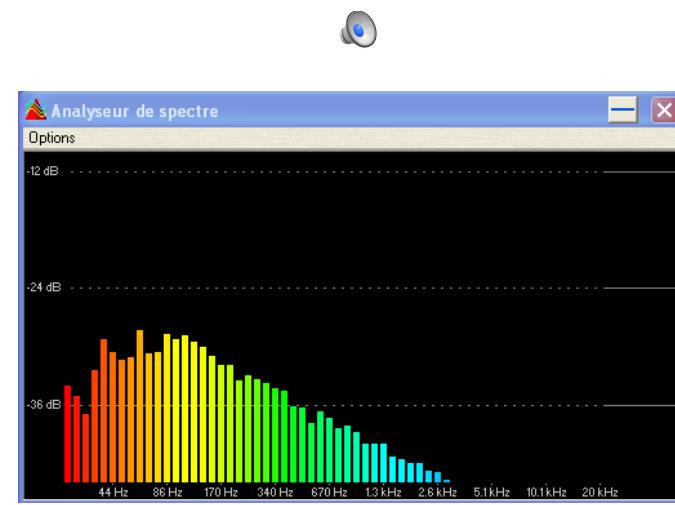


Indétermination
de la hauteur



Bruits

- Distribution spectrale continue dans une bande de fréquence
- Bruits normalisés (mesures acoustiques)
 - » Blanc (énergie uniforme sur toute la bande f)
 - » Rose (densité d'énergie en $1/f$)
- Utiles pour mesurer la réponse de systèmes (salle, haut parleur, instrument de musique)



Les sons musicaux

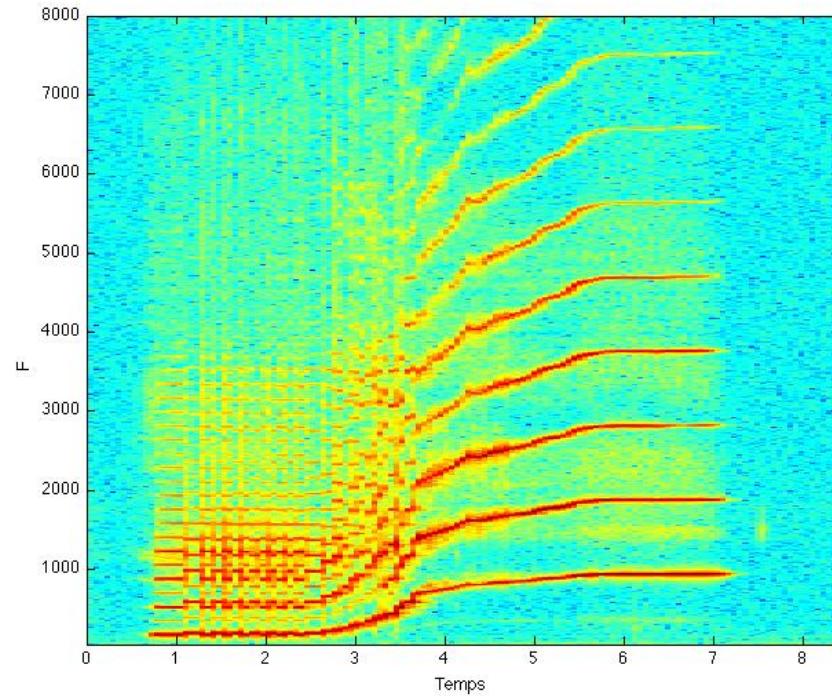
- Complexes !
 - Variation au cours du temps de :
 - Hauteur
 - Intensité
 - Timbre
 - Transitoires d' attaque et d' extinction

- sonagramme



Clarinette
Gershwin

Ex : audioXplorer



Son modulé en fréquence

- Exemple : sirène

Porteuse de **fréquence f**
modulée à une **fréquence f₁**

$$F = f + \beta \cos(2\pi f_1 T)$$

- Calcul du signal temporel correspondant

Par définition, la pulsation est
la dérivée de la phase :

$$\omega = \frac{d\phi}{dt}$$

$$F = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = 2\pi \int_0^t F dT = 2\pi(f.t + \beta \frac{\sin(2\pi f_1 t)}{2\pi f_1})$$

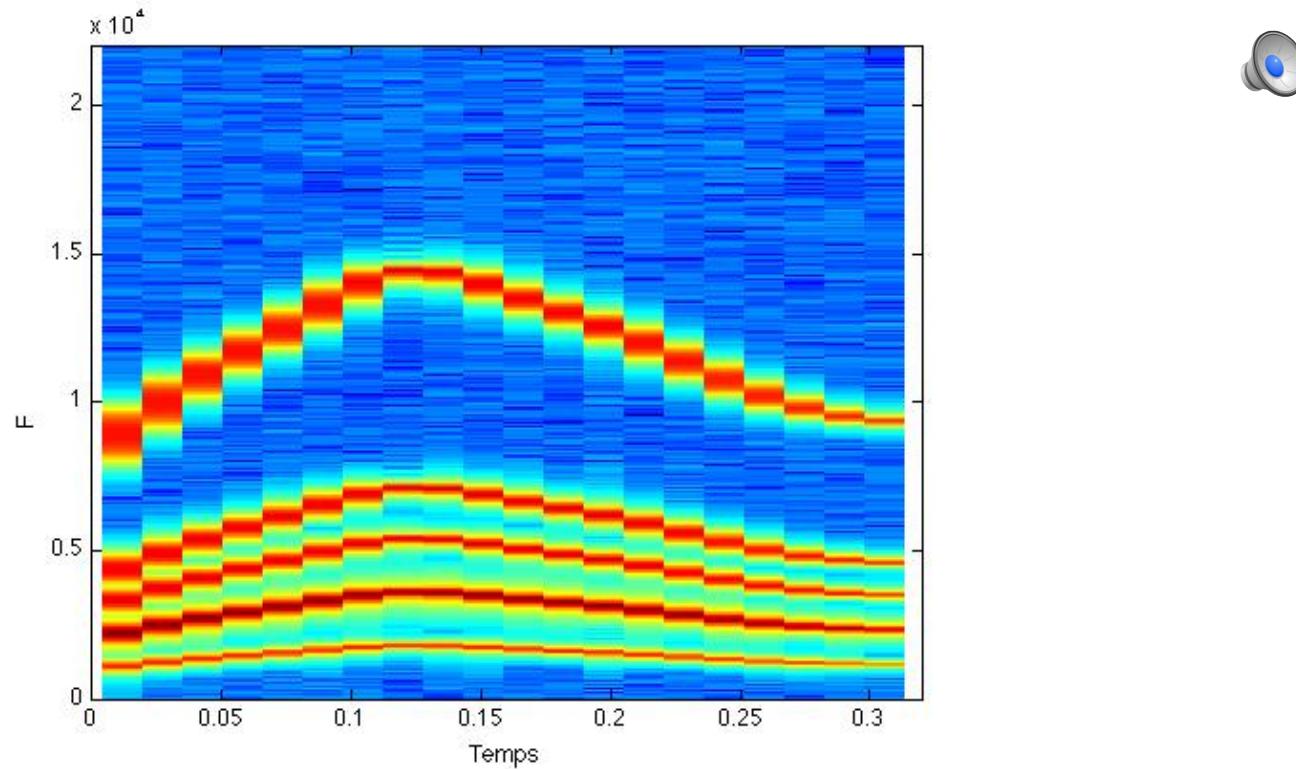
Le signal temporel est donc :

$$s(t) = \sin(\phi) = \sin(2\pi ft + \beta \sin(2\pi f_1 t) / f_1)$$



Son modulé en fréquence

- Exemple 2 : “chirp” (gazouilli)



Les attributs d'un son musical

Perceptifs	Physiques
Intensité Hauteur Durée Timbre	Amplitude Fréquence Temps Spectre

Timbre

*“attribut qui distingue deux sons qui ont même **hauteur**, même **durée** et même **intensité**”*

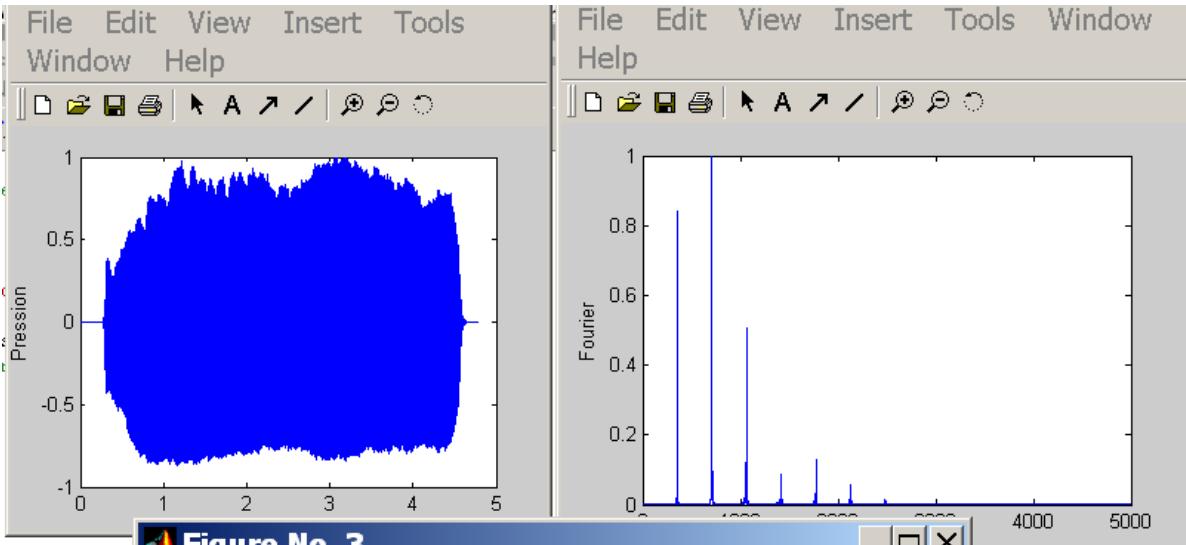
clarinette 

orgue 

mélodica 

synthé 

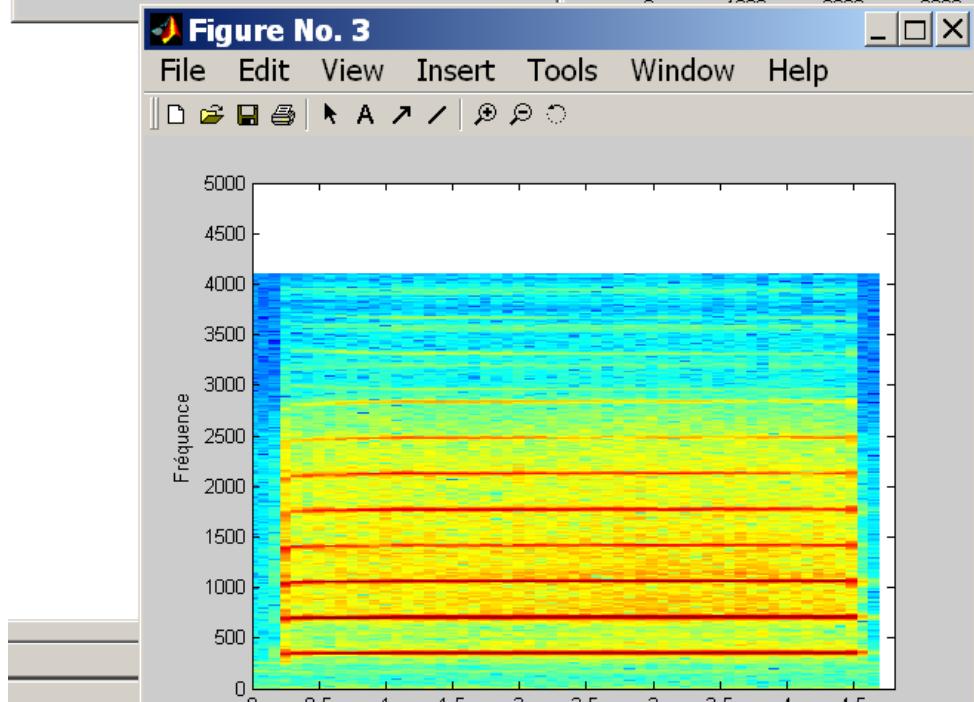
- Programme matlab
 - Test_son.m



AudioXplorer

Audacity

Sonic Visualizer



Quelques descripteurs caractéristiques d'un signal sonore

A_i, amplitude de l'harmonique "i"

Centre de gravité spectral CGS

Irrégularité spectrale IRR

Rapport signal bruit R_{sb}

$$P_{RMS} = \left(\frac{1}{nT} \cdot \int_0^{nT} p(t)^2 dt \right)^{1/2}$$

$$Pb_{RMS} = \left(\frac{1}{nT} \cdot \int_0^{nT} b(t)^2 dt \right)^{1/2}$$

$$CGS = \frac{\sum_n n A_n}{\sum_n A_n}$$

$$IRR = \sum_{k=2}^{n-1} \left(A_k - \frac{A_{k+1} + A_k + A_{k-1}}{3} \right)$$

$$R_{sb} = 100 \cdot \frac{P_{RMS}}{Pb_{RMS}}$$

$$b(t) = p(t) - ph(t)$$

$$ph(t) = \sum_{k=1}^p A_k \cos(2\pi k f_0 t + \varphi_k)$$

Quelques descripteurs caractéristiques d'un signal sonore

Tristimulus TR1, TR2, TR3

$$TR1 = \frac{A_1^2}{\sum_{k=1}^N A_k^2}$$

$$TR2 = \frac{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2}{\sum_{k=1}^N A_k^2}$$

$$TR3 = \frac{\sum_{k=5}^N A_k^2}{\sum_{k=1}^N A_k^2}$$

Harmonic distortion HD

$$HD = \frac{\sum_{k=6}^N A_k^2}{\sum_{k=1}^3 A_k^2}$$

Odd, Even spectral centroid OSC, ESC

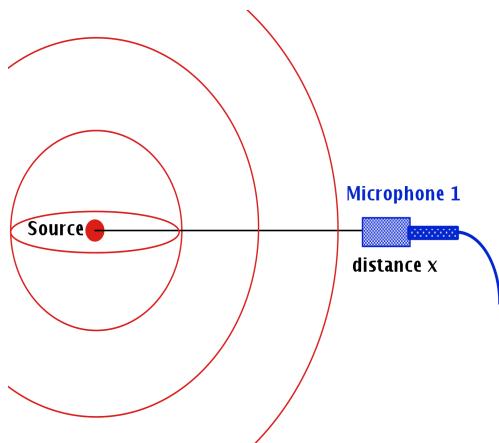
$$ESC = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} A_{2k}^2}{\sum_{k=1}^N A_k^2}$$

$$OSC = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} A_{2k-1}^2}{\sum_{k=1}^N A_k^2}$$

Eléments d'acoustique

Onde sonore

- Variation de pression $p(x, y, z, t)$ dans le milieu considéré



$$p_{\text{abs}} = p_{\text{atmos}} + p_{\text{acoust}}$$

Ordre de grandeur

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{\text{atmos}} \approx 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \\ 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \leq p_{\text{acoust}} \approx 200 \text{ Pa} \end{array} \right.$$

- Si une seule direction de propagation : onde plane $p(x, t)$

Equation des ondes

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = 0$$

c= célérité du son
dans le milieu

Exemple de solution de l'équation des ondes

$$p(x,t) = p_0 \cos(\omega(t - x/c))$$

$$p(x,t) = p_0 \cos(2\pi ft - kx)$$

f= $\omega/2\pi$: fréquence k= ω/c : nombre d 'onde

Unités - Échelle des décibels (dB)

- Soit $p(t)$ la variation locale de pression de l'air

$p(t)$



- Intensité acoustique I

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt$$

Intensité acoustique, Mesurée en Watt

- Pression acoustique efficace (RMS) sur un temps t_i : p_{eff}

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_i} \cdot \int_{T-t_i}^T p^2(t) dt}$$

Mesurée en Pa

Échelle des décibels (dB)

SPL : Sound Pressure Level

- Niveau de pression acoustique L_p : dB SPL

Plutôt qu'un niveau de pression en Pa, on utilise le niveau PAR RAPPORT à un niveau de référence

Le niveau de référence choisi est la pression acoustique est la pression correspondant au seuil moyen d'audition d'un son pur à une fréquence de 1kHz) : il vaut $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Etant donné la très grande amplitude de variation de la pression (de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa à 200Pa : rapport de 1 à 1 000 000), on utilise une échelle \log_{10}

$$L_p(dB) = 20 \log_{10} \frac{p_{eff}}{p_{ref}}$$

$$L_p(dB) = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

- p_{eff} : pression acoustique efficace en Pa
- p_{ref} : $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Particularité de l' échelle des décibels (dB)

- L'échelle n'est pas additive !

Superposer 2 sources de 80dB ne créé pas 160dB

Ce sont les **intensités** qui s'additionnent

$$L_p(dB) = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

- Calcul du niveau en dB correspondant à 2 sources

$$I_1 = I_{ref} 10^{(L_{p1}/10)} \quad I_2 = I_{ref} 10^{(L_{p2}/10)} \quad I_{Tot} = I_1 + I_2 = I_{ref} (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})$$

$$L_{ptot} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{tot}}{I_{ref}} \right) = 10 \log_{10} (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})$$

Superposer 2 sources identiques créé une augmentation de ... $10\log(2)=3$ dB

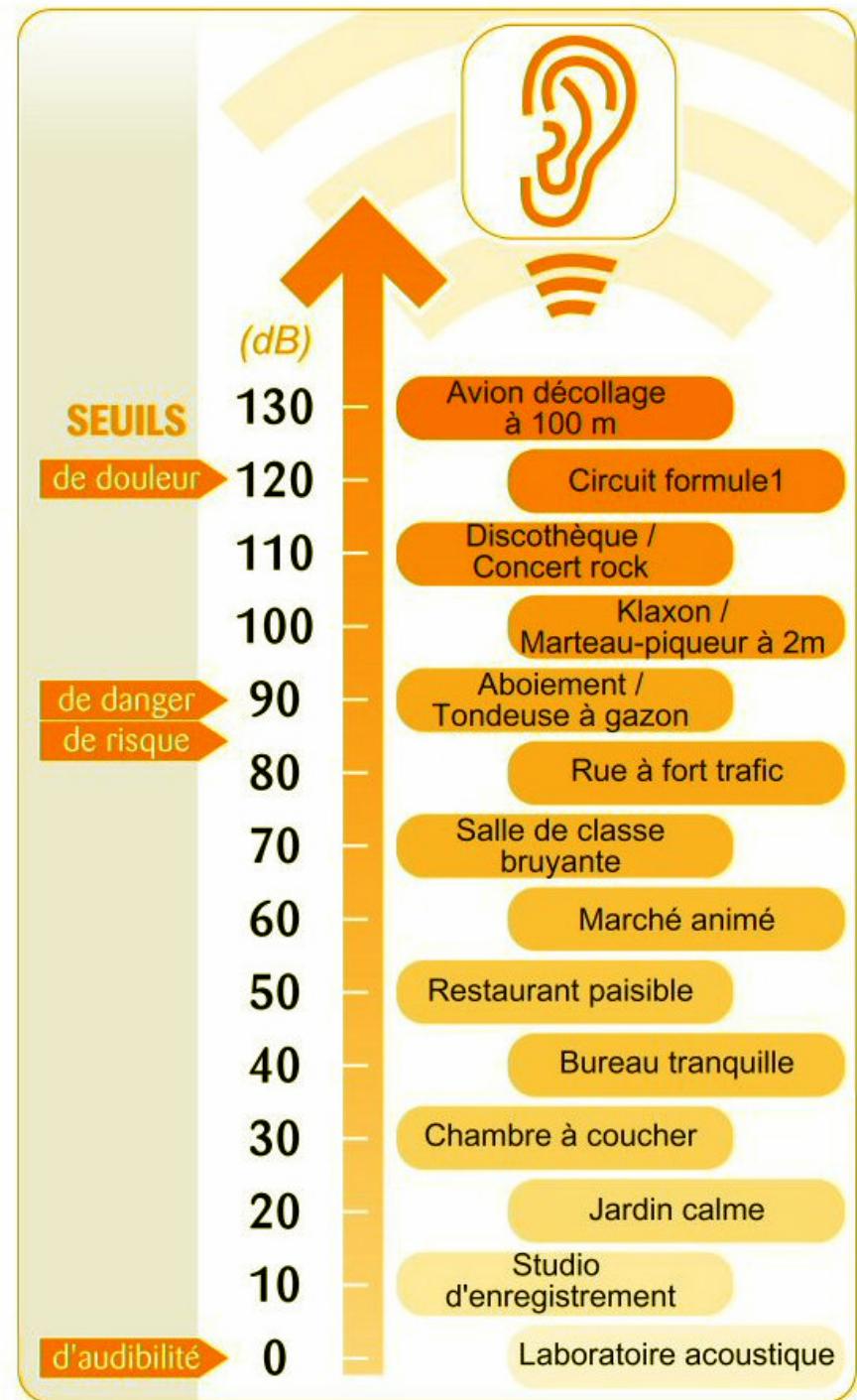
On gagne 3 dB en doublant la puissance

Quelques points de repère de l'échelle des décibels (dB SPL)

NB : l'échelle des décibels SPL est utile pour l'acousticien et pour la mesure.

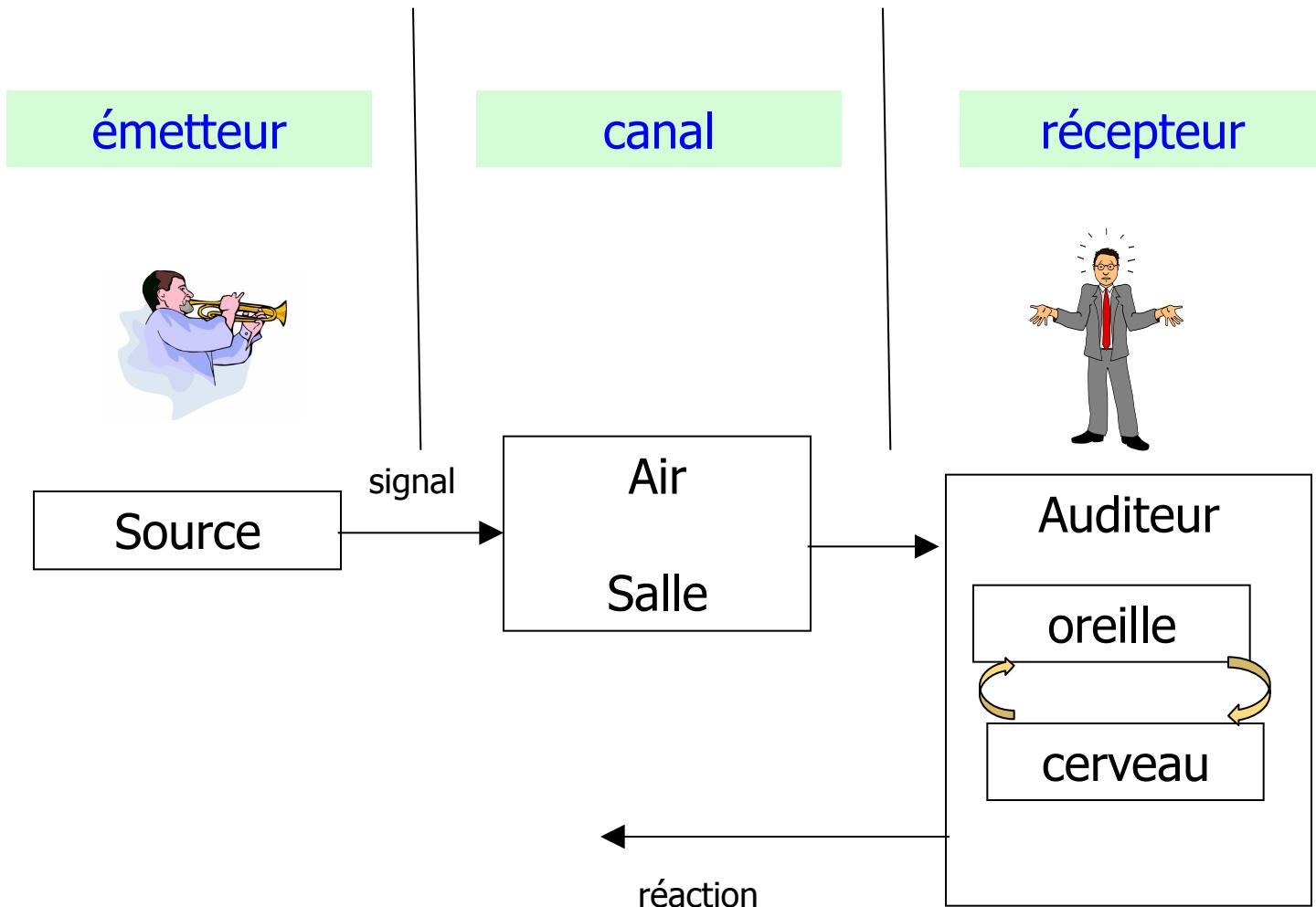
Mais elle est loin d'être représentative des perceptions humaines : elle ne tient pas compte de la sensibilité différentiée en fréquence de l'oreille.

Voir chapitre suivant : dBA, dB_B, dB_C, sonie



Perception acoustique – qualité sonore

La chaîne de communication



La perception

- ◆ Perception = ensemble des processus de traitement de l'information sensorielle
 - Permettent , par l'interprétation des données reçues, , de construire une représentation interne du monde
- ◆ Interaction Homme/environnement est fonction :
 - De l'information captée par le sujet
 - De la rétroaction exercée par lui sur ces données (sélection – organisation, interprétation)
- ◆ La perception mobilise 2 formes de traitement
 - Traitements **ascendants** (bottom-up) dirigés par les données
 - Traitements **descendants** (top-down) dirigés par les concepts ou représentations

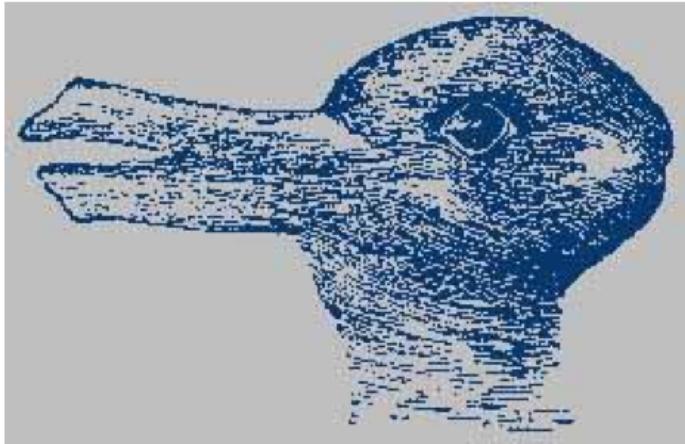
Réduire la perception à une association de sensations ne permet pas de rendre compte des phénomènes en jeu lors de notre perception de l'environnement (théorie Gestalt)

La perception

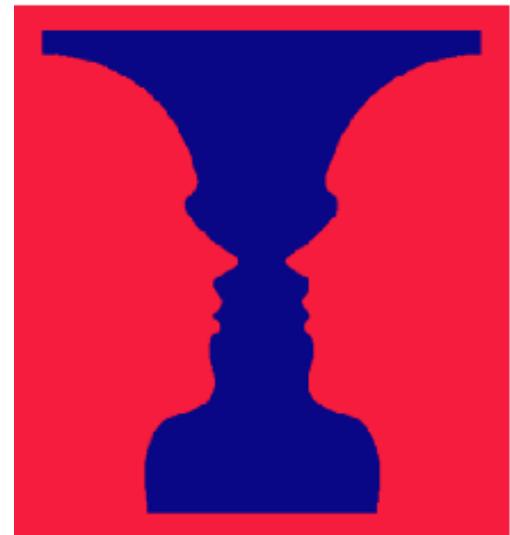
◆ La perception est active

- Nous **sélectionnons**, choisissons ce que nous percevons
- Nous **organisons**, structurons, **interprétons** et donnons un sens aux signes et signaux qui nous parviennent
- Nous créons ce que nous voyons ou entendons

La perception résulte d'un **processus physique et mental** qui utilise nos cinq sens



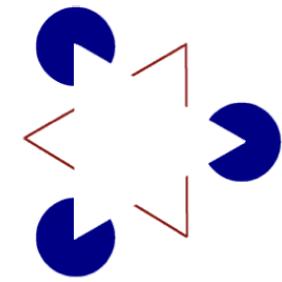
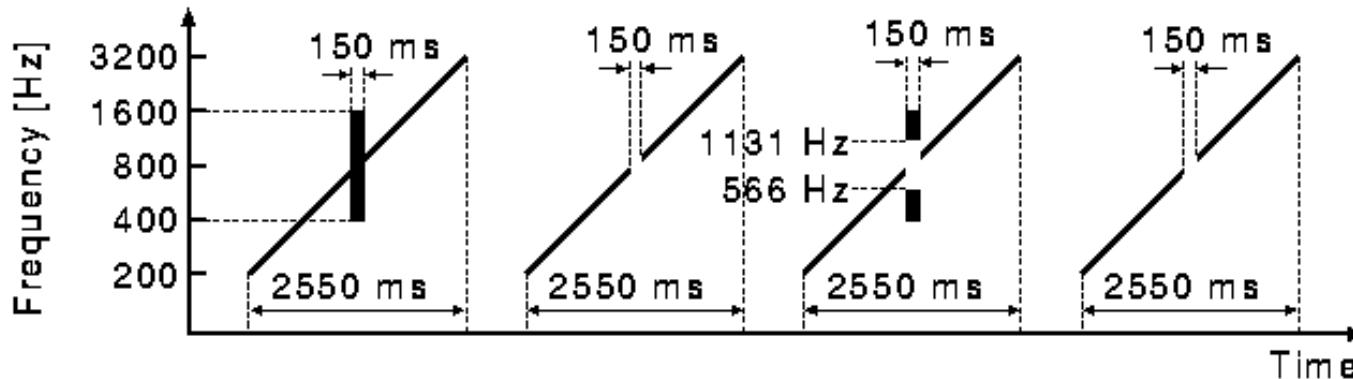
Bistabilité visuelle : Canard ou lapin ?



vase ou visages ?

La perception

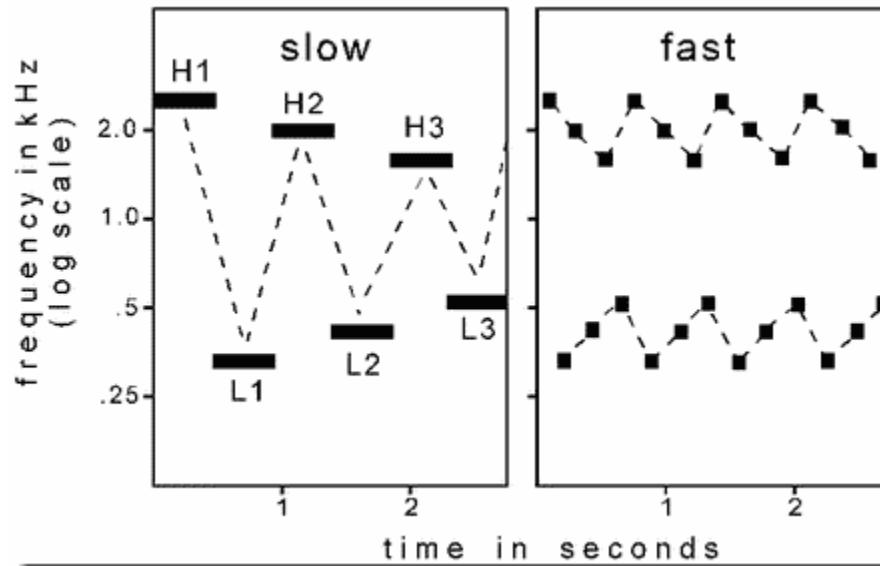
- ◆ Sélection : Facteurs influents :
 - Facteur physiologiques
 - Limites physiologiques de l'oreille humaine : ex : plage de fréquence 20Hz-20kHz)
 - Facteurs environnementaux (contexte, contraste, ...)
 - Facteurs psychologiques
 - Motivation
 - Apprentissages passés
- ◆ Organisation: mise en priorité de certains aspects
- ◆ Interprétation :
 - Prolongement de la réalité
 - Prise en compte du contexte



Flux auditifs [A. Bregman, McGill]

◆ Organisation de scènes auditives

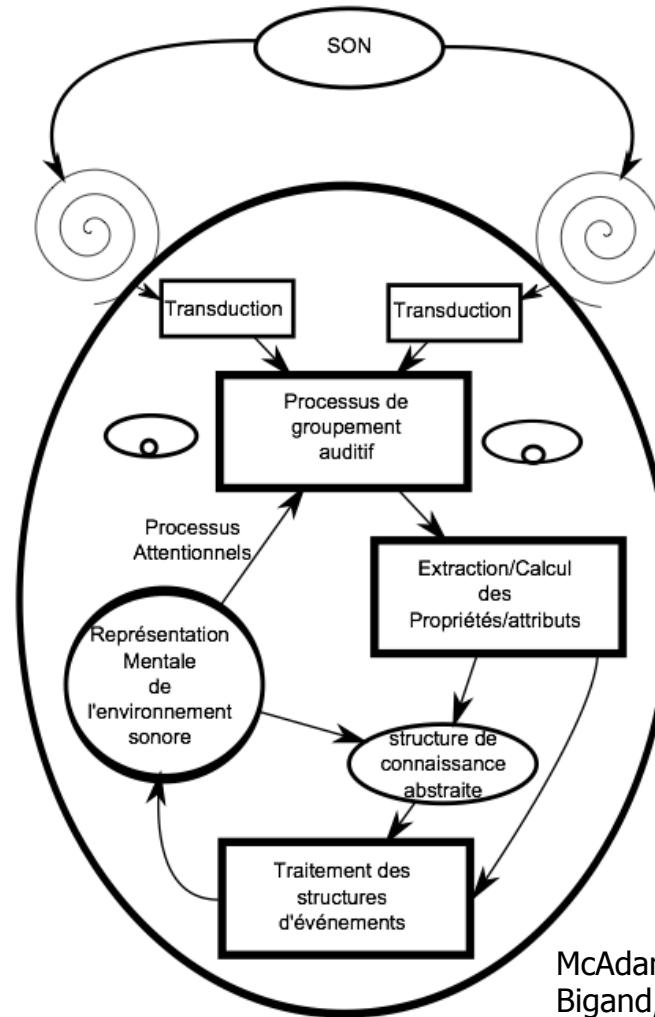
Ségrégation de flux auditifs



On distingue deux flux séparés lorsque la vitesse augmente

La chaîne de traitement de l'information

- ◆ Modèle : plusieurs systèmes interconnectés
 - Transformer une information acoustique en une information sémantique
- ◆ Transduction
 - Oreille interne : attributs spectraux et temporels de l'onde
- ◆ Groupement auditifs
 - Intégration temporelle : créer un flux auditif structuré (ex : les 4 voix d'un choral de Bach)
- ◆ Extraction/calcul de propriétés
 - Perception globale de la structure et de l'organisation temporelle (ex : distinguer la mélodie d'un choral de Bach partagé en plusieurs voix).

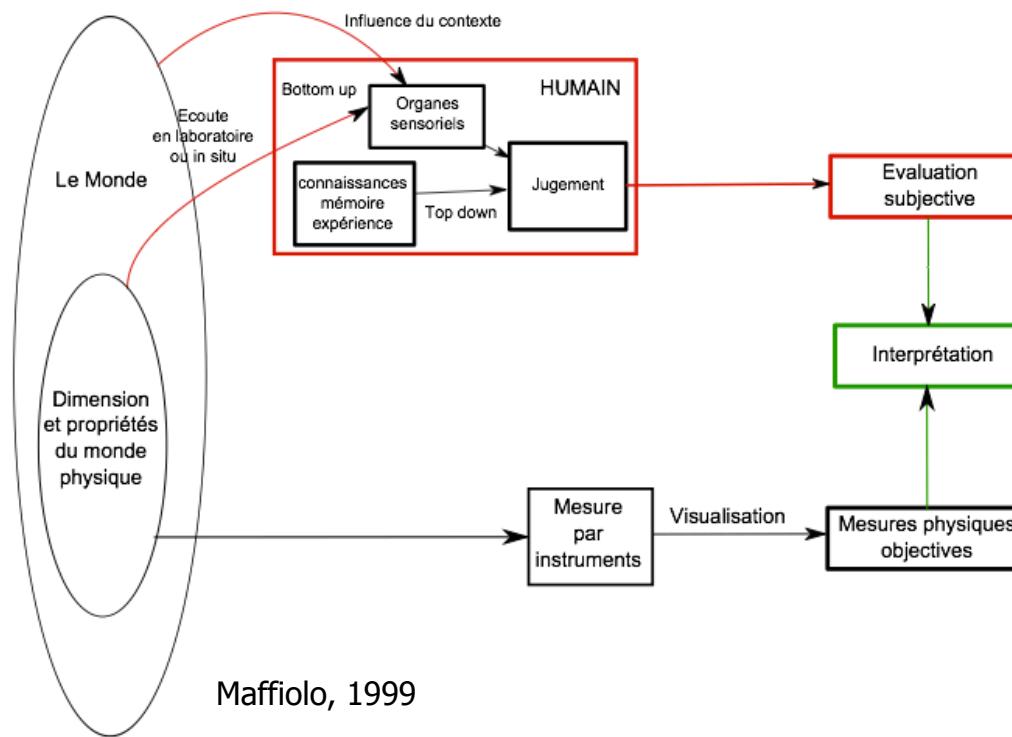


McAdams & Bigand, 1994

Etudier la perception

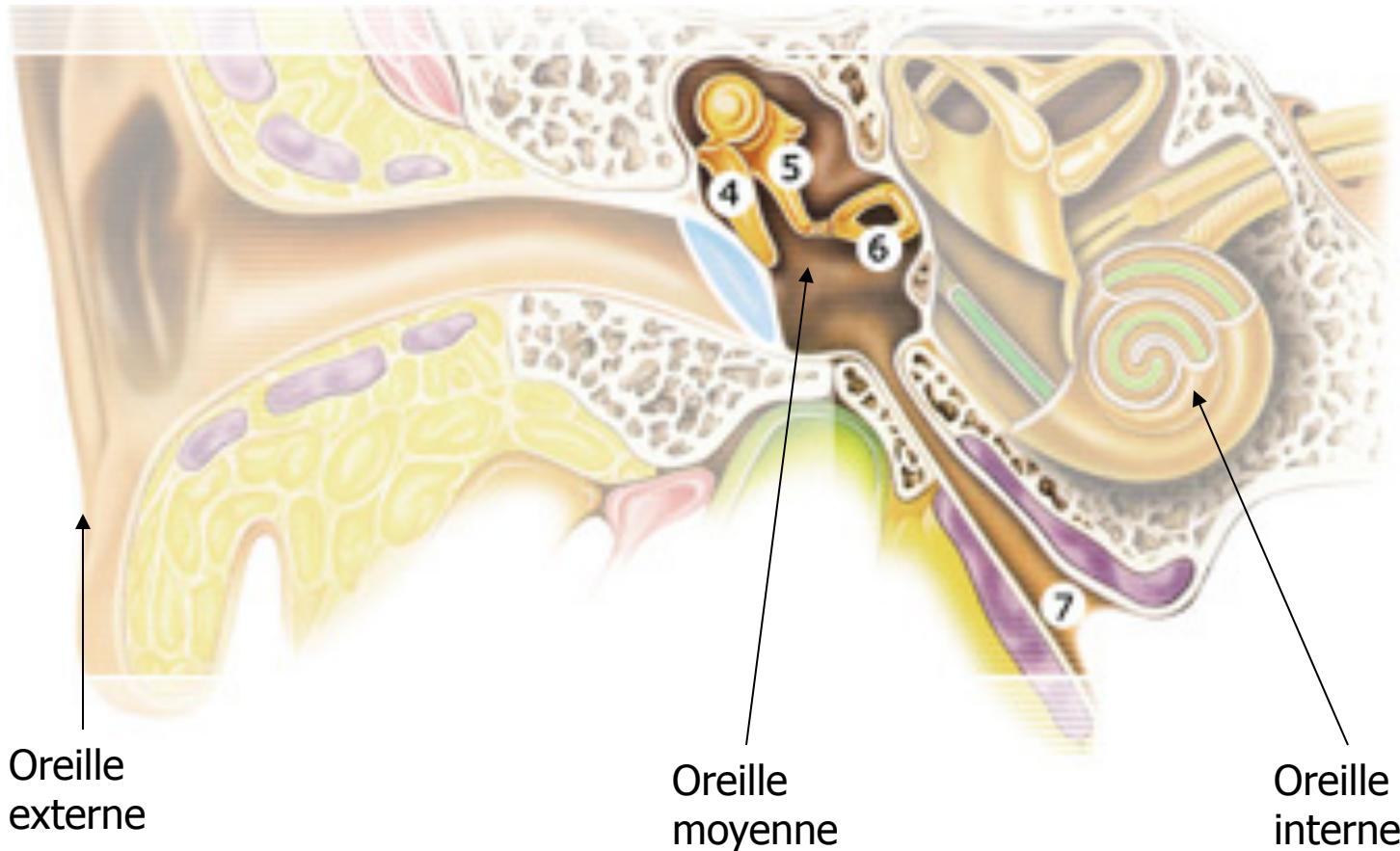
◆ Deux écoles

- La psychoacoustique (branche de la psychophysique) :
 - Étudier les « lois de variation » de nos organes sensoriels, pour divers stimuli « calibrés »
 - Approche bottom-up, de type « boîte noire »
- La psychologie cognitive
 - Approche globale : considère l'individu comme un tout. Les réponses à des stimuli sont entièrement corrélées au contexte, à l'expérience, aux interactions multisensorielles,
 - Intégration des représentations de la mémoire individuelle et collective



Physiologie de l'audition

Le Marteau (4) est attaché au tympan.
L'os du milieu est appelé l'Enclume (5) et le dernier os s'appelle l'Etrier (6)



Oreille
externe

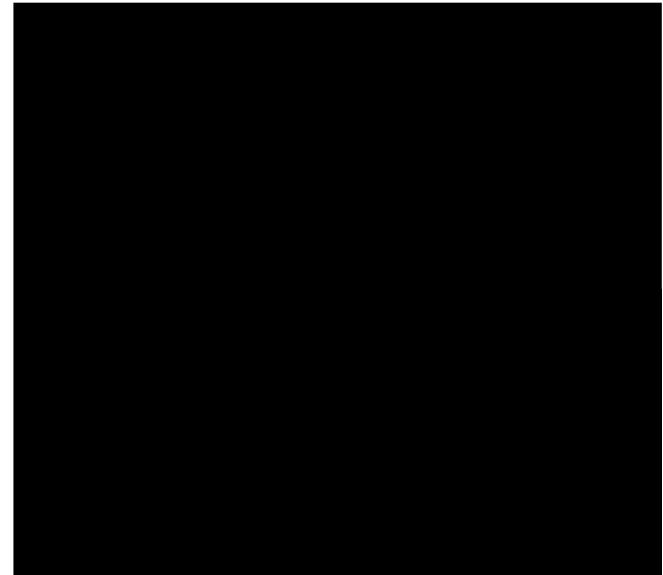
Oreille
moyenne

Oreille
interne

Oreille moyenne

- ◆ Chaîne des osselets
 - Amplification des mouvements

On « tend » l'oreille



Muscles tenseur du tympan et de l'étrier

mécanisme d'adaptation réflexe => subjectivité

Réflexe stapédien : contraction du muscle de l'étrier à fort niveau sonore

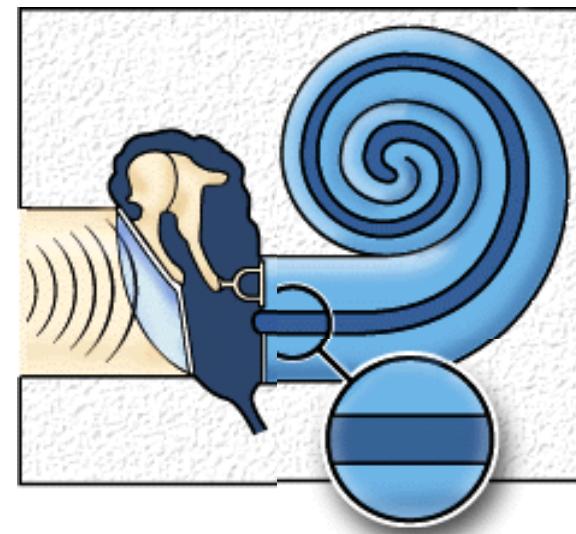
Oreille interne

- ◆ cochlée
 - Transduction mécanique/électrique



cochlée

La cochlée réalise une analyse fréquentielle du signal acoustique

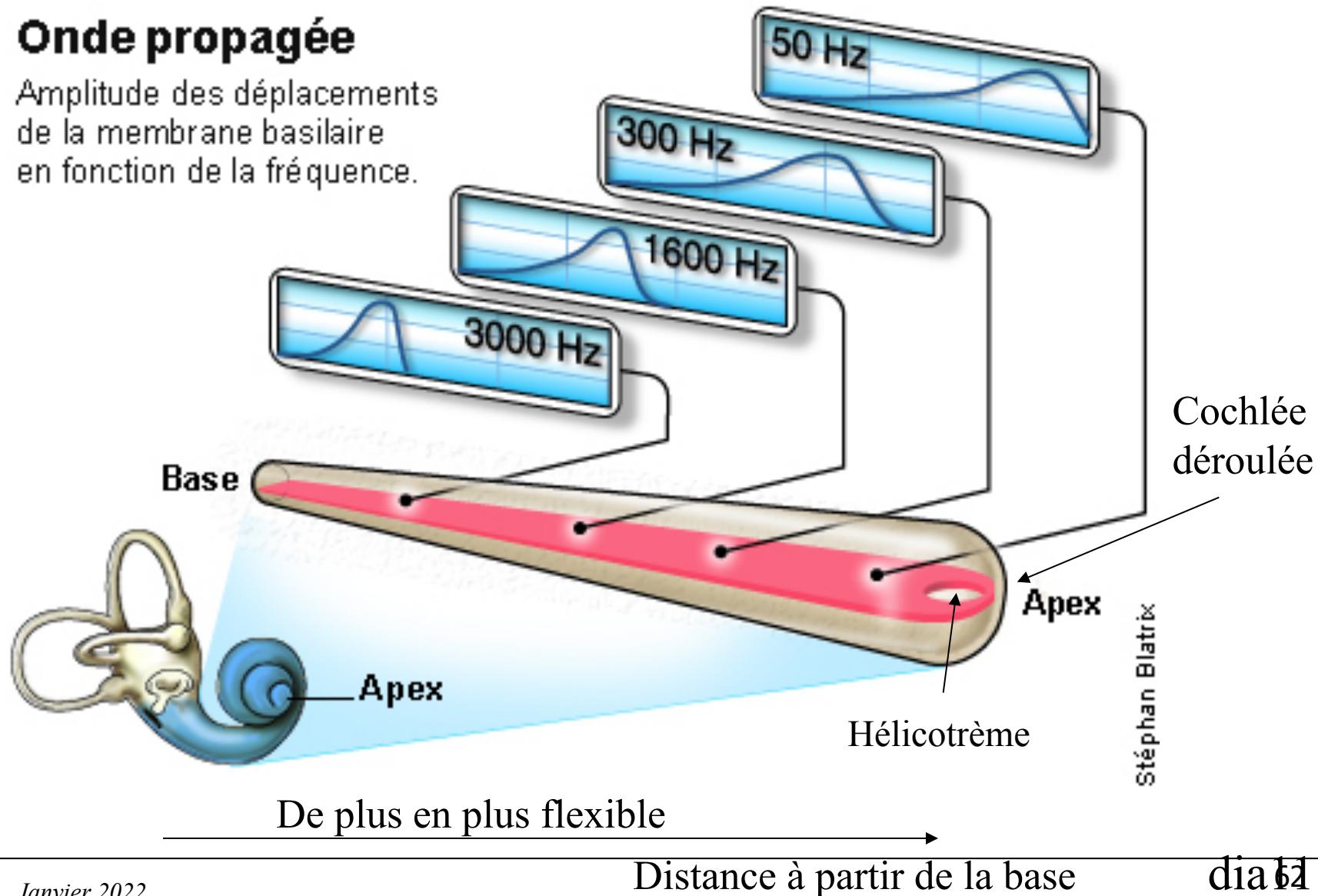


→ L'oreille se comporte comme un **analyseur de spectre**

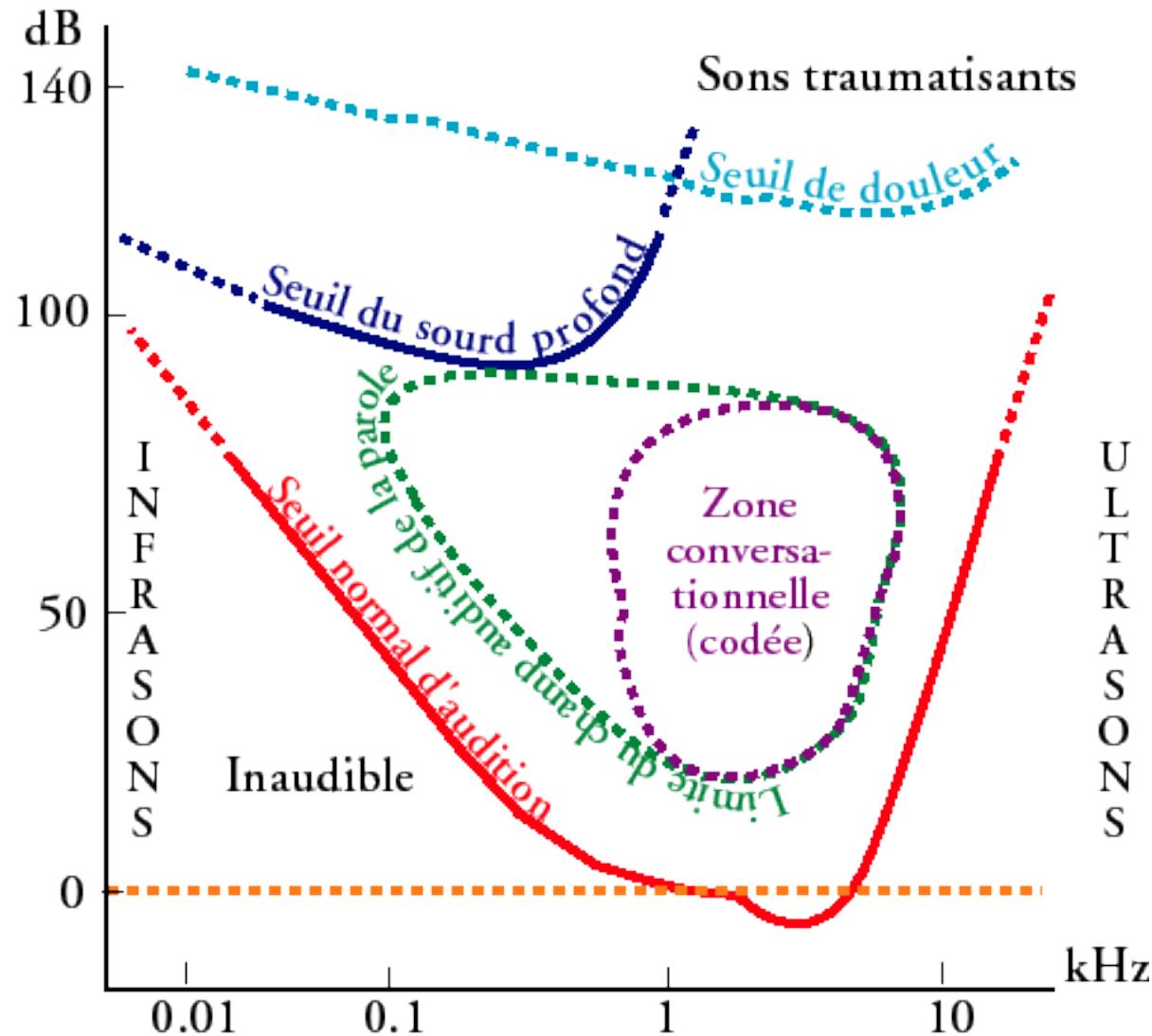
Codage (Tonotopie)

Onde propagée

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

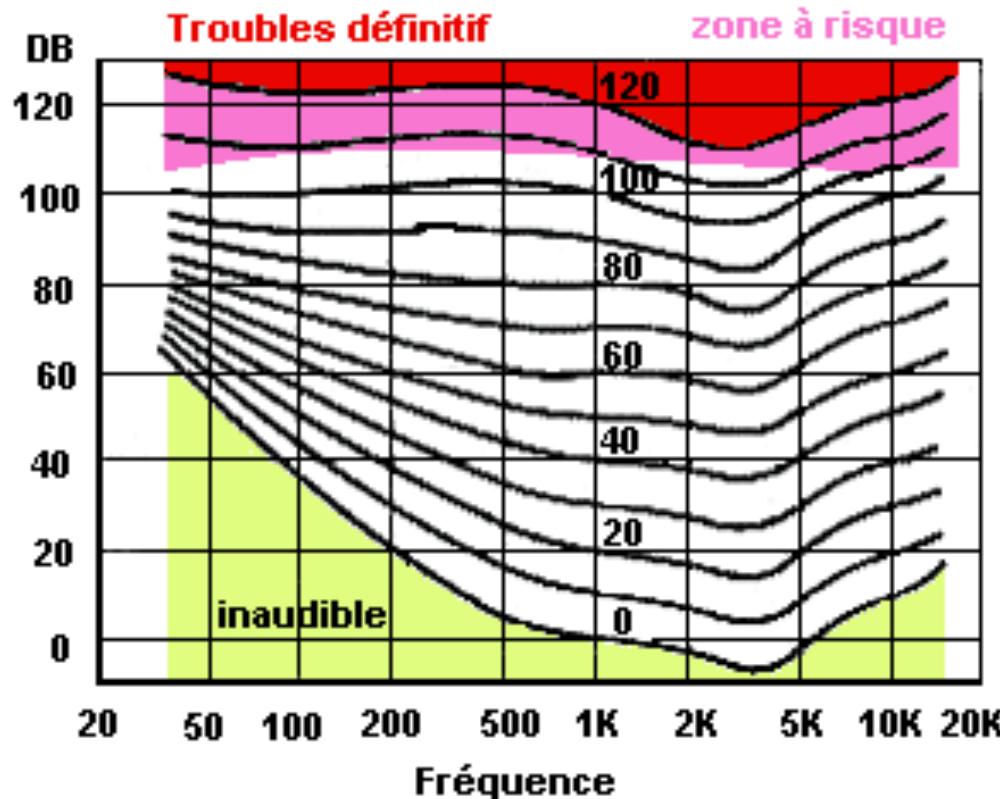


◆ Champ audible



◆ Perception de l'intensité des sons purs

- Sensibilité variable de l'oreille en fréquence
 - Courbes d'isosonie de Fletcher - intensité subjective des sons purs



$\times \text{dB (SPL)} = \times \text{phones à 1000Hz}$

- Unité 1 : le **phone** : correspond au niveau en dB SPL d'un son pur à 1000Hz
- Un son de x phone donne une **sensation d'égale intensité** avec un son pur de 1000Hz de niveau x dB SPL

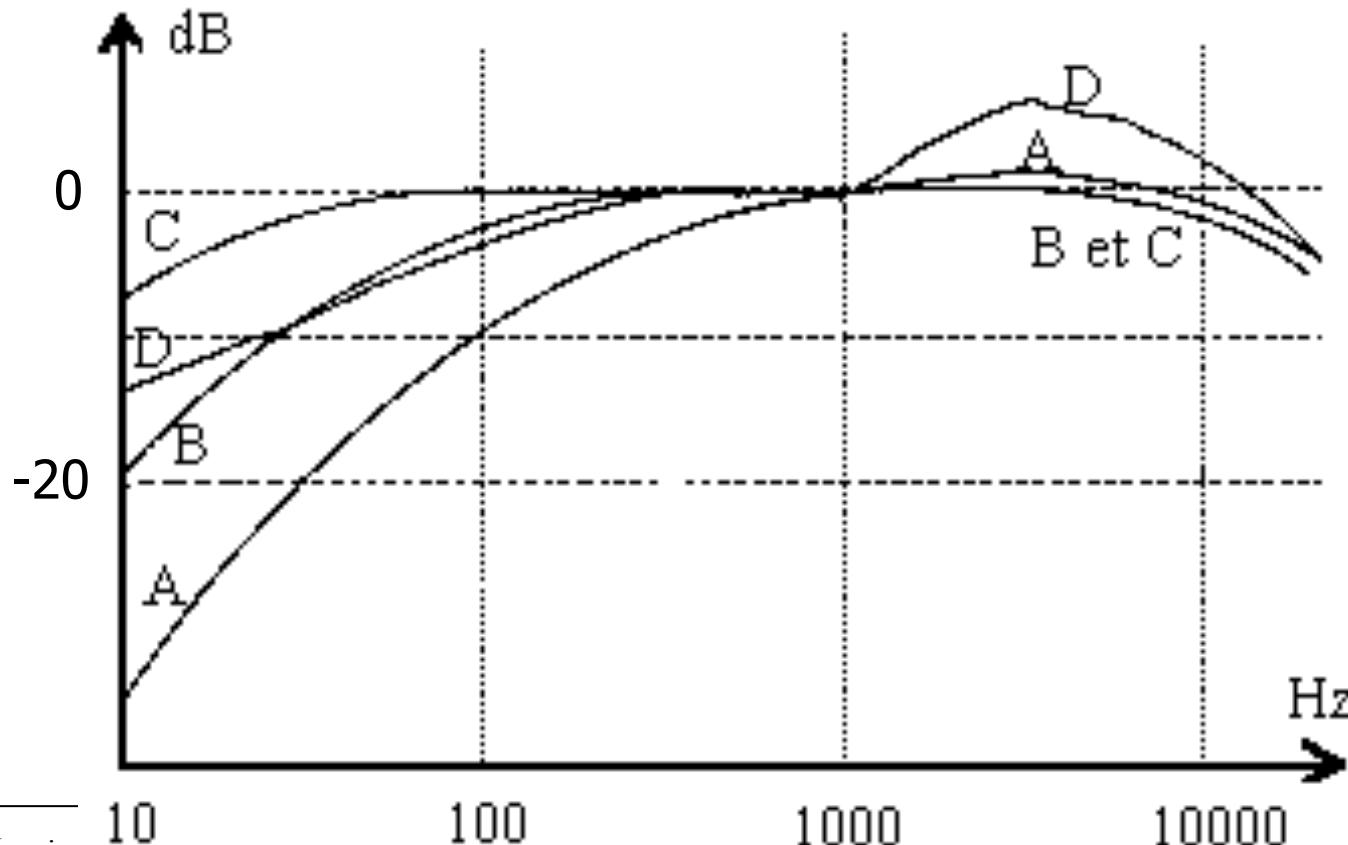
=> Courbes d'isosonie

- Échelles pondérées (intensité subjective)

- atténuer l'effet des basses et des hautes fréquences
- Pondération : **dBA**
- appli. : sonomètre
- acoustique industrielle

la courbe de réponse de ce filtre (ou courbe de pondération A) est la courbe des 40 phones inversée

$$L_A(\text{dBA}) = L_P(\text{dB SPL}) + \Delta L_A$$



- Sons simultanés: **Battements** primaires : deux sons purs de 1000Hz et 1004Hz

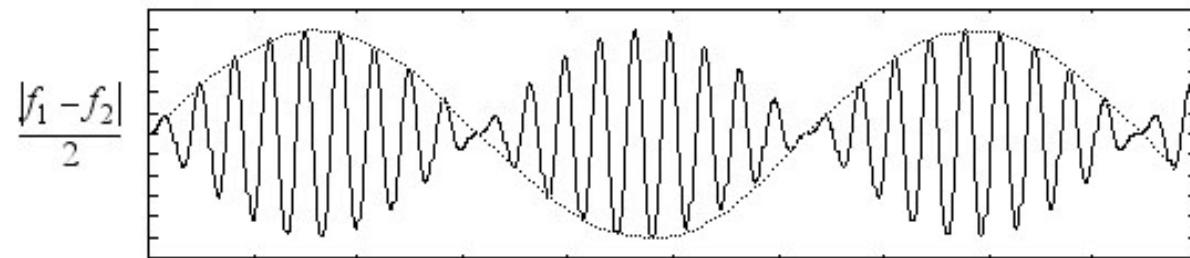
⇒ battement à une fréquence de 4Hz (croches à tempo 120)

$$\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) = 2 \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right)$$

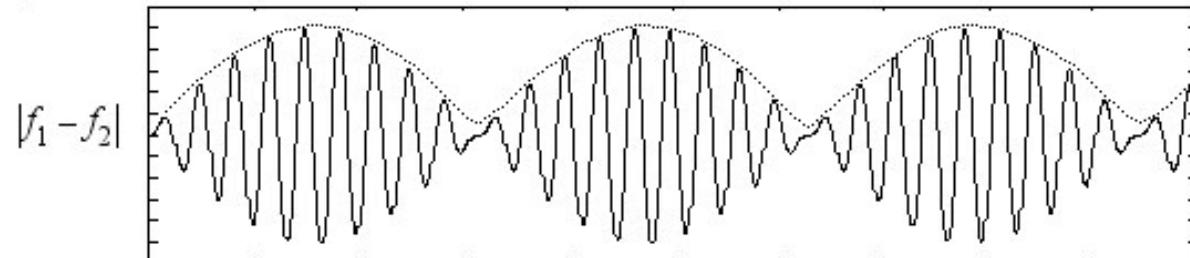
- Perception de battements à une fréquence $|f_1 - f_2|$



mathématiquement



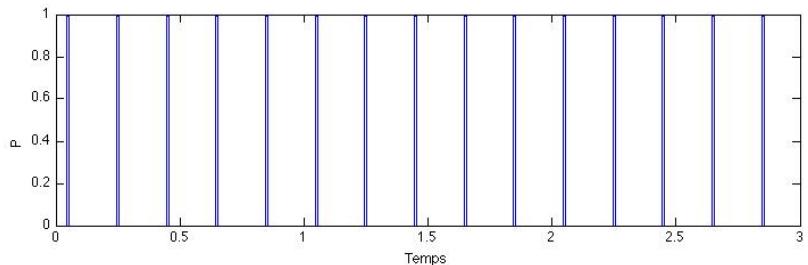
perceptivement



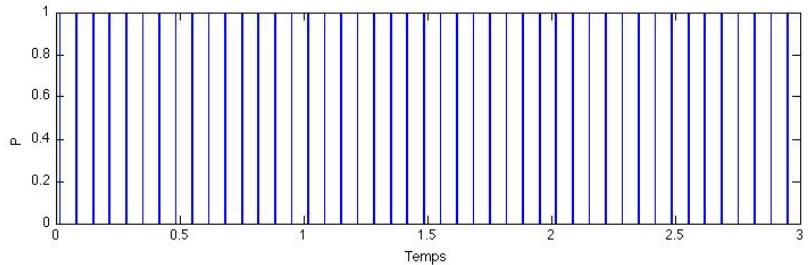
L'oreille n'est
pas sensible à
la phase

Du discontinu au continu...

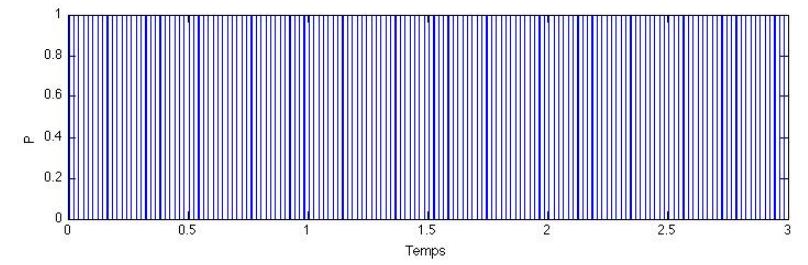
5 clics par seconde (5Hz) 



15 clics par seconde (15Hz) 



50 clics par seconde (50Hz) 



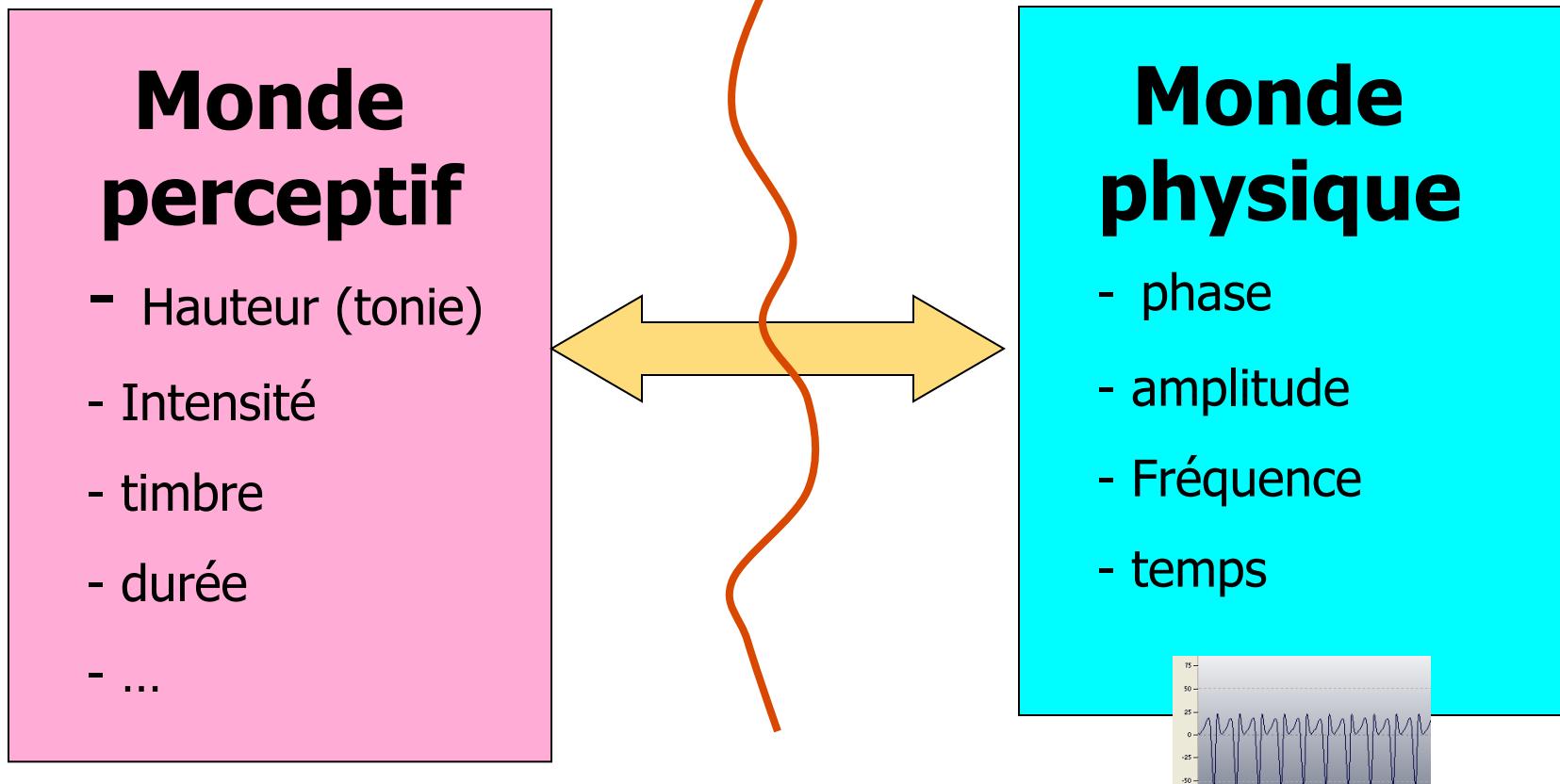
La perception d'une hauteur tonale
survient vers 20-25Hz

De 2,5Hz à 40Hz 

Phénomène
similaire à la
persistance
rétinienne (cinéma)

La psychoacoustique

- ◆ Domaine de recherche qui met en relation les **mesures objectives** de l'acoustique physique et les **mesures subjectives** de la perception auditive



Applications de la psycho-acoustique

- Enregistrement -reproduction sonore
 - fréquence d échantillonnage : 44,1kHz
 - compression de message audio : MP3, DCC Philips
 - traitement d erreurs de codage sur CD
- Automobile-transports : réduction de bruits
 - laisser les informations utiles
 - réduire bruit en tenant compte des aptitudes de l oreille
- Design sonore
 - Son d'alerte, sons de véhicules, sonification
- domaine médical
 - prothèses auditives
 - sélectivité fréquentielle

Les tests perceptifs

Qualité acoustique et étude perceptive

◆ Objectifs

- Identifier les aspects du timbre favorables à la qualité acoustique d'un produit (ou à ses défauts)
- Mettre au point des indicateurs fiables de la perception d'un son (objectivation), pour pouvoir quantifier un cahier des charges
- Identifier les dimensions perceptives prépondérantes dans la perception d'un ensemble de sons

◆ Exemples

- Bruits de ventilations
- Acoustique automobile (bruits moteurs, avertisseurs, messages d'alerte, ...)
- Bruits de transport (train, avion, ...)
- Téléphonie (sonneries, interfaces, qualité de la voix, ...)

Exemple : sons de moteurs diesel (PSA)

- Qualité sonore de moteurs diesel

- 11 ralenti diesel
- 56 sujets
- Cotation sur une liste de descripteurs
- Épreuve de tri libre

Descripteurs
Grave
Souffle
Niveau sonore
Régulier
Aigu
Saccadé
Doux
Rapidité
Siflement
Puissance perçue



Son 1



Son 2



Son 7



Son 8



Son 3



Son 9



Son 10



Son 11



Son 4



Son 5

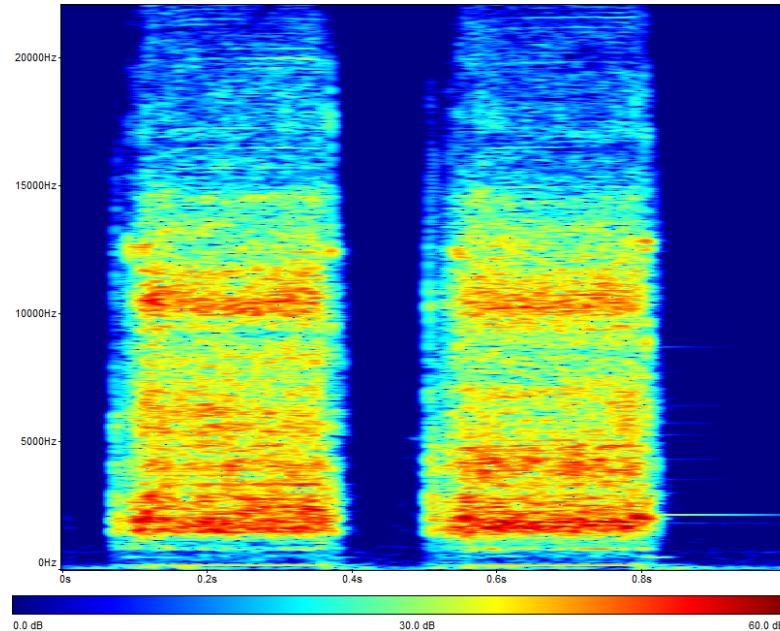


Son 6

Exemple 2 : sécateur électrique [Genesis]



Son peu agréable



Son + agréable



Challenge :

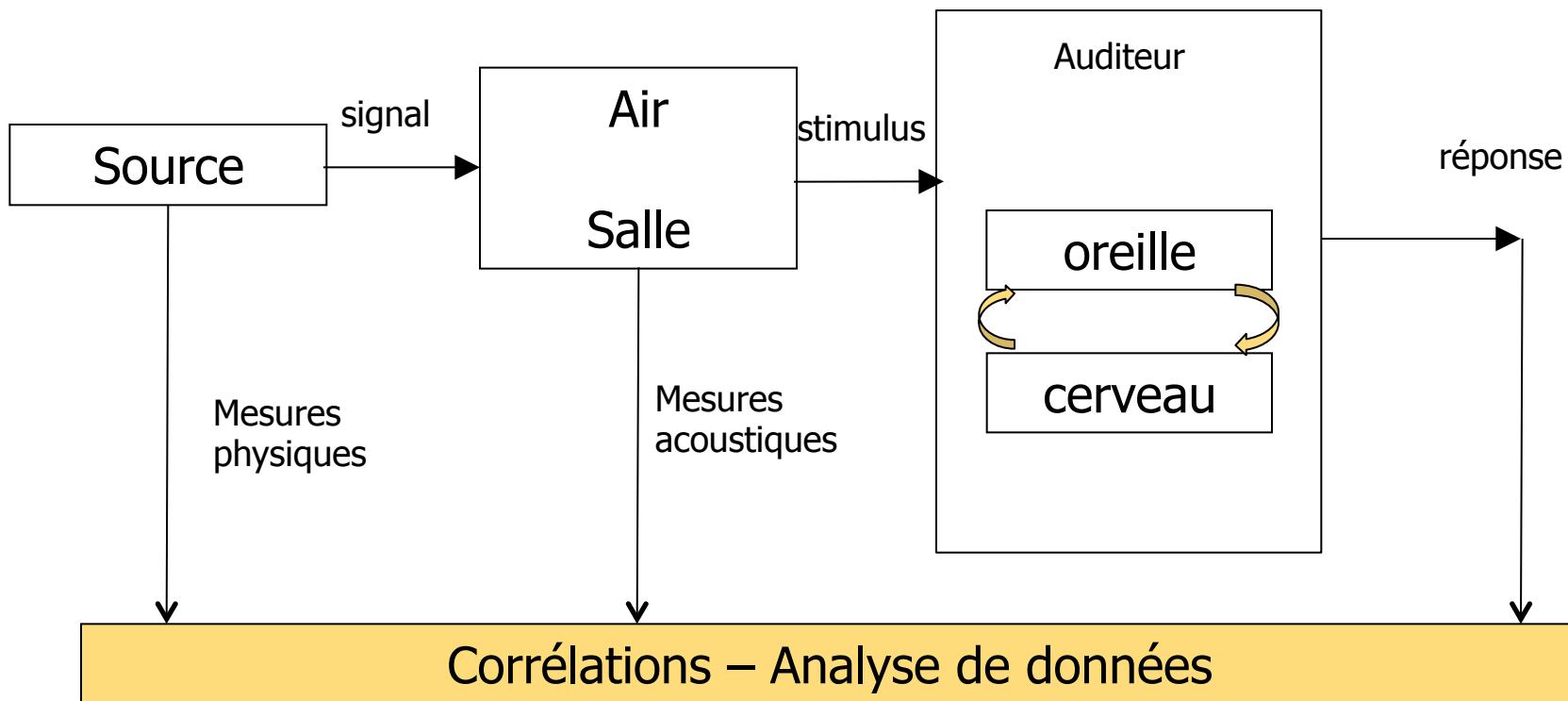
- comprendre quelles composantes du son créent le son déplaisant
- Identifier les parties mécaniques responsables de ces composantes

La démarche psychoacoustique

- Modèle « boite noire »



Inférer le contenu de la boite noire par une analyse des réponses en fonction de stimuli



Création des stimuli sonores

- Il est généralement impossible de faire écouter le son réel lors des tests
 - On utilise une reproduction du son enregistré
- La réalisation de test perceptifs **fiables** pose la question de la **fidélité** de la restitution du son :
 - Un signal sonore, enregistré par un micro, puis diffusé par des HP, donne un résultat très différent de celui obtenu par une écoute directe du son

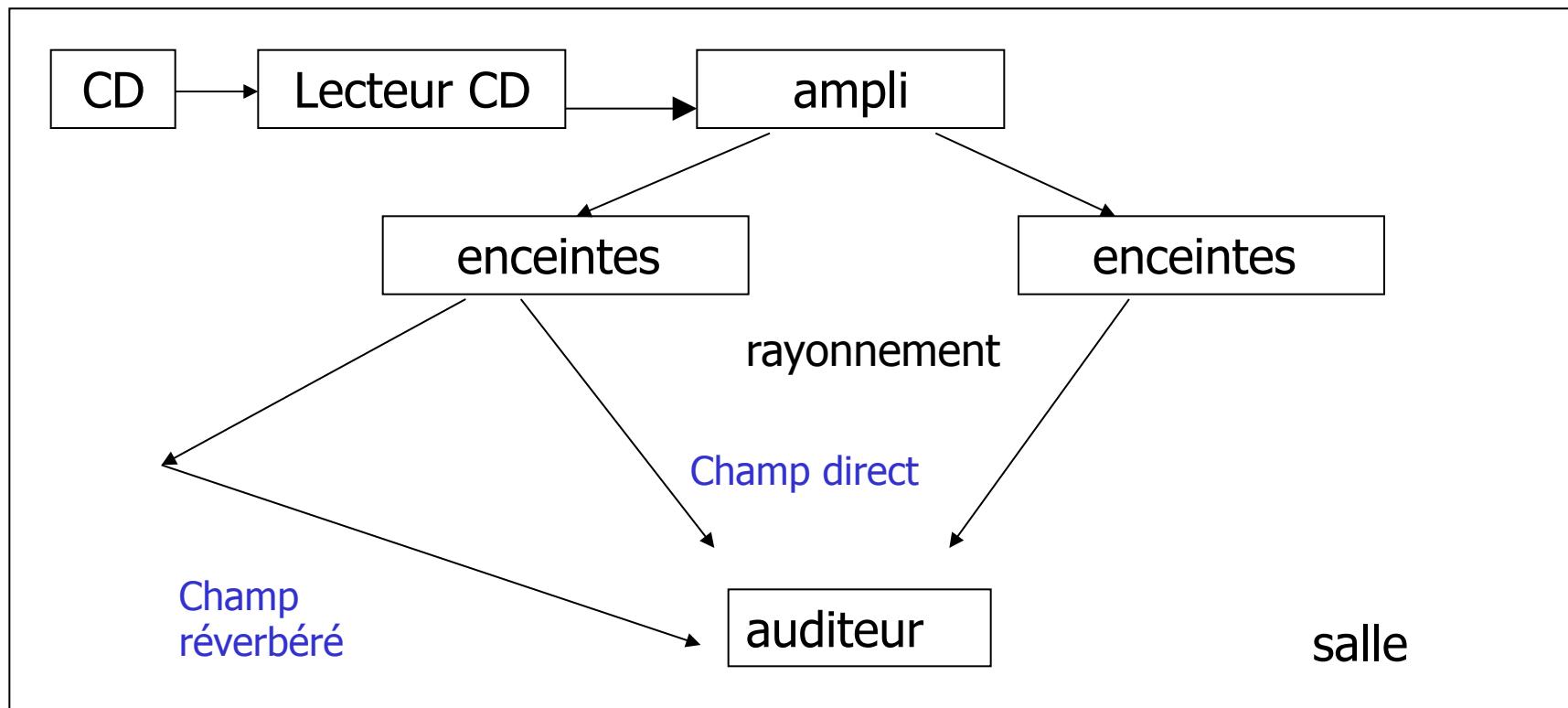
De nombreux facteurs viennent biaiser la fidélité de la restitution :

 - Réduction de la dynamique
 - Qualité de la chaîne son (micros, HP, amplis...)
 - Présences de la tête, du corps de l'auditeur, du pavillon de l'oreille, qui modifient le champ sonore
 - Pas de spatialisation (si un seul micro)

Pour des tests perceptifs fiables, le système doit être **audio conforme** : recréer le plus **fidèlement possible** le champ sonore réel.

Qualité d'un système audio

- Reproduction externe avec des enceintes acoustiques
 - Le champ sonore recréé est fonction de l'ensemble de la chaîne son, du CD à la salle



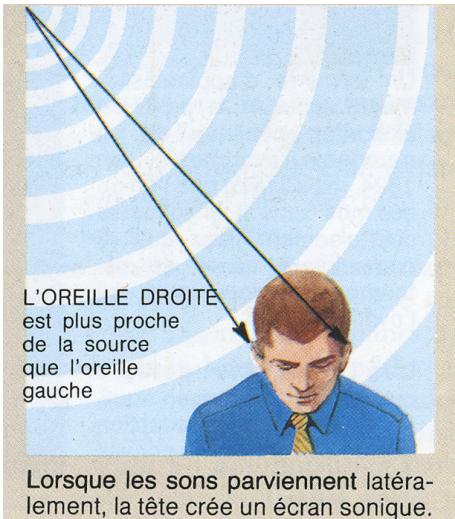
Qualité d'un système audio

- Le champ sonore reproduit par les enceintes est une re-création « déformée » du champ sonore initial :
 - La **dynamique** (différence entre sons forts et faibles) a été considérablement diminuée
 - Il apparaît de la **distorsion** (en particulier à fort volume) : modification du contenu fréquentiel des sons initiaux
 - Les **transitoires** (sons d'impact) ne peuvent pas être fidèlement reproduits : limites mécaniques des HP
 - L'**équilibre spectral** est modifié à cause des caractéristiques de la chaîne sonore (réponse fréquentielle non plate)
 - La **spatialisation** du son reproduit n'est généralement pas fidèle

Pour des tests perceptifs fiables, on utilise généralement une reproduction des stimuli au **casque audio haute qualité**

Localisation des sources

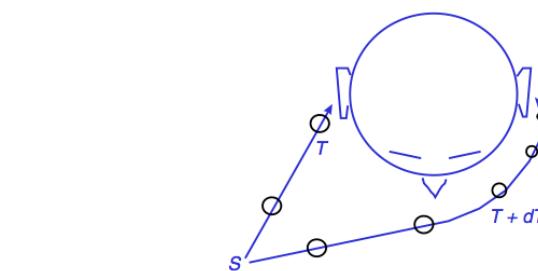
- Audition binaurale (2 oreilles) :
- les petites différences entre les sons parvenant aux deux oreilles peuvent indiquer la direction de la source



Différence d'intensité (due à l'atténuation avec l'effet de la tête)

ILD : Interaural Level Difference

Ne marche pas à très basse fréquence à cause de la diffraction sur la tête



Différence de temps d'arrivée, ou phase (due aux différences de trajet de l'onde)

Indices interauraux

ITD : Interaural Time Difference

Marche tant que la longueur d'onde est supérieure à la distance entre les oreilles

$$L \approx 23\text{cm} \Rightarrow f = c/\lambda \approx 1500 \text{ Hz}$$

Au delà de 1500Hz => ambiguïté

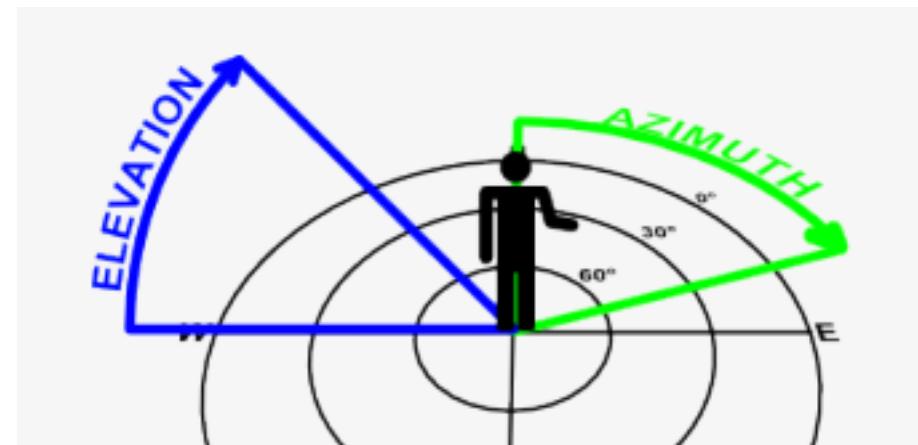
Localisation des sources

- Avec les indices interauraux en fonction de la fréquence f :
 - $f < 100\text{Hz}$: pas de localisation
 - $100 < f < 1500\text{Hz}$: localisation par différence d'amplitude et de phase (ILD et ITD)
 - $f > 1500 \text{ Hz}$: localisation par différence d'amplitude (ILD)
- Direction d'incidence du son
 - **azimut** : angle entre la direction incidente et le plan vertical droit devant le sujet
 - **élévation** : angle entre la direction incidente et le plan horizontal

Les indices interauraux (ILD, ITD) marchent bien pour l'azimut, **pas** pour l'élévation

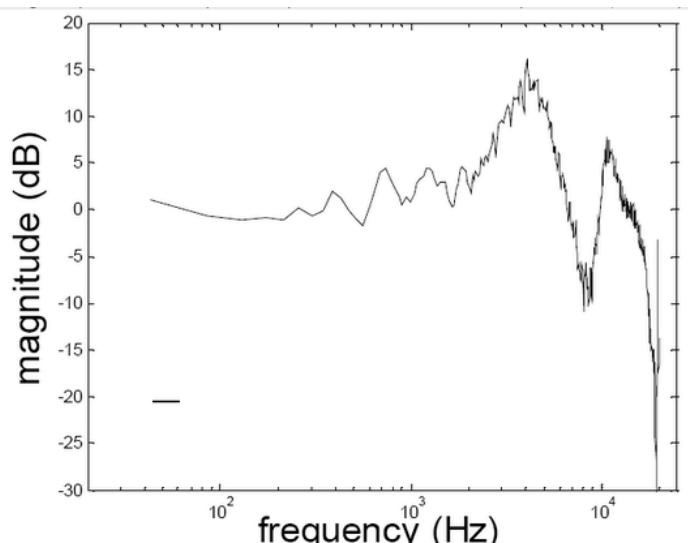
Pour la localisation en élévation
⇒ **HRTF** (Head Related Transfert Function)

⇒ Permet l'audition spatiale monaurale



La fonction Hrtf

- Hrtf : Head-related transfer function
 - Caractérise les transformations apportées aux ondes sonores par **le corps, la tête, le pavillon, le conduit auditif de l'auditeur.**
 - Elle est représentée par la fonction de transfert entre un microphone placé au niveau du tympan, et un microphone placé au centre de la tête, en l'absence d'auditeur.
 - Bien que celle-ci soit propre à chaque individu, elle peut être évaluée à l'aide d'une tête artificielle « moyenne » (tête Hrtf)
 - Il existe de nombreuses bases de données en ligne



Fonction Hrtf pour un azimut et une élévation donnés

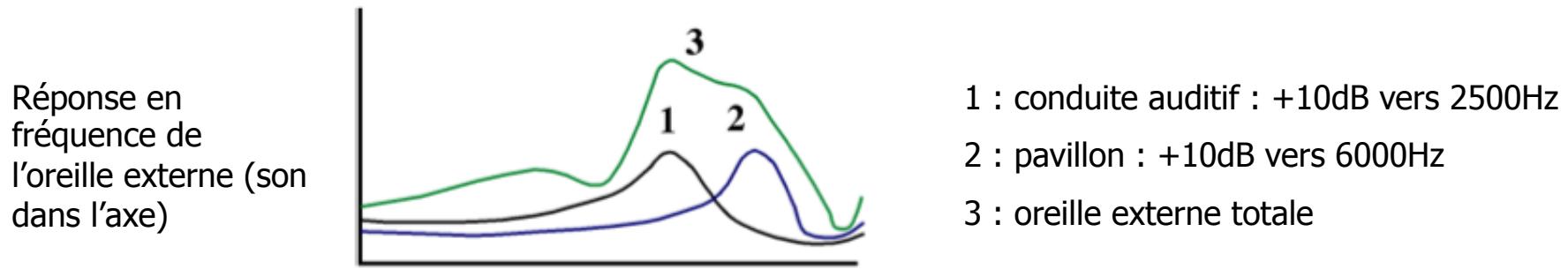
L'Hrtf est par exemple utilisée pour recréer un champ sonore 3D à partir d'une mesure (**auralisation**)



Mannequin et tête artificielle pour l'enregistrement

Localisation des sources en élévation

- Indice monaural (HRTF) : chaque humain à « appris » au cours de sa vie le filtrage différencié de (tête + pavillon) en fonction de l'incidence de la source
- Il existe des différences interindividuelles importantes

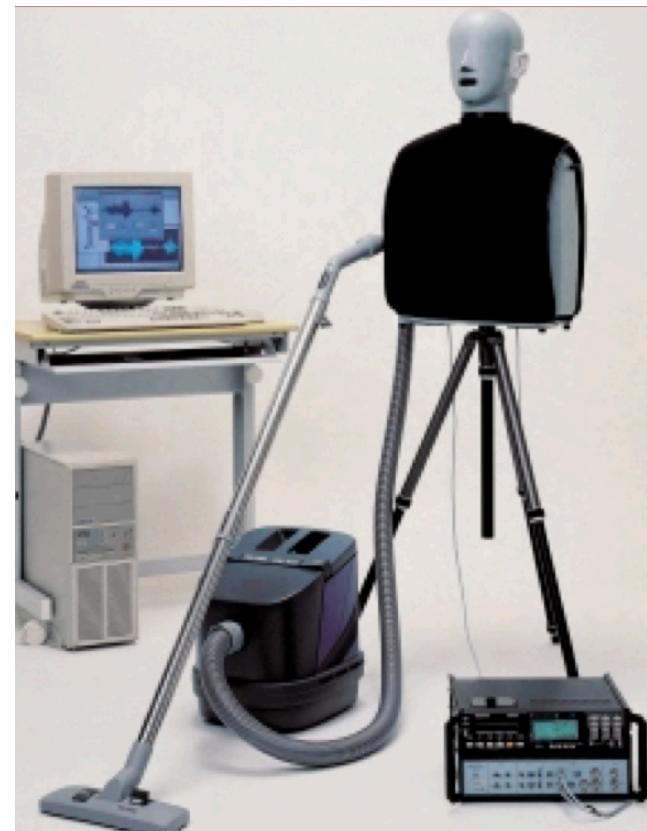


- Existence d'un cône de confusion (levé en partie avec HRTF)
- Confusions avant arrière fréquentes
- A l'arrière, si l'on ne voit pas la source
- Rotation de la tête pour lever les confusions (tourner la tête vers la source (ITD-ILD nul) ou sur le côté (ITD-ILD max))
- Les fréquences pures ne se localisent pas bien (sonnerie de portables, sirène, sonnerie de montre, de réveil électronique...)
- Les HRTFs sont individuelles (différences interindividuelles)
- codage de 3D en 2D (seul l'oreille humaine est capable de décoder l'information 3D)

Système audio conforme

- Deux solutions pour se rapprocher de l'audio conformité:
 - 1 : Enregistrement avec un mannequin acoustique
Reproduction avec un casque haute qualité
 - 2 : enregistrement avec un micro
Convolution avec une fonction Hrtf
Reproduction au casque haute qualité

Mannequin et enregistreur (Brüel & Kjaer)



Les épreuves perceptives

- Différentes méthodes
 - Évaluation absolue
 - Différentiel sémantique
 - Classement
 - Comparaison par paires
 - Tri libre
 - Verbalisation libre
- Ces méthodes comportent des point forts et des points faibles. Le choix est fonction de la nature et du nombre de stimuli, des objectifs de l'étude, du type de panel interrogé, ...

L'évaluation absolue

- Évaluation d'un caractère sonore sur une échelle quantitative, structurée ou non

Exemple d'échelle structurée



- Pour éviter l'**effet d'ordre** : gérer l'ordre de présentation aux sujets (aléatoires – carrés latins)
- Estimer la fiabilité des évaluations : Prévoir des **réduplications**
- Tributaire de la bonne compréhension par le sujet du terme étudié
- L'évaluation est transformée en un nombre réel (par ex. entre 0 et 10)
- Analyse des données :
 - Statistique descriptive : Moyenne, variance, box-plots
 - Analyse de la variance – test de significativité des effets
 - Tests de différence des valeurs moyennes

Le différentiel sémantique (Osgood)

- Évaluation sur une échelle bi-polaire caractérisée par 2 adjectifs opposés à chaque extrémité

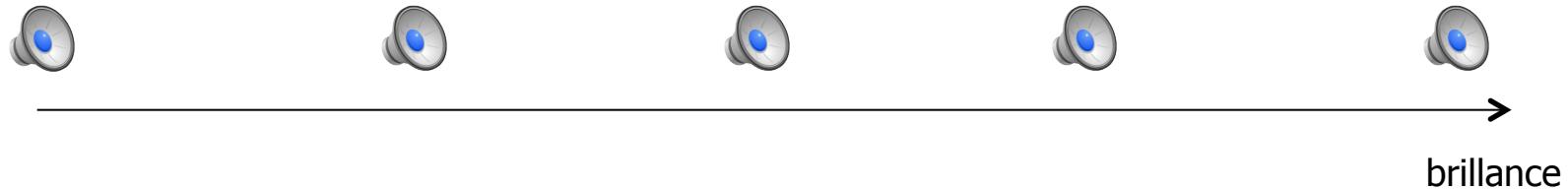
Exemple de différentiel sémantique



- Mêmes caractéristiques que l'évaluation absolue
- Vérifier que les 2 adjectifs s'opposent bien sur le plan sémantique (préférer 1 même adjectif, exprimé en + et en -)
- Préférer faire évaluer chaque son selon tous les descripteurs successivement plutôt que le contraire
- Utiliser un vocabulaire consensuel
- La liste des descripteurs peut être très longue pour décrire exhaustivement l'ensemble des différences entre les sons => fatigue de l'évaluateur

Le classement

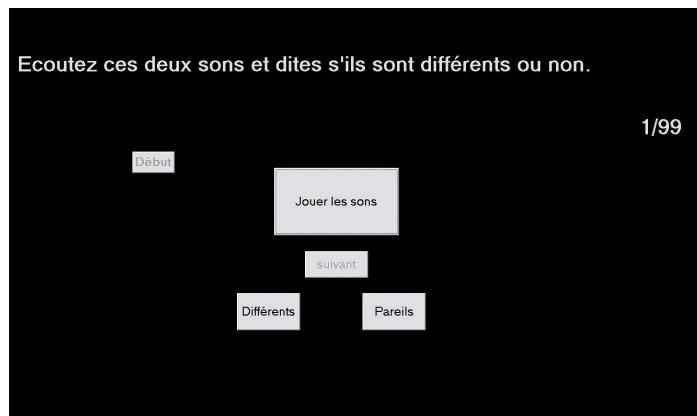
- Classement des sons selon un critère particulier



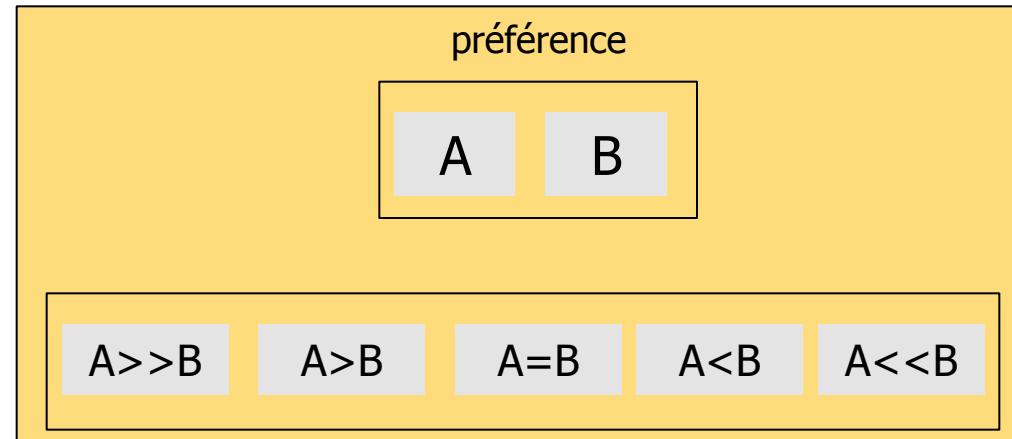
- Permet de vérifier de manière simple une impression initiale
- Intéressant pour les épreuves de préférence
- Limiter à une dizaine de sons, sinon l'épreuve devient inextricable pour le sujet
- Ne donne pas d'information sur les écarts entre les sons
- Analyse de données
 - Statistiques de rang (Kruskal & Wallis, Friedman)
 - Corrélation de Spearman

Les comparaisons par paires

- Choix binaire ou multiple



« same different » test



- Épreuve très intuitive/évaluation séparée, à cause des faibles capacités de la mémoire auditive
- Intéressante pour les épreuves de préférence
- Limité à N faible : Si N sons, $N(N-1)/2$ paires à écouter => fatigue
- Problème d'intransitivité ou d'inconsistance des sujets ($A>B>C$ et $C>A$)
- Traitement mathématique pour inférer la valeur de la sensation
 - Modèle de Thurstone, Modèle BTL, ...
- Analyse de données
 - Théorie de détection du signal

Le tri libre (catégorisation)

- Principe
 - Ranger les objets en groupes (catégories)
 - Mettre les objets similaires dans le même groupe
 - On peut faire autant de groupes que l'on veut, sauf 1, ni N
 - Si i et j sont dans la même pile : $\delta_{ij}=0$
 - Sinon, $\delta_{ij} = 1$
 - On réalise les matrices de dissimilarités de chaque sujet
 - On addition ensuite les matrices de tous les sujets

- Obtention d'une partition de l'ensemble des stimuli
- Aucun biais sémantique avec cette épreuve : elle est non verbale
- Possibilité de laisser les sujets caractériser les groupes composés avec des termes descriptifs
- Méthode souvent utilisée **en préalable à une épreuve de cotation, pour sélectionner des sons typiques**
- Analyse des données
 - Méthode MDS
 - CAH (classification ascendante hiérarchique)

Exemple tri libre : sons de moteurs [PSA]

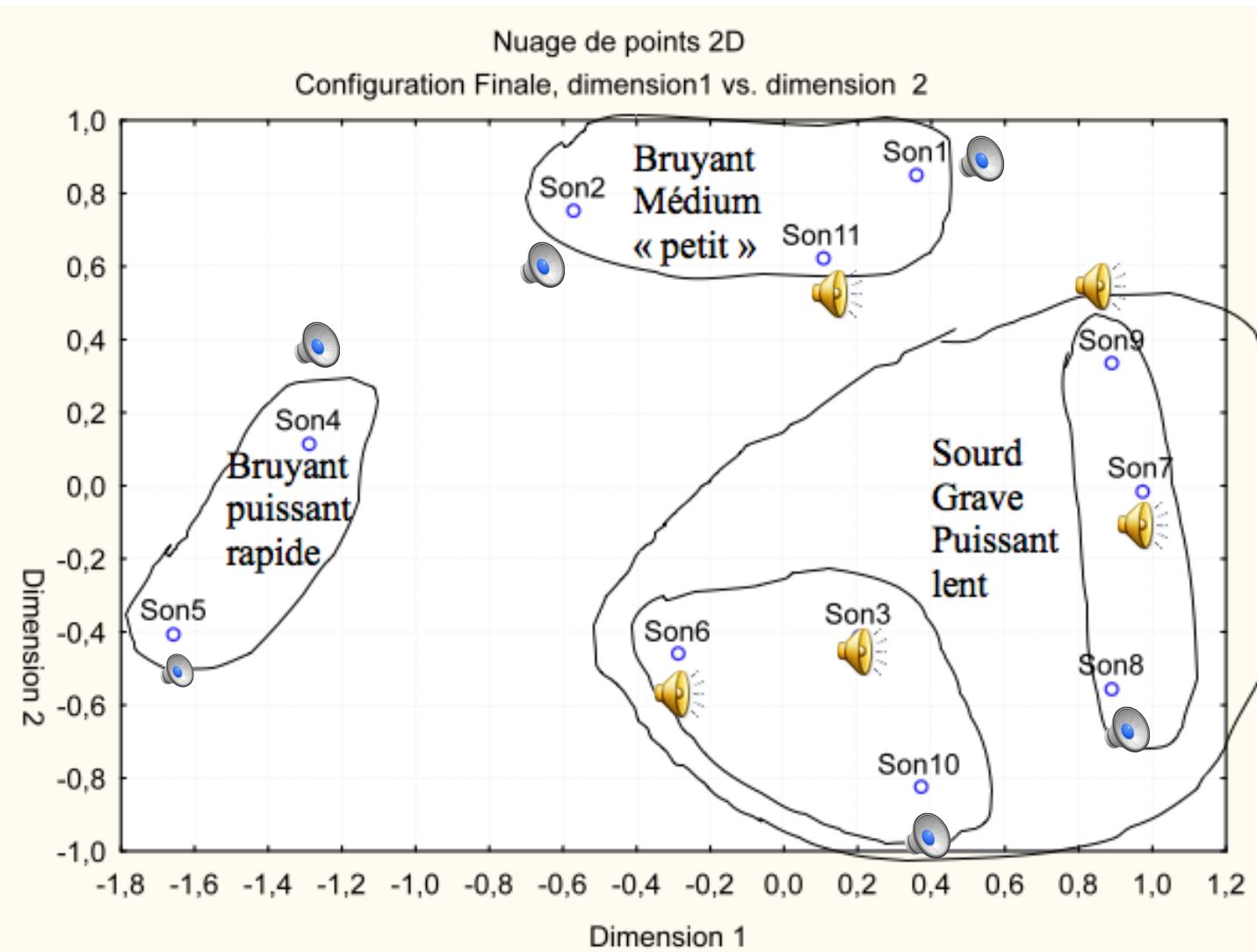
- Matrice de dissimilarité du groupe

S	Son1	Son2	Son3	Son4	Son5	Son6	Son7	Son8	Son9	Son10	Son11
Son1	0	34	47	52	53	43	41	46	38	51	32
Son2	34	0	46	40	50	47	51	55	48	47	34
Son3	47	46	0	48	52	40	44	41	43	38	42
Son4	52	40	48	0	35	47	54	55	53	45	46
Son5	53	50	52	35	0	46	56	52	51	52	54
Son6	43	47	40	47	46	0	51	41	46	42	44
Son7	41	51	44	54	56	51	0	31	32	37	40
Son8	46	55	41	55	52	41	31	0	34	32	49
Son9	38	48	43	53	51	46	32	34	0	49	45
Son10	51	47	38	45	52	42	37	32	49	0	48
Son11	32	34	42	46	54	44	40	49	45	48	0

- Verbalisation des sujets sur chaque groupe créé
- Analyse multidimensionnelle des similarités (MDS)
 - Positionnement des stimuli dans un espace de faible dimensions

Exemple : sons de moteurs [PSA]

- Interprétation des groupes



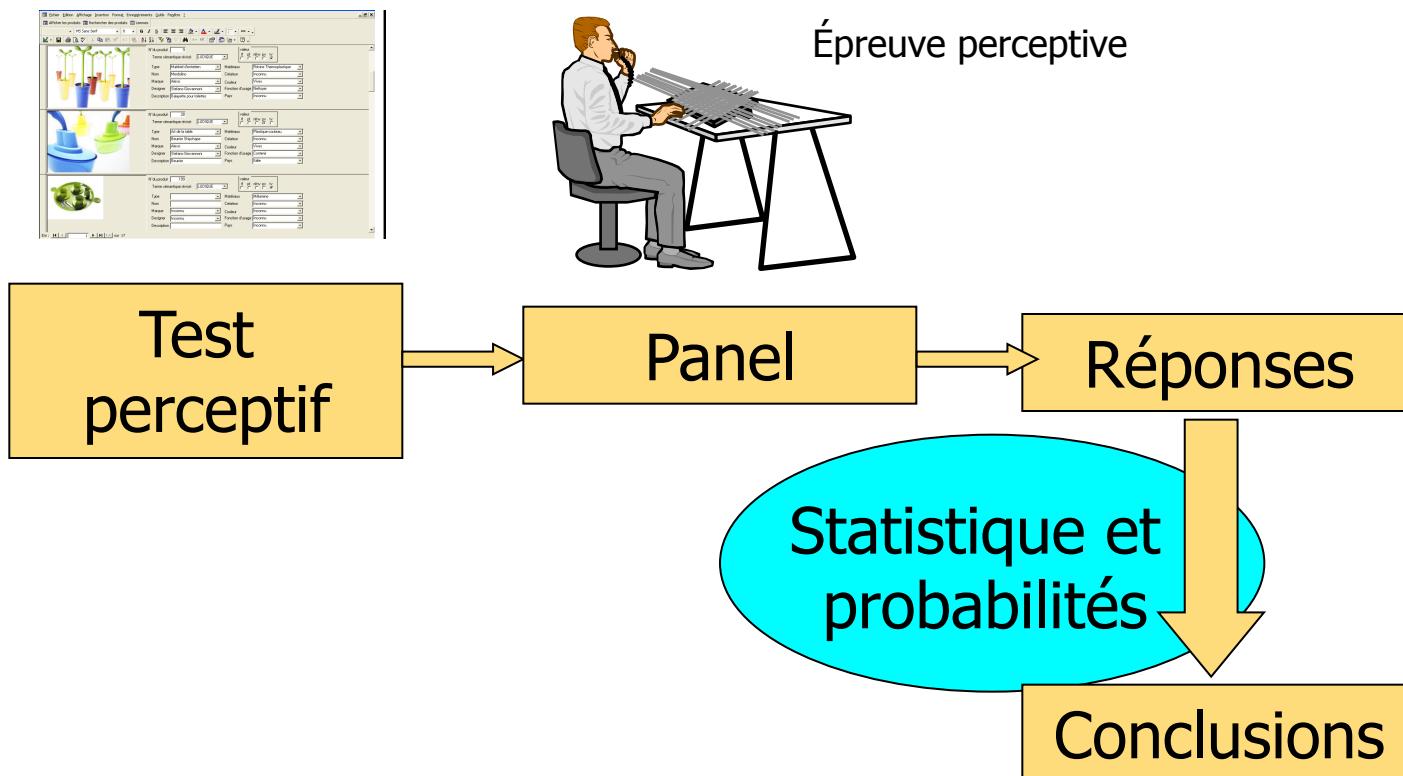
Verbalisation libre

- Principe
 - Écoute des sons par paires
 - Le sujet doit proposer des termes pertinents pour décrire les différences entre les sons
 - Regroupement des termes en unités verbales homogènes
 - Obtention de « portraits verbaux » des sons, représentatifs des perceptions des auditeurs
- Méthode qualitative : l'analyse des résultats plus complexe que pour une méthode quantitative
- Les termes générés peuvent servir de descripteurs pour une étude quantitative
- Problème de biais sémantique avec cette épreuve
- Méthode souvent utilisée en préalable à une épreuve de cotation, pour sélection des sons typiques
- Analyse des données
 - Analyse de données lexicales

Analyse subjective/objective de signaux audio

L'analyse de données

- en analyse sensorielle, en psychométrie, en marketing (enquêtes), l'analyse de données a pour but de formuler des conclusions sur la perception de stimuli, et de prendre des décisions adaptées pour la conception/optimisation de produits
- Elle utilise les outils de la **statistique descriptive et décisionnelle**



Statistique descriptive

- Box-plot (boîte à moustache)

$M + 1,5(Q_3 - Q_1)$

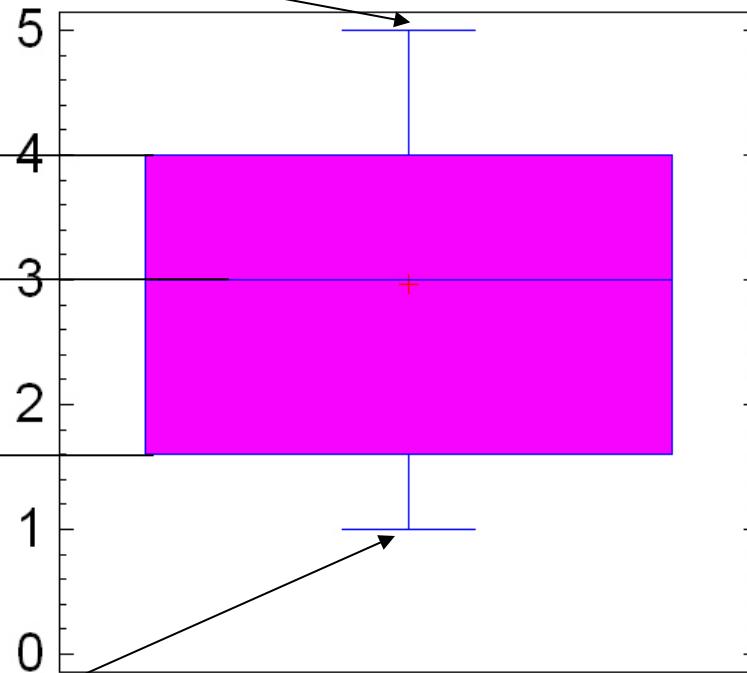
Boîte à moustaches

Q_3

M

Q_1

Variable



$M - 1,5(Q_3 - Q_1)$

appréciation visuelle de la distribution

Dispersion

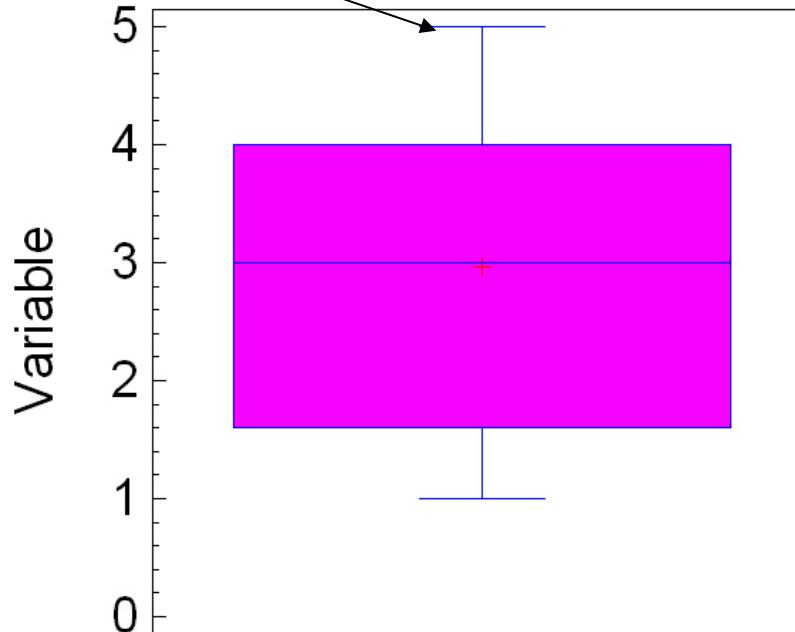
- Box-plot (boite à moustache)

$M + 1,5(Q3 - Q1)$

Si une variable suit une distribution normale, alors la zone délimitée par la boîte et les moustaches (1,5) devrait contenir **99,3 %** des observations.

=> Déterminer les observations atypiques (*outliers*).

Boîte à moustaches



Exemple : casques audio

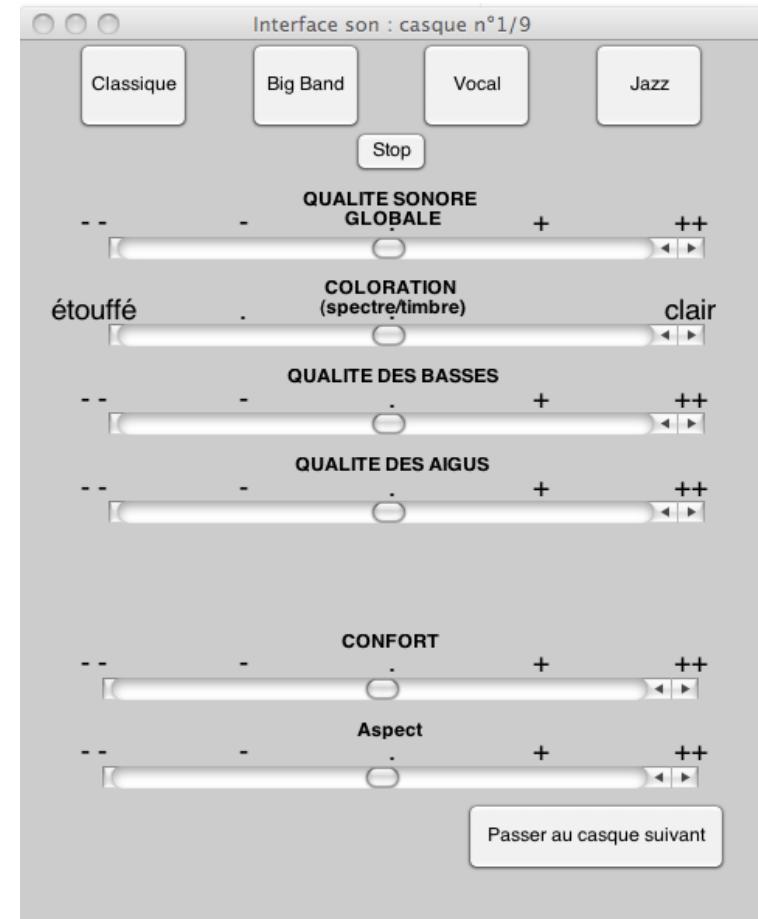
- Liste de 6 descripteurs
- 9 casques

Nom du casque	repérage
A : Eagletone original 1st	Eagle1st
B : Audiotechnica ATH M30	AudioATH
C : Samson RH 600	Samson
D : Eagletone original 5th	Eagle5th
E : Roland RH200S	Roland
F : AKG K141 MK	AKG
G : Eagletone original 3rd	Eagle3rd
H : Marshall	Marshall
I : Beyerdynamics DT 990 Pro	Beyer990

Évaluation

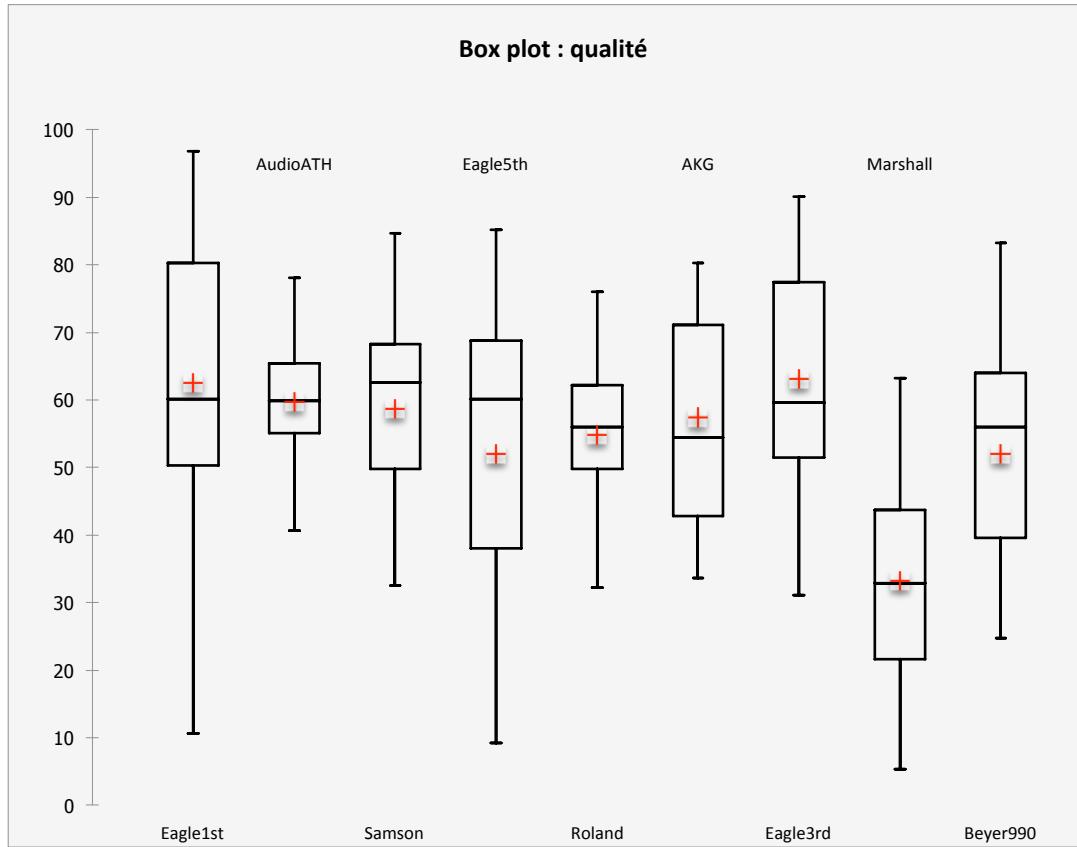
- monadique (1 seul produit à la fois)
- monopolaire (échelle à 1 pôle)

23 sujets



Exemple : casques audio

- Box plot de l'évaluation « qualité »



Variabilité importante pour « Eagle1st »

Marshall sous coté par rapport aux autres

Représentation multidimensionnelle de données

- ◆ Épreuve de cotation
 - ◆ Évaluation des stimuli sur différents descripteurs sémantiques
 - ◆ Visualisation des différences entre les stimuli, et des corrélations entre les descripteurs par ACP
- ◆ Épreuve de tri, ou de dissimilarité
 - ◆ Création d'un espace perceptif multidimensionnel par Analyse multidimensionnelle des similarités (MDS)

Exemple : les casques audio

Matrice de corrélation entre les descripteurs

	coloration	basses	aigus	confort	aspect
coloration	1	0,553	0,576	0,567	0,266
basses	0,553	1	0,872	0,503	0,281
aigus	0,576	0,872	1	0,710	0,242
confort	0,567	0,503	0,710	1	0,053
aspect	0,266	0,281	0,242	0,053	1



Forte corrélation basse-aigu : $r=0,872$

⇒ méthode pour « visualiser les corrélations »
l'Analyse en Composantes principales

ACP

- ◆ Technique multivariée d'analyse de données
- ◆ Visualisation de données
- ◆ Principe :
 - passer d'un tableau $\mathbf{X}(n,p)$ de valeurs numériques continues du type "*individus – variables quantitatives*" (n individus et p variables) à un tableau $\mathbf{Y}(n,q)$ ($q < p$) en perdant le moins possible d'information
- ◆ Objectifs
 - Trouver les **individus** et les **variables** qui se ressemblent
 - Réduire la dimensionnalité en perdant le moins possible d'information
 - Permettre la **représentation graphique** de données
 - Réduire un ensemble de variables corrélées en un nombre plus faible, indépendantes

Remarques sur l'ACP

- ◆ Deux cas :
 - ⇒ On fait une ACP sur les données centrées réduites (**ACP normée** – ou ACP sur la matrice des corrélations). On donne le même poids à toutes les variables
 - ⇒ ACP de PEARSON (XLSTAT)
 - ⇒ On fait une ACP sur les données initiales (**ACP non normée** – ou ACP sur la matrice des covariance). On donne à chaque variable un poids inversement proportionnel à son écart type)
 - ⇒ ACP de covariance (XLSTAT)

Méthode de détermination des CP

- On montre que les axes recherchés sont donnés par les **vecteurs propres** de la matrice C

$$C = Xcr^t D Xcr$$

Décomposition spectrale d'une matrice

Soient λ_i , ($i=1 \text{ à } p$), **les valeurs propres** de C

$$\lambda_1 > \lambda_2 \dots > \lambda_p$$

Soient u_i , ($i=1 \text{ à } p$), **les vecteurs propres** de C

- Les composantes principales (nouvelles variables) sont des combinaisons linéaires des variables c.r. initiales (changement de base)

$$C_i = X_{cr} \cdot u_i$$

Contribution des variables à un axe

- ◆ Vecteurs propres u_i

<i>Vecteurs propres</i>	u1	u2	u3
<i>taille</i>	0,67	-0,19	0,72
<i>poids</i>	0,64	-0,35	-0,68
<i>QI</i>	0,38	0,92	-0,11

- ◆ Contribution de la variable j à l'inertie de l'axe k

$$CTR_k(Xcr_j) = u_{jk}^2$$

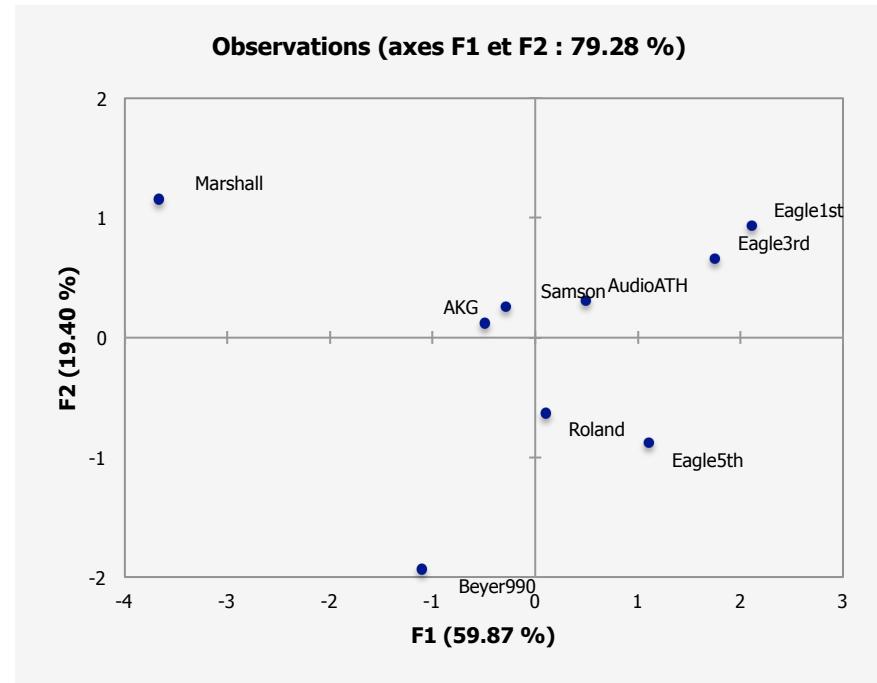
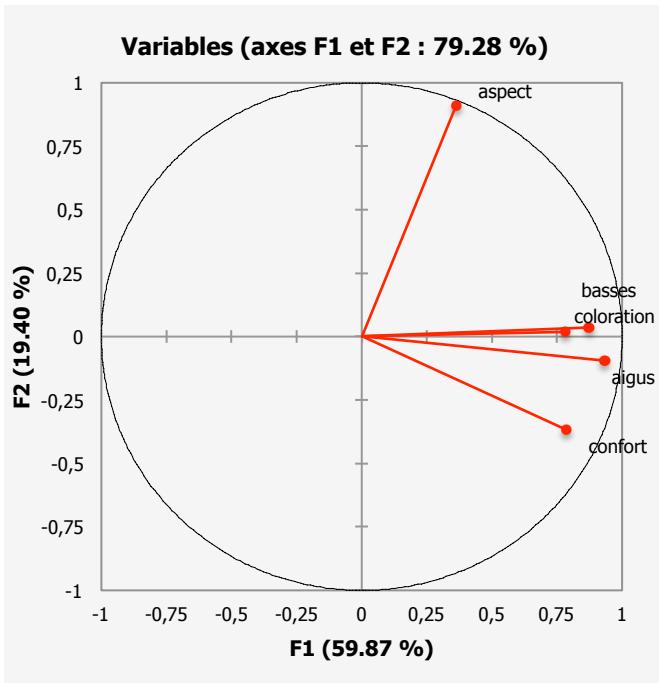
	CTR1	CTR2	CTR3
<i>taille</i>	44,89%	3,61%	51,84%
<i>poids</i>	40,96%	12,25%	46,24%
<i>QI</i>	14,44%	84,64%	1,21%
<i>somme</i>	100%	100%	100%

Interprétation des CP

- ◆ Une variable qui contribue fortement à un axe principal « explique » cet axe
- ◆ Introduction de variables supplémentaires (qui ne participent pas à la création des axes, mais qui sont projetées sur le plan principal) peuvent aider à l'interprétation
- ◆ Analyse des profils des individus extrêmes sur les axes pour aider à l'interprétation
- ◆ Utilisation de rotation des axes (exemple : varimax) pour maximiser la corrélation des axes avec certaines variables principales et aider à l'interprétation
- ◆ Ne pas interpréter les axes à inertie très faible

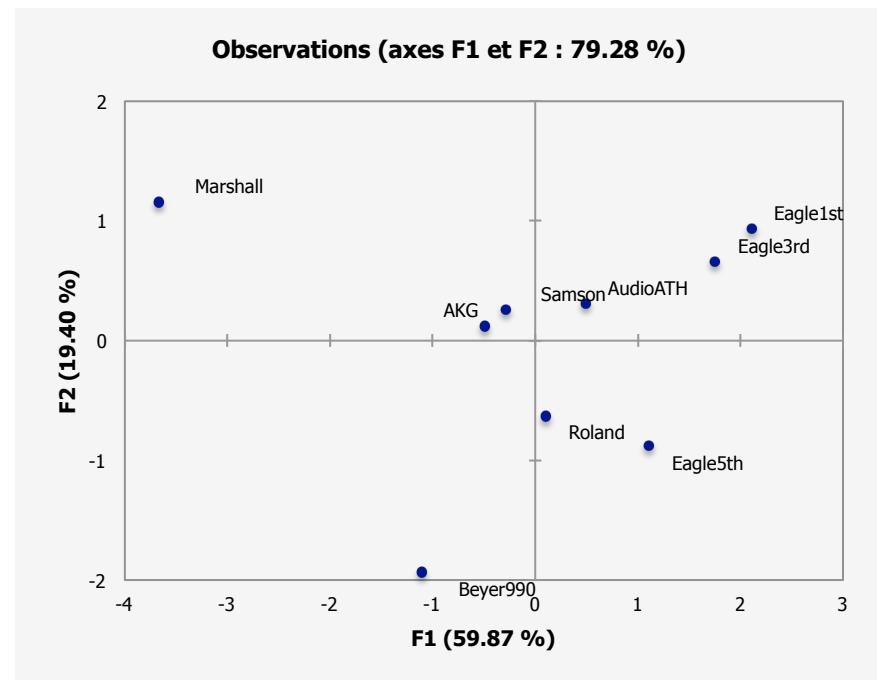
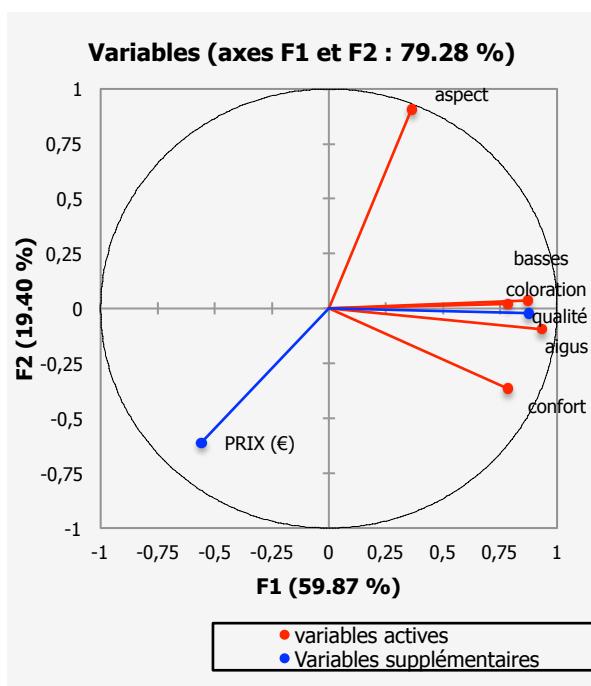
Exemple : casques audio

- ◆ ACP normée des évaluations moyennes



Exemple : casques audio

- ◆ ACP normée des évaluations moyennes
- ◆ Projection de 2 variables supplémentaires : "qualité" et "prix"



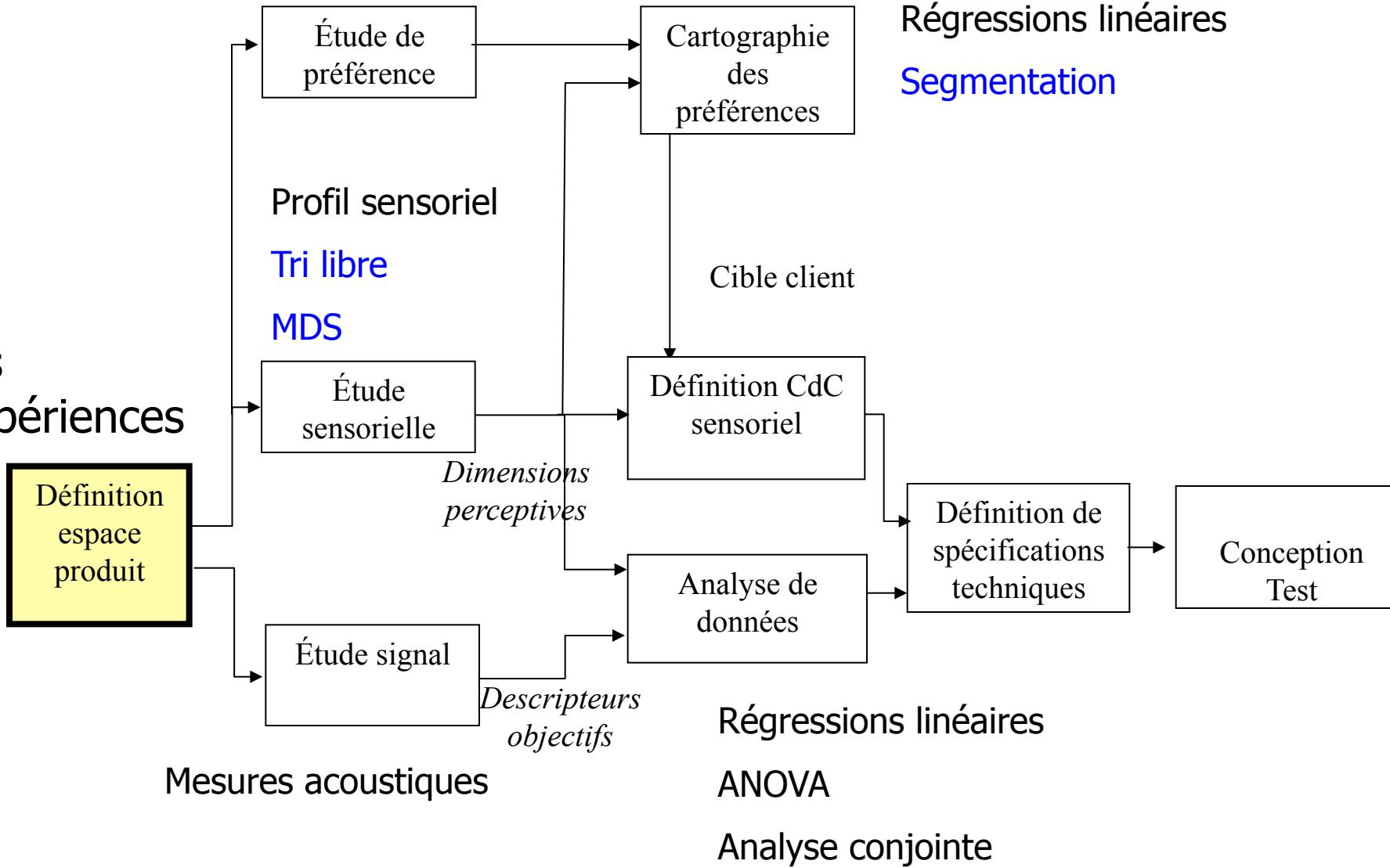
Conclusions sur l'ACP

- ◆ Méthode pour étudier la structure de données
- ◆ Recherche de variables latentes
- ◆ Compromis entre 2 objectifs contradictoires
 - Avoir un espace de faible dimension
 - Conserver un % explicatif important
- ◆ Obtention de dimensions décorrélées
 - Utilisation en régression linéaire multiple pour avoir des variables explicatives décorrélées (régression sur composantes principales)
- ◆ Utilisation en cartographie de préférence
 - Régression de la préférence sur les CP

Etude de la qualité perçue Cartographie des préférences

Démarche générale

Plans
d' expériences



Rappels sur la régression linéaire

Rappel : régression linéaire simple

Relation linéaire entre y et x de la forme :

$$y_i = a \cdot x_i + b + \varepsilon_i$$

- Exemple : sportivité/puissance ?

	sportivité	Puissance
Laguna Break 2 Td	-1	110
Mini Cooper	1	95
BMW 525 i pack	2	170
AUDI A8d	2	225
Clio 1.4 RT	-1	78
307 Xsi	1	120
Scénic RTd	-2	118
Ferrari 360 spider	3	380
Land rover freemaster	2	177
Citroen Picasso Hdi	0	115
Renault twingo	-2	60
Chrisler PT Cruiser	1	141

y : Variable à expliquer :
(ou variable dépendante)

x : Variable explicative
(variable indépendante)

Détermination de a et b qui minimisent les résidus S

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

Droite des moindres carrés

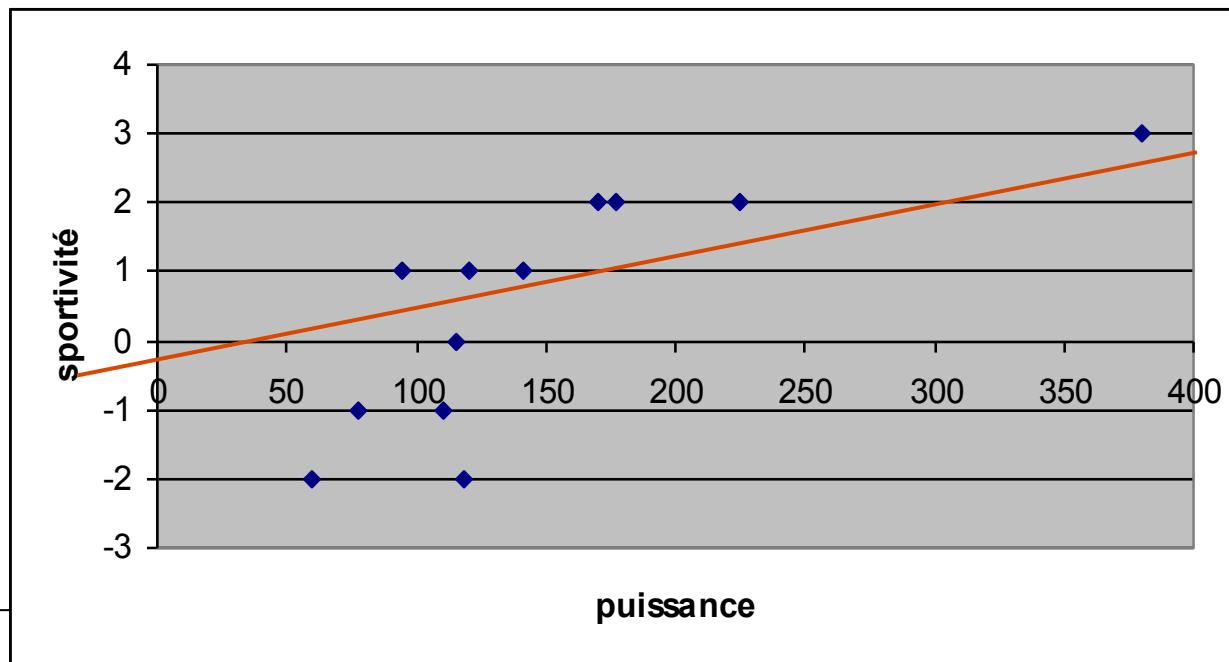
Rappel : régression linéaire simple

- Estimation des coefficients par la méthode des moindres carrés : On trouve

$$a = \frac{COV(x, y)}{\sigma_x^2} \quad b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}$$

Le modèle linéaire est : $\hat{y} = a \cdot x + b$

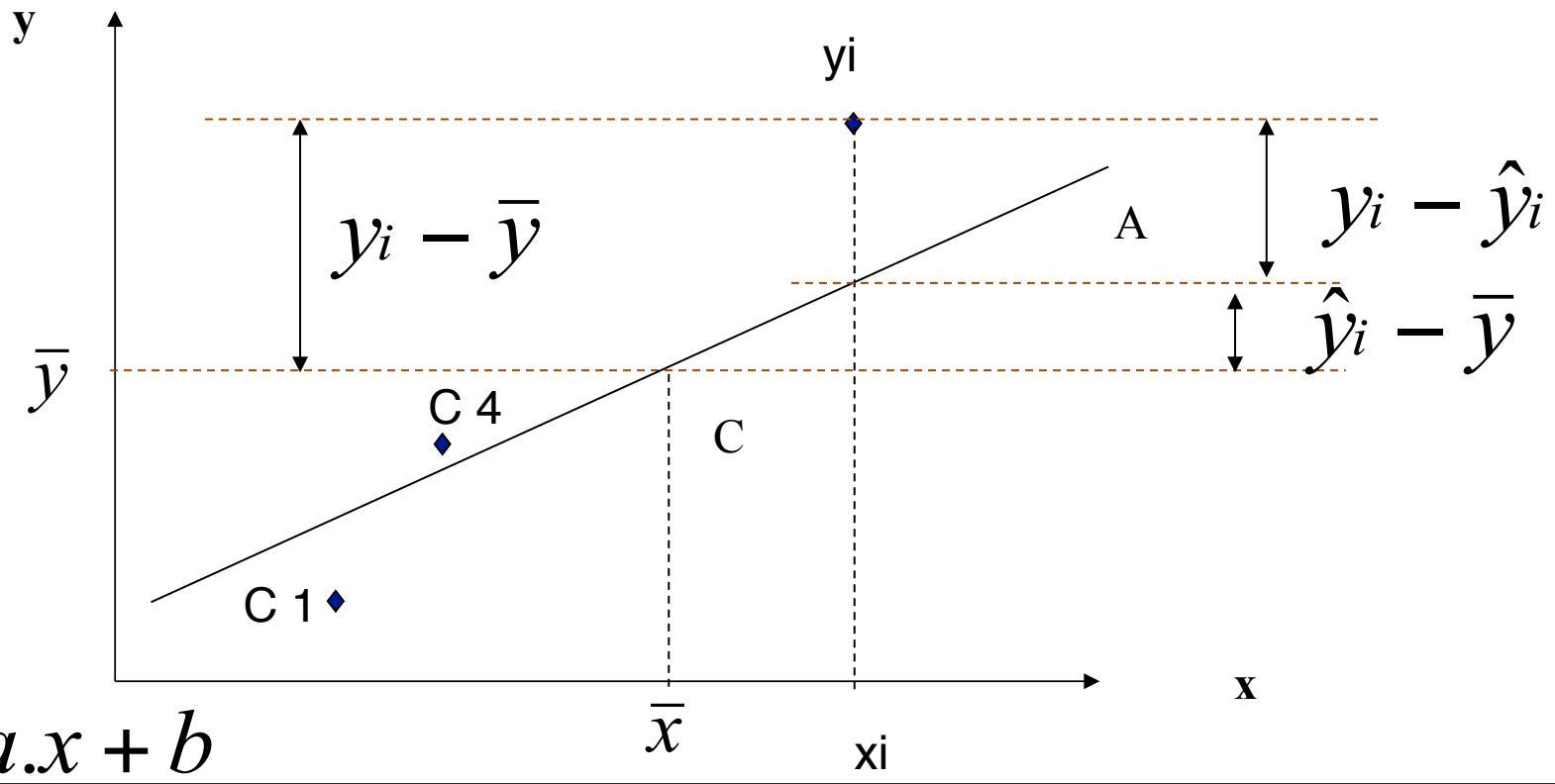
- Exemple : sportivité/puissance



Coefficient de détermination r^2

$$R^2 = \frac{\text{variation expliquée}}{\text{variation totale}} = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)$$



Rappel : régression linéaire simple

Coefficient de détermination R^2

$$R^2 = \frac{\text{variation expliquée}}{\text{variation totale}} = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

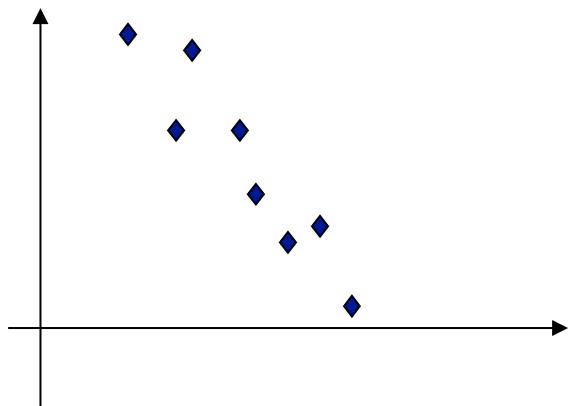
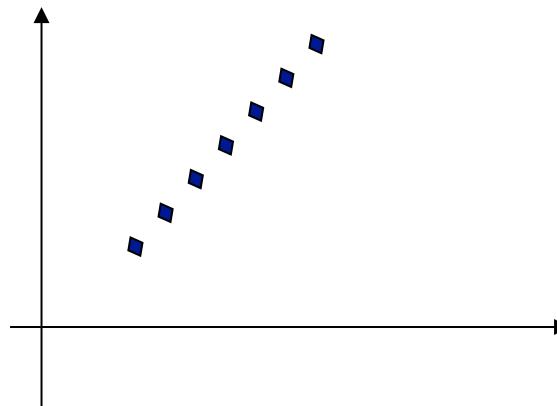
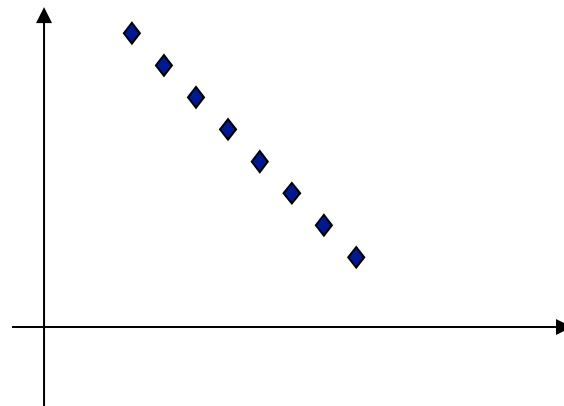
$0 \leq R^2 \leq 1$

R^2 : indice de la qualité de la droite d'ajustement aux observations

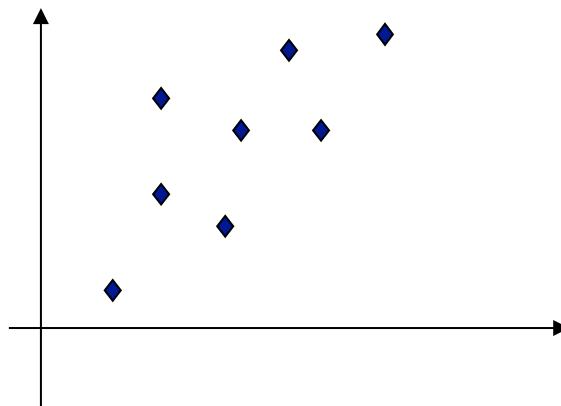
% d'information expliqué par le modèle

On montre que c'est le carré du coefficient de corrélation r_{xy}

Coefficient de détermination

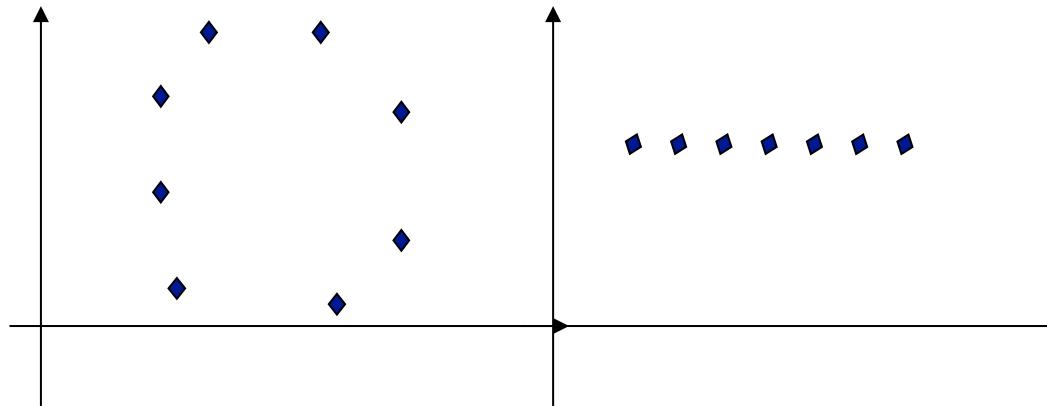
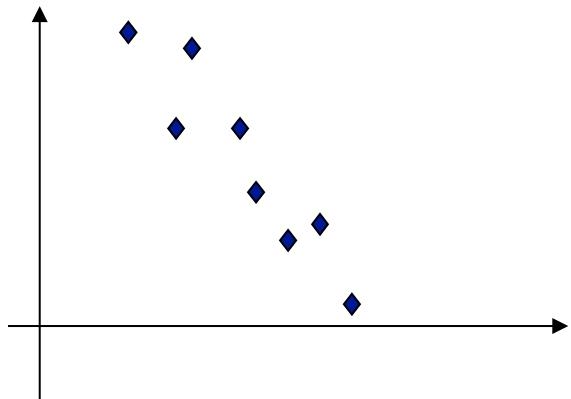
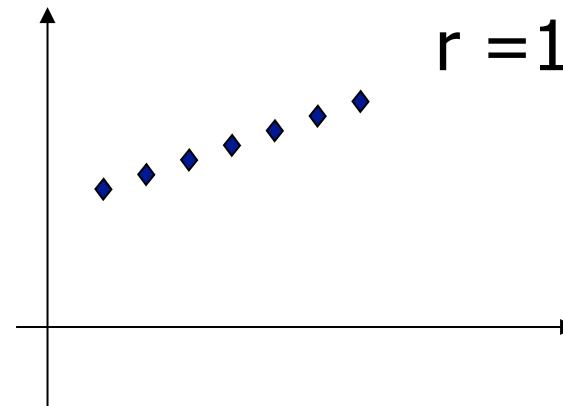
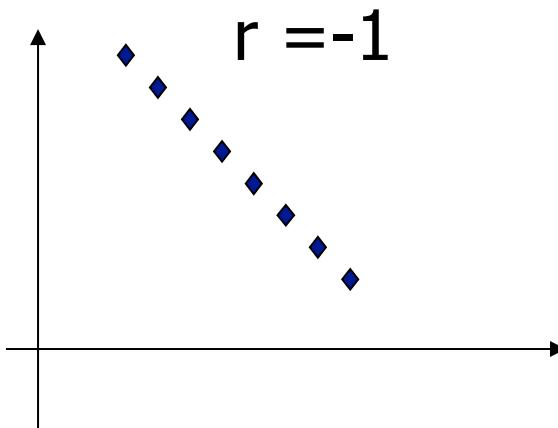
$$R^2 = 1$$


$$R^2 = 0,8$$



$$R^2 = 0,4$$

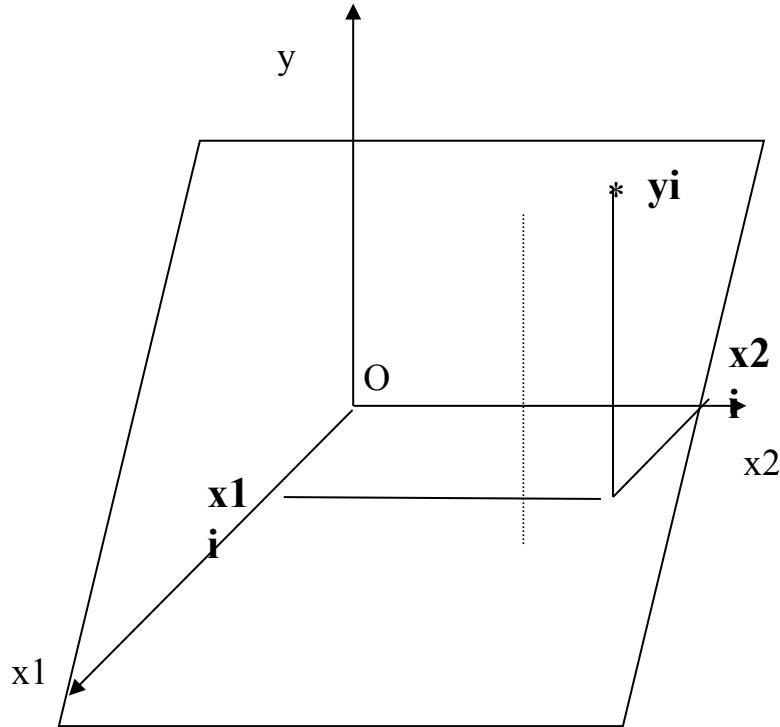
Coefficient de corrélation



Régression linéaire multiple

- ◆ On généralise au cas où il y a plusieurs variables explicatives x_1, x_2, \dots
- ◆ Exemple $y_i = ax_{1i} + bx_{2i} + c + \varepsilon_i$

Plan des moindres carrés



Régression linéaire multiple

- ◆ Généralisation : notation matricielle

$$y = X.\alpha + \varepsilon$$

$$\begin{matrix} y_i \\ \vdots \\ y_i \end{matrix} = \begin{matrix} 1 & & & \\ 1 & & & \\ x_{i1} & \dots & \dots & x_{ip} \\ 1 & & & \\ 1 & & & \\ 1 & & & \end{matrix} \times \begin{matrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{matrix} + \begin{matrix} \varepsilon_i \\ \vdots \\ \varepsilon_i \end{matrix}$$

- ◆ Les coefficients ($\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p$), estimateurs des ($\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p$), qui minimisent les résidus, sont donnés par :

$$\alpha = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot y$$

Rappel (2)

- ◆ X : tableau des variables indépendantes VI
 - ◆ Y : vecteur de la variable dépendante VD
-
- ◆ La matrice $(X^T \cdot X)$ doit être inversible (de rang plein)
 - ◆ La solution est instable si les VI sont très corrélées
 - grande incertitude sur les coefficients de la régression
 - Pouvoir prédictif faible
-
- ◆ Solution : décorrélérer les VI
 - Régression régularisée (régression sur les composantes principales)

Rappel (3)

$$R^2 = \frac{\text{variation expliquée}}{\text{variation totale}} = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

- ◆ R^2 : coefficient de détermination
 - Représente la qualité de l'ajustement du modèle (%)
 - $R^2 > 0.9$: très bon ajustement
 - $R^2 > 0.8$: bon ajustement
 - $R^2 < 0.6$: mauvais ajustement
- ◆ R^2 ajusté
 - Pb : en ajoutant des VI, le R^2 ne peut que croître
 - Remède : R^2 ajusté

Cf. le test sur
 R^2

$$R_a^2 = 1 - \frac{SCR/(n-p-1)}{SCT/(n-1)}$$

Utilisé pour comparer l'ajustement
de deux modèles
(NB : ce n'est plus un %)

Épreuves hédoniques

- Évaluer la préférence/acceptabilité de produits
- tests grandes échelles
 - Plusieurs centaines de sujets « naïfs »
 - Toujours N>60 sujets
- Utiliser des questions simples
- Plusieurs types
 - 1 : Évaluation hédonique
 - 2 : Épreuve de classement
 - 3 : Épreuve par paires

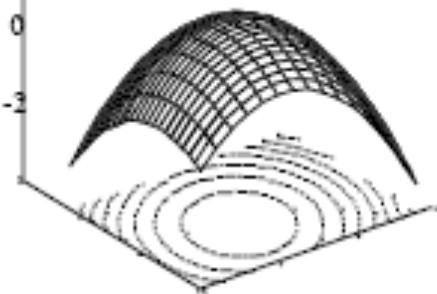
Cartographie des préférences

◆ Objectifs

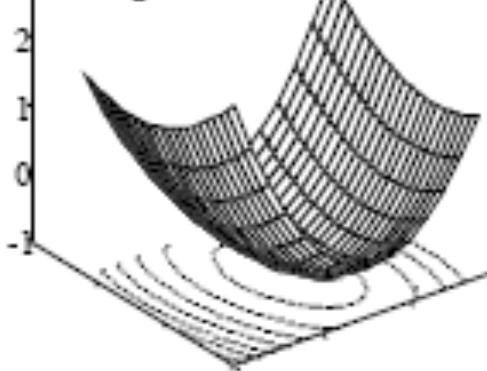
- Pour chaque sujet, construire un modèle expliquant la préférence par des grandeurs descriptives des produits
 - Grandeurs sensorielles
 - Grandeurs instrumentales
- interpréter graphiquement les préférences
- orienter la conception vers des formules préférables
- Segmenter les clients en fonction des préférences

Différentes formes de la préférence

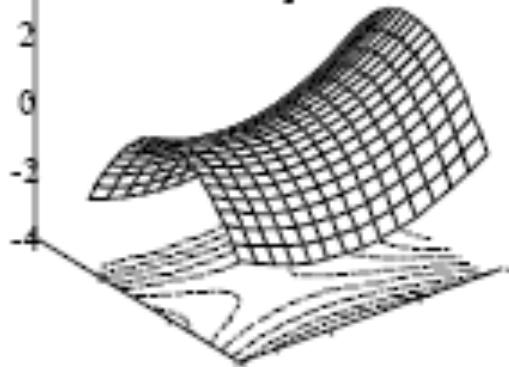
"Préférieurs"



« Rejeteurs »



« Eclectiques »



Exemple introductif

- ◆ Test d'acceptabilité d'un **dessert à la vanille**

- Objectif

- Définir la formulation préférable au niveau sensoriel



- Données sensorielles

Jury d'experts

	flaveur	texture
	Saveur de vanille : d1	Onctuosité : d2
C 1	2	1
C 2	8	1
C 3	9	2
C 4	3	3
C 5	8	6
C 6	1	3
C 7	2	8

7 produits
2 descripteurs

Exemple introductif

- Données « hédoniques »
 - Notes de préférence P du sujet

Consommateur courant

7 produits : C1 à C7

3 sujets : A, B, C

P	A	B	C
C 1	2	6	5
C 2	7	6	4
C 3	8	6,5	7
C 4	4,5	7	8
C 5	9	7,5	2
C 6	1,5	7	1
C 7	5	8	1

Exemple introductif

- Méthode
 - tenter d'expliquer les préférences des sujets par les données sensorielles définies par les experts
- Outil
 - Régression linéaire multiple

Variable explicative : les descripteurs d1, d2

Variable à expliquer : note de préférence

observations
(P_i , $d1_i$, $d2_i$)



Estimateurs des
coefficients a, b, c
du modèle

$$\hat{P}_i = a.d1_i + b.d2_i + c$$

Exemple introductif

- Valeur prédite par la régression \hat{P}

$$\hat{P}_i = a.d1_i + b.d2_i + c$$

Tableau de synthèse des modèles de préférence

	a	b	c	R ²	F	Significatif (p=0.05)
A	0,82	0,42	-0,02	0,98	97,84	Oui
B	-0,02	0,27	6,02	0,94	31,17	Oui
C	0,15	-0,59	5,33	0,37	1,17	Non

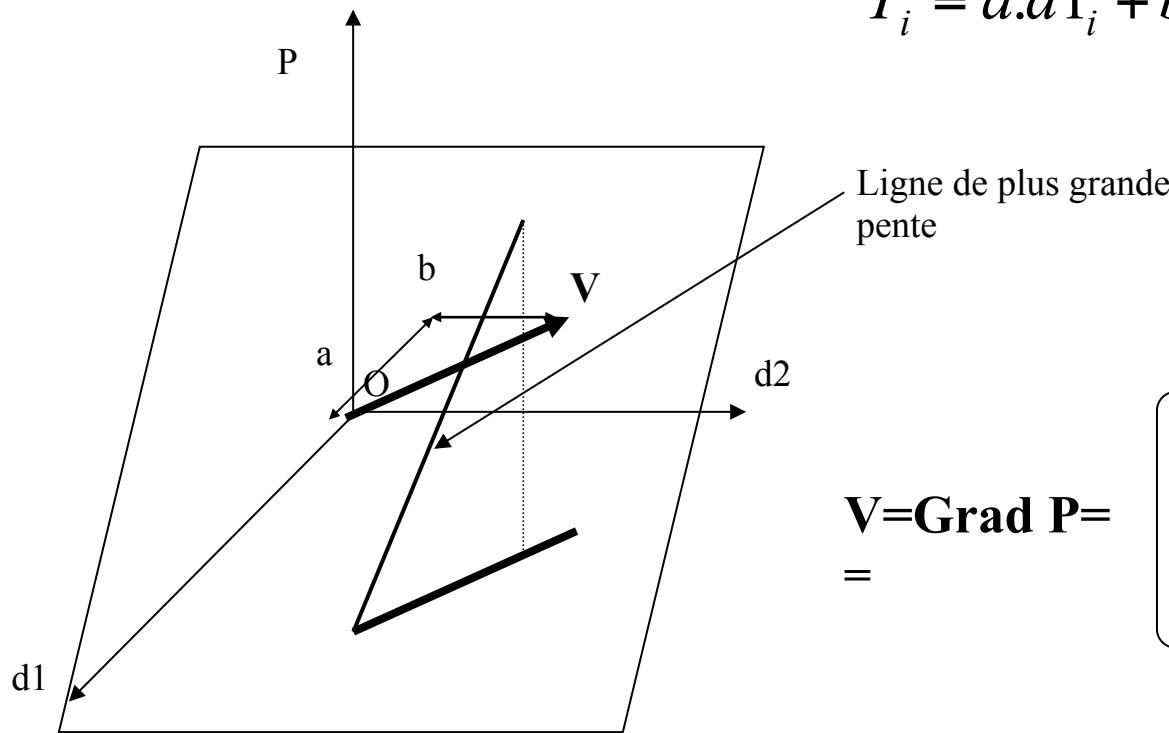
- Interprétation graphique de la régression
 - Pour chaque sujet, tracé du **modèle vecteur (gradient)**

$$grad(\hat{P}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{P}}{\partial d_1} \\ \frac{\partial \hat{P}}{\partial d_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

Le modèle vecteur (gradient)

- Situé arbitrairement à l'origine
- Colinéaire à la projection sur (d_1, d_2) de la ligne de plus grande pente du plan de régression
- Orienté vers l'augmentation de P
- de norme prop. à \mathbb{R}^2

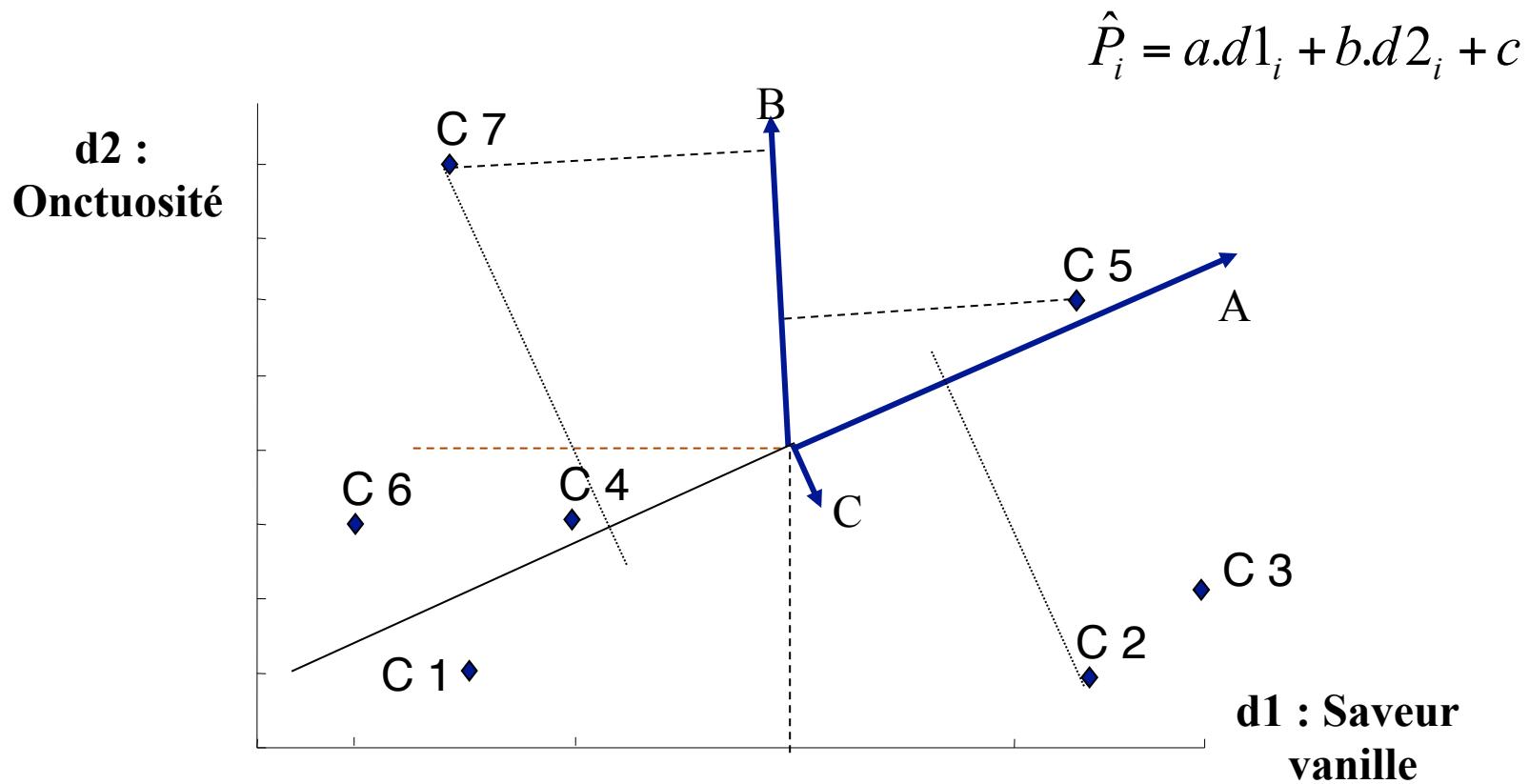
$$\hat{P}_i = a.d1_i + b.d2_i + c$$



$$\mathbf{V} = \mathbf{Grad} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix}$$

Exemple introductif

- Modèle vecteur
 - orienté vers l'augmentation de la préférence
 - les perpendiculaires au vecteur sont les iso-préférences



Exemple introductif

- Conclusions
 - sujet A :
 - Très bon ajustement du modèle ($R^2 = 98\%$)
 - aime bien à la fois une saveur vanille marquée et les crèmes lisses ($a = 0,82$; $b = 0,42$)
 - sujet B :
 - Très bon ajustement du modèle ($R^2 = 94\%$)
 - apprécie une crème très lisse ; indifférent au goût de vanille ($a = -0,02$; $b = 0,27$)
 - sujet C :
 - mauvais ajustement du modèle ($R^2 = 37\%$)
 - Pas d'interprétation des préférences à cause du modèle inadapté. La notation de préférence n'est pas expliquée par les descripteurs

Exemple introductif

- Cas du sujet C
 - Trois explications possibles :
 - C n'exprime pas de préférence,
 - » il en est incapable,
 - » il a répondu au hasard aux tests,
 - C est influencé par d'autres descripteurs que ceux proposés,
 - C a une structure de préférence plus complexe que les précédents, modèle vectoriel n'est pas adapté pour la décrire

Modèle vectoriel

$$\Rightarrow \hat{P}_i = a.d1_i + b.d2_i + c$$

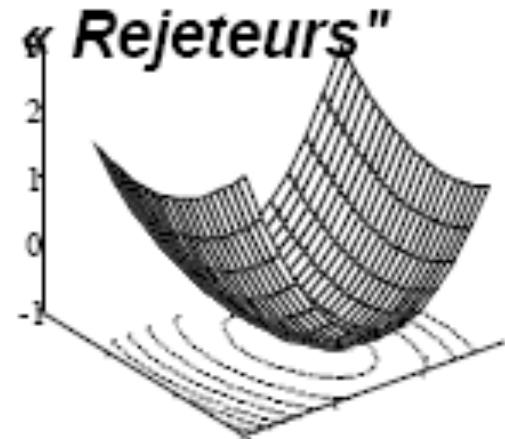
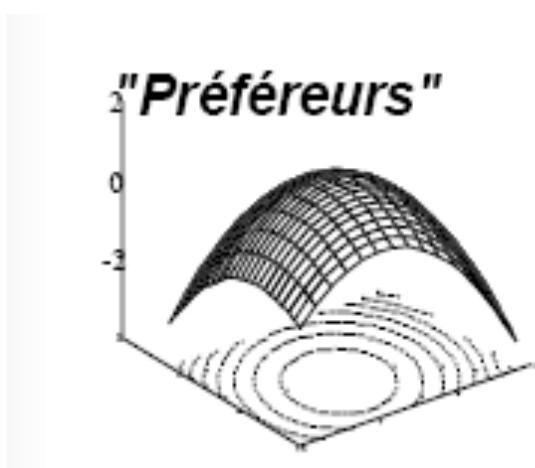
Modèle circulaire

$$\hat{P}_i = a_1.d1_i + a_2.d2_i + a_3.(d1_i^2 + d2_i^2) + c$$

Modèle circulaire

$$\hat{P}_i = a_1 \cdot d1_i + a_2 \cdot d2_i + a_3 \cdot (d1_i^2 + d2_i^2) + c$$

- Point idéal
 - $a_3 < 0$
 - Optimum de préférence
- Point anti idéal
 - $a_3 > 0$
 - Point de rejet



Modèle circulaire : sujet C

$$\hat{P}_i = a_1 \cdot d1_i + a_2 \cdot d2_i + a_3 \cdot (d1_i^2 + d2_{i_i}^2) + c \quad R^2 = 0.52$$

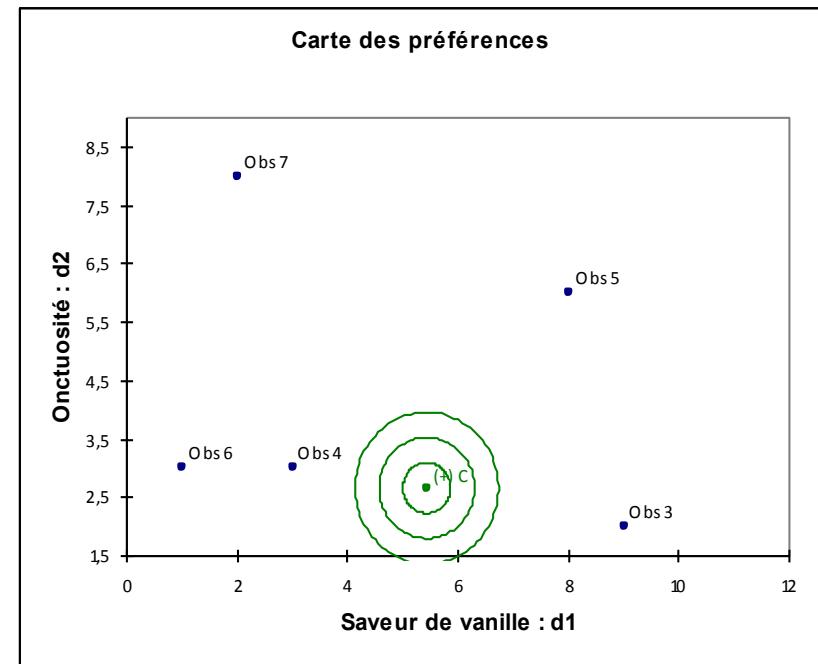
Coefficients du modèle :

	Constante	a1	a2	a3
C	0,443	1,996	0,979	-0,184

- Point idéal
 - $a_3 < 0$
 - Optimum de préférence

Position de l'optimum

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{a_1}{2a_3} \\ -\frac{a_2}{2a_3} \end{array} \right.$$



Cartographie des préférences

- ◆ interpréter graphiquement les préférences
- ◆ orienter la conception vers des formules préférables
- ◆ Construction d'un modèle individuel
 - on régresse le jugement hédonique sur les données perceptuelles, sensorielles ou instrumentales
- ◆ On utilise généralement les 2 premiers facteurs F_1 et F_2 de l'ACP pour régresser la préférence

Modèle vectoriel

$$\hat{P}_i = a.F1_i + b.F2_i + c$$

Modèle circulaire

$$\hat{P}_i = a_1.F1_i + a_2.F2_i + a_3.(F1_i^2 + F2_i^2) + c$$

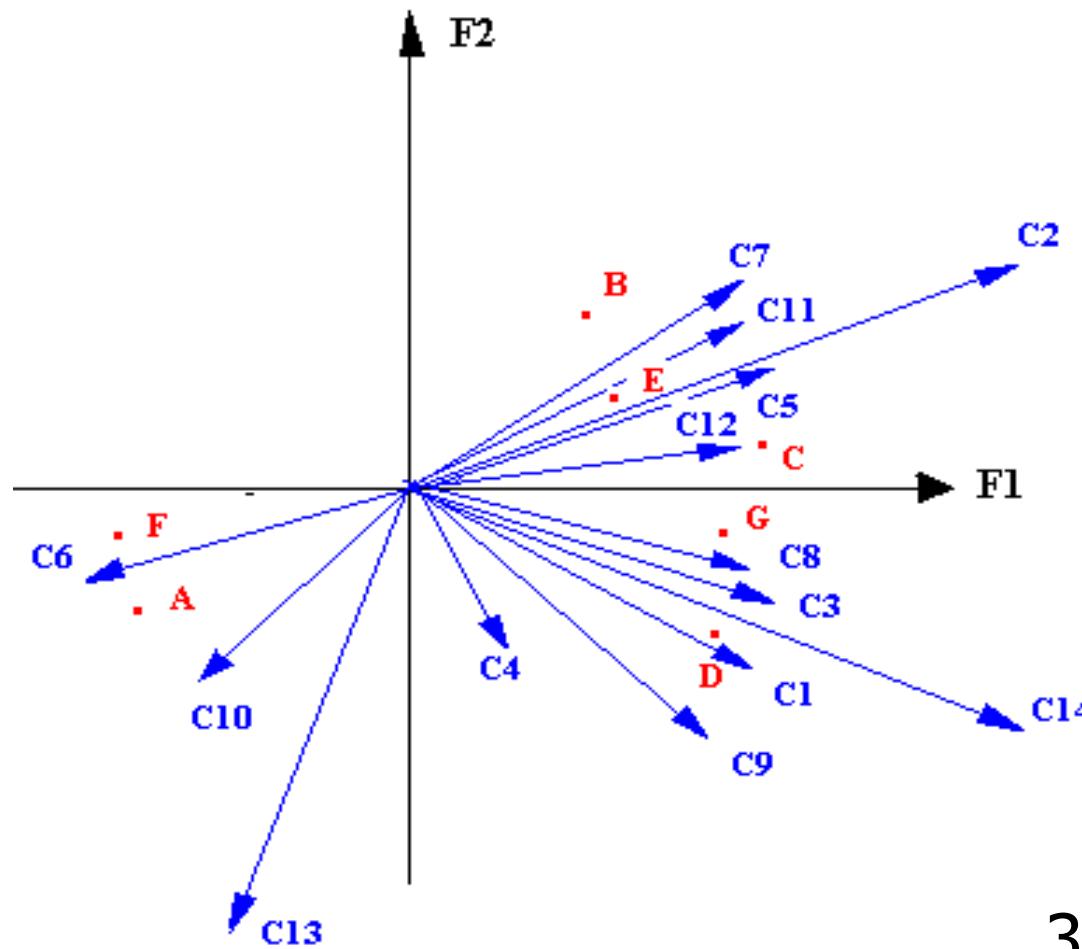
Modèle elliptique

$$\hat{P}_i = a_1.F1_i + a_2.F2_i + a_3.(F1_i^2) + a_4.F2_i^2 + c$$

Modèle complet

$$\hat{P}_i = a_1.F1_i + a_2.F2_i + a_3.(F1_i^2) + a_4.F2_i^2 + a_5.F1_i.F2_i + c$$

Panel de consommateurs : Modèle vectoriel

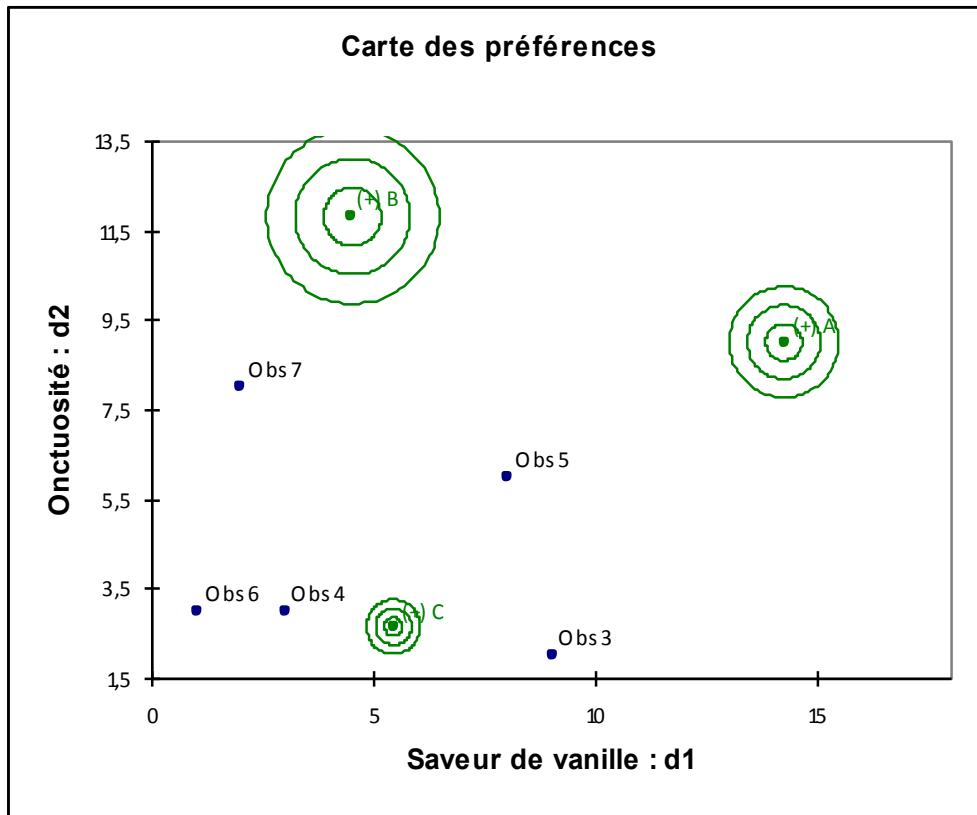


7 produits A, B, C, D, E, F, G

14 consommateurs C1 à C14

3 groupes de consommateurs

Modèle circulaire



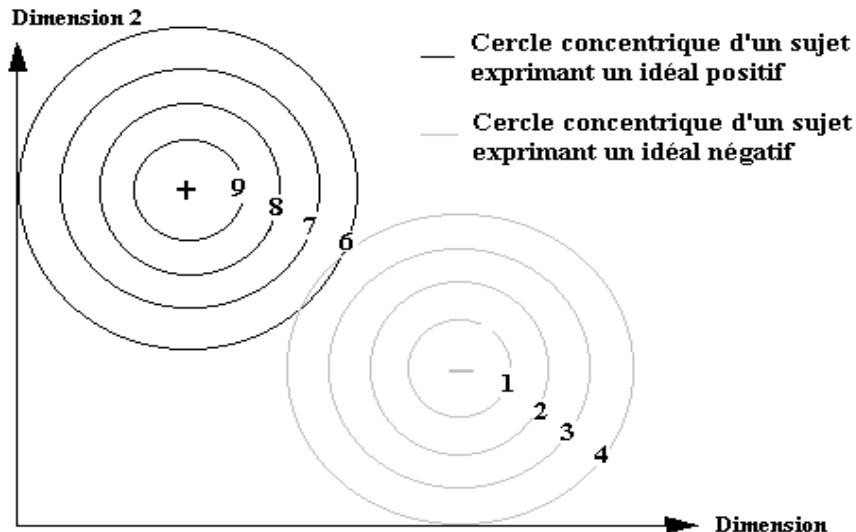
points idéaux
des 3 sujets A,
B, C

Modèle circulaire (point extreme)

$$\hat{P}_i = a_1 \cdot d1_i + a_2 \cdot d2_i + a_3 \cdot (d1_i^2 + d2_i^2) + c$$

pt extreme

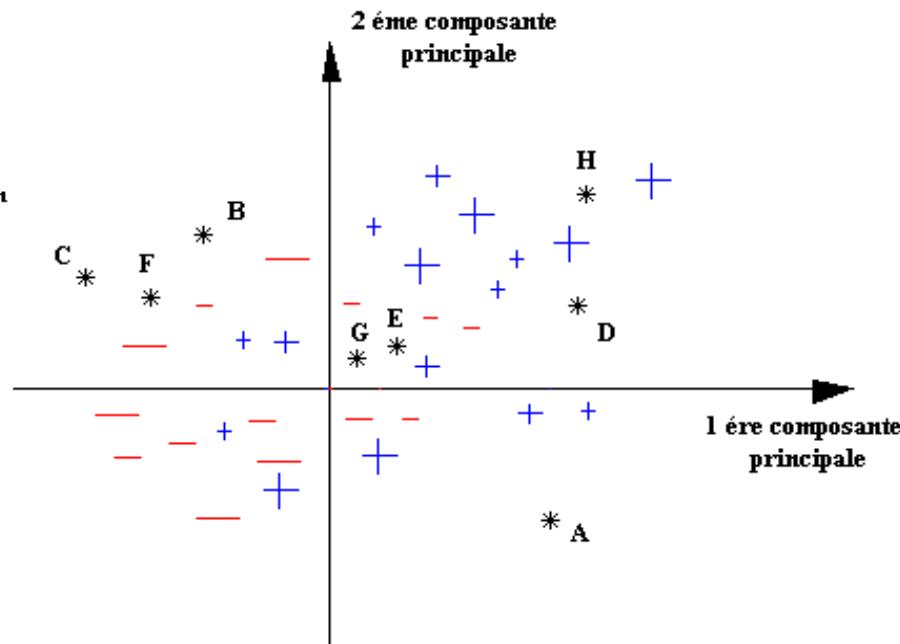
$$\begin{pmatrix} -a_1/2a_3 \\ -a_2/2a_3 \end{pmatrix}$$



Produit segmentant

Ideal si $a_3 < 0$

Anti ideal si $a_3 > 0$



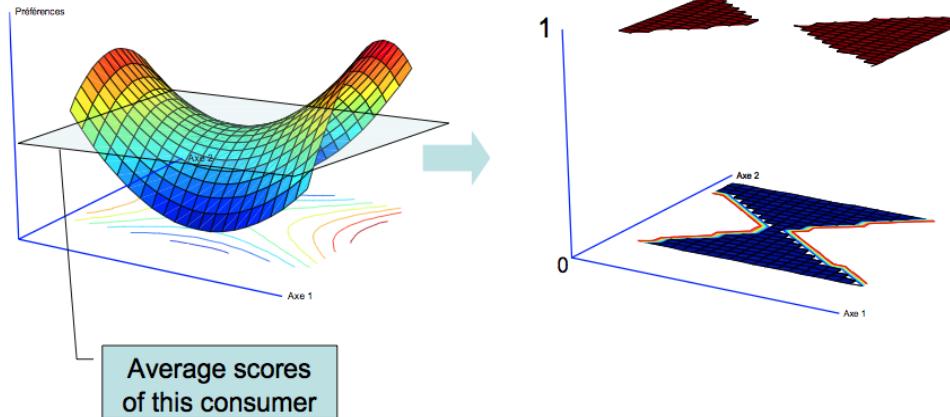
Agrégation des données individuelles

Seuil pour chaque sujet i

$$C_i(x,y) = 1 \text{ si } P_i(x,y) \geq \bar{P}_i(x,y)$$

$$C_i(x,y) = 0 \text{ si } P_i(x,y) < \bar{P}_i(x,y)$$

=1 si la préférence est supérieure à la valeur moyenne, 0 sinon



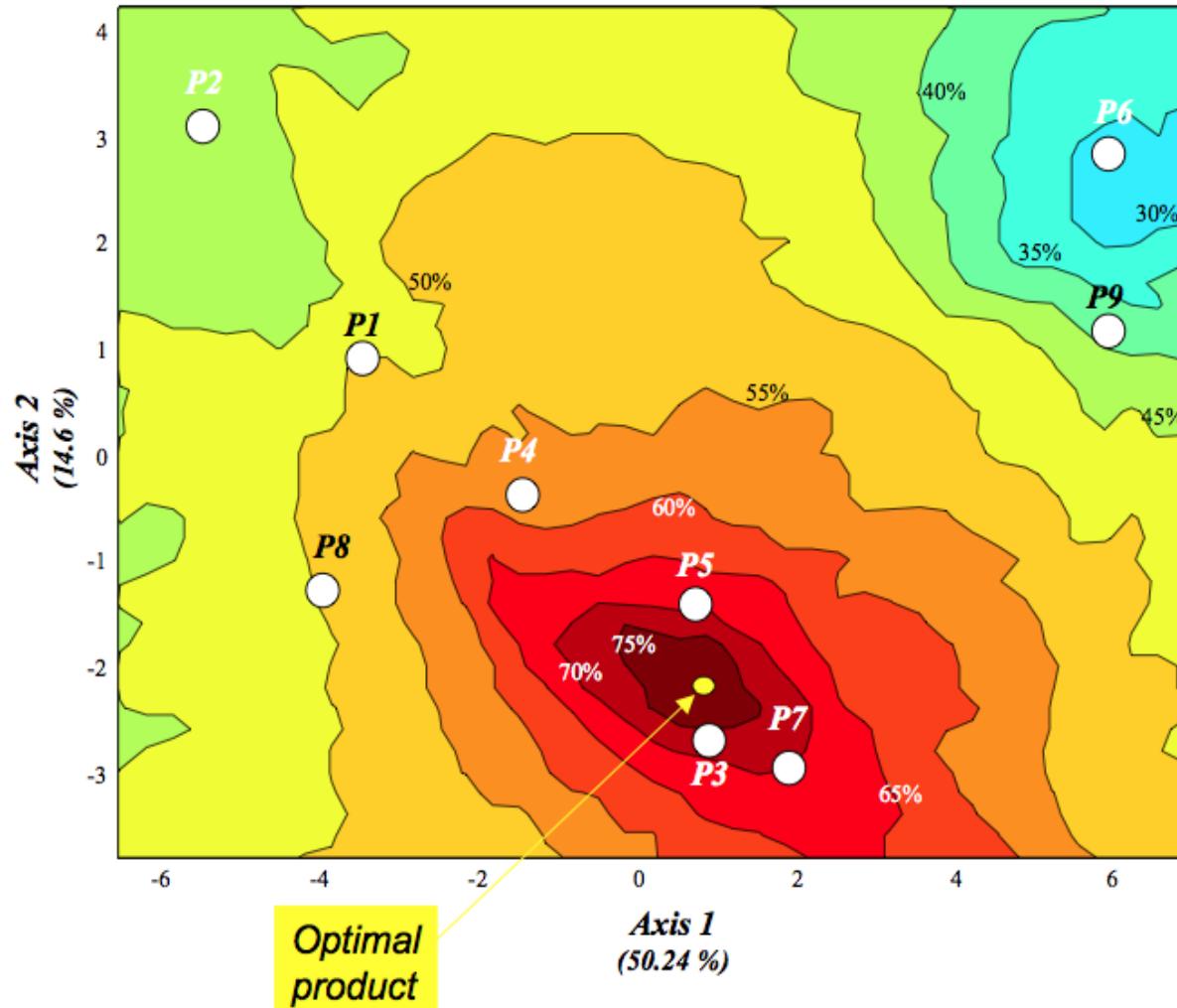
Agrégation de la préférence pour tous les sujets

$$P(x,y) = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n C_i(x,y)}{n}$$

Surface de préférence

Surface de préférence

Courbes de niveau



Exemple – matériau volant

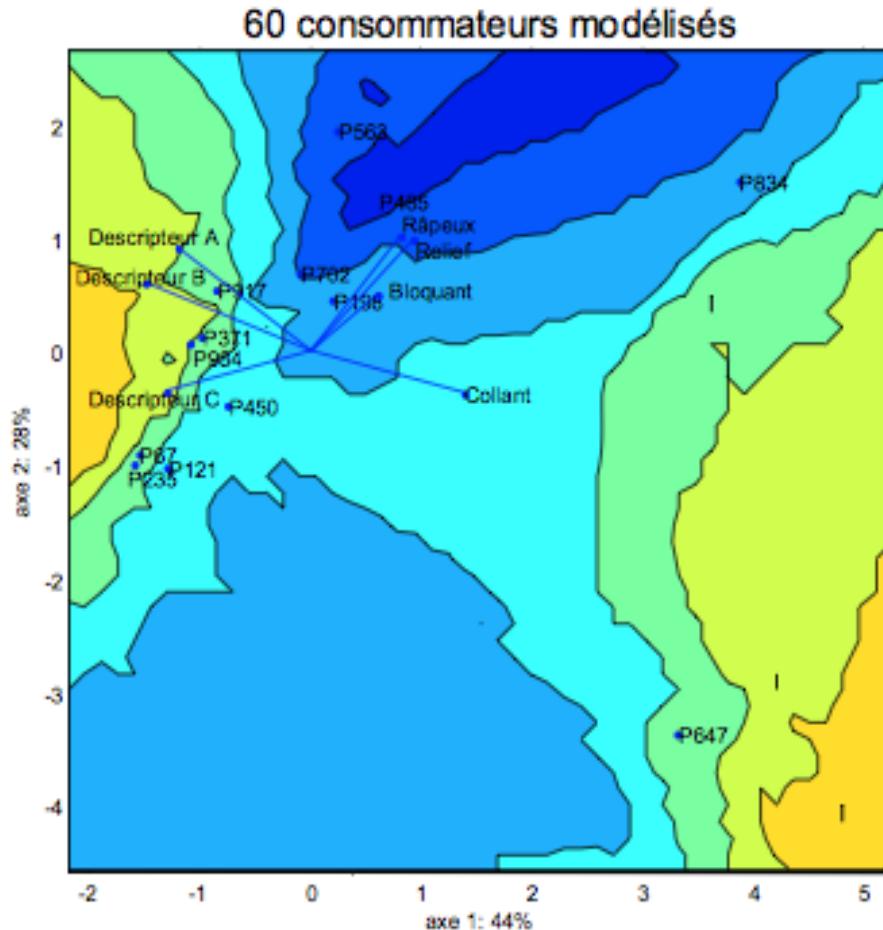


Figure 4 : Cartographie des préférences tactiles

- ◆ « Rapeux » et « relief » inhibe la préférence
- ◆ Statut segmentant de « collant » et « descripteur A et B »

RESUME : cartographie des préférences

- ◆ Outil du marketing pour le positionnement concurrentiel
- ◆ Outil de synthèse de solution lorsque les attributs « perçus » du produit sont déterminants
 - alimentaire
 - cosmétique
 - vision
 - acoustique
- ◆ N.B :
 - ne propose qu 'un modèle très simplifié des préférences
 - effets de seuils, d'interaction, de saturation, non considérés
 - difficulté pour trouver les caractéristiques produit pertinentes
 - Innovation de rupture ?

Exemple : son de fermeture de téléphone pliable



- ◆ Étude sensorielle et perceptive
 - 8 sons enregistrés, P1 à P8
 - Panel de 7 juges (experts designers)
 - 6 descripteurs

Descripteurs
sec, net
feutré
vibrant
nerveux
sourd
aigu, métallique

- ◆ Étude de préférence
 - 200 consommateurs
 - Échelle à 9 points (de 1 : je n'aime pas du tout à 9 : j'aime beaucoup)
 - Classification des 200 consommateurs en 4 groupes A, B, C, D

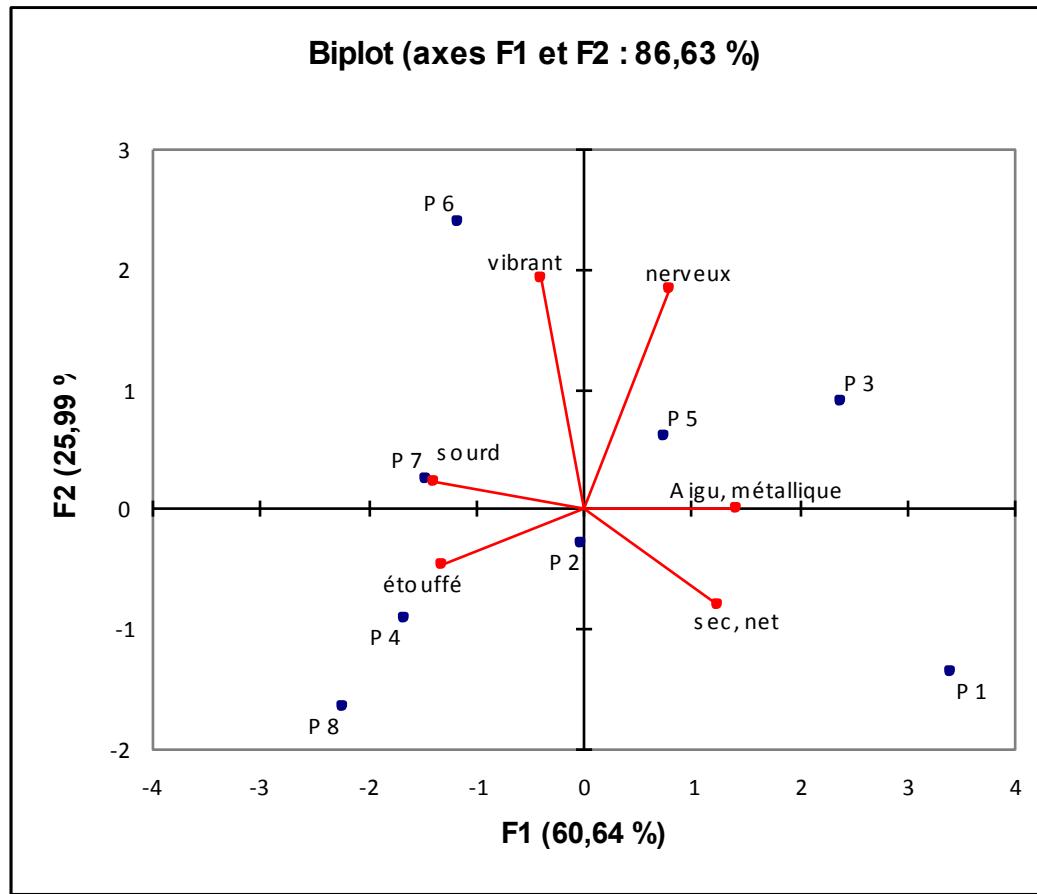
J.M. Lopez, A. Guenand. "Study on subjective evaluation of perceived quality of flap mobile phones and prediction of sensorial profile". Proceedings of ICED 03, Stockholm, 2003.

Exemple : téléphones portables

ACP normée des données sensorielles



- ◆ 2 dimensions perceptives principales
 - F1 : « sourd » opposé à « aigu »
 - F2 : nerveux, vibrant



Exemple : téléphones portables

Modèle de préférence

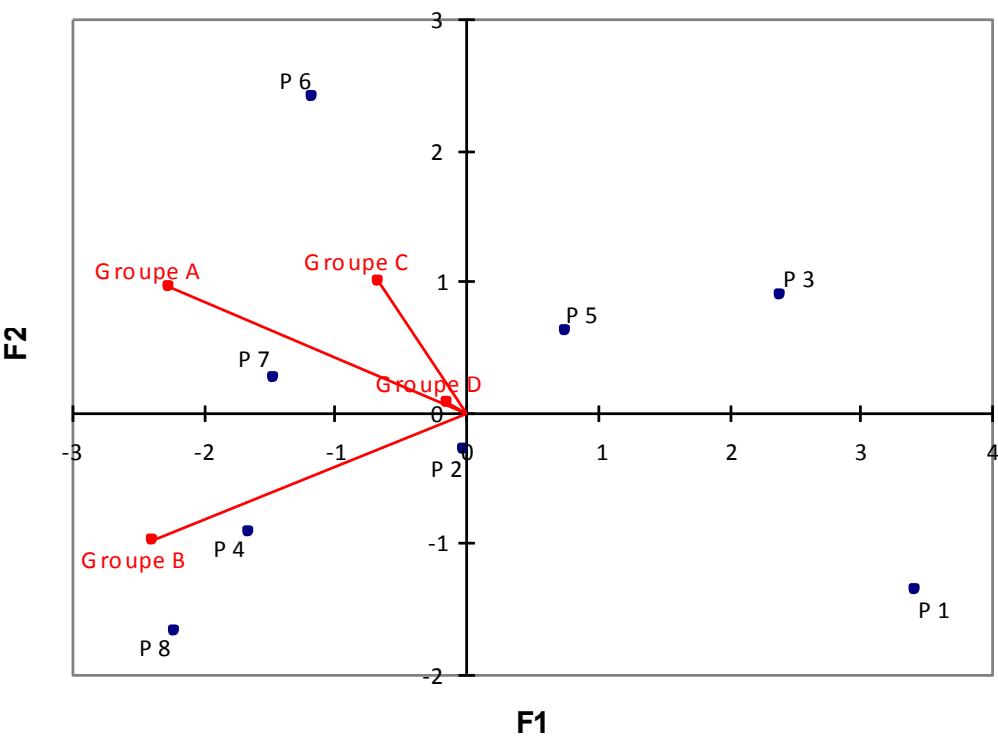


Modèle linéaire (vectoriel)

$$\overline{P}_i = a.F1_i + b.F2_i + c$$

	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	R ²	F-ratio	Pr > F
Groupe A	2	16,518	8,259	0,891	20,335	0,004
Groupe B	2	11,923	5,961	0,936	36,686	0,001
Groupe C	2	10,532	5,266	0,435	1,926	0,240
Groupe D	2	1,814	0,907	0,058	0,154	0,862

Carte des préférences



- ◆ Groupes A et B
 - Modèle correctement ajusté sur les données
 - Préférence orientée selon $-F1$
- ◆ Groupes C et D
 - Modèle mal ajusté
 - Impossible d'interpréter les préférences

Exemple en TP : « tapotement » de planches de bord (« toqué ») [Montignies, 2009]

- ◆ Une entreprise a des retours clients négatifs concernant le bruit de « toqué » de ses planches de bord (enquêtes)
- ◆ Quelles actions mettre en œuvre pour traiter ce problème ?



s18



s12



s16

Quantifier l'attente client

Vérifier que la proposition produit est conforme aux attentes

Assurer la conformité tout au long du processus de développement du produit

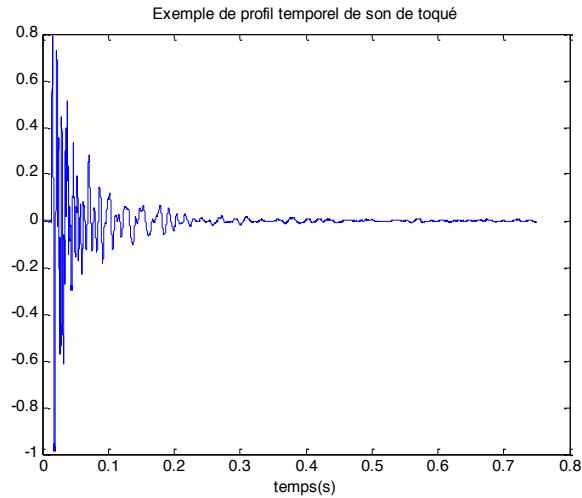
Expert ACOUSTIQUE = Le son produit dépend de différentes variables de conception

- Choix matériaux
- Formes
- Qualité des assemblages

Exemple « toqué » (2)

- ◆ Étude sensorielle et analyse signal
 - 31 sons enregistrés

Descripteurs
hauteur
Sec - feutré
intensité
résonant
proximité
durée

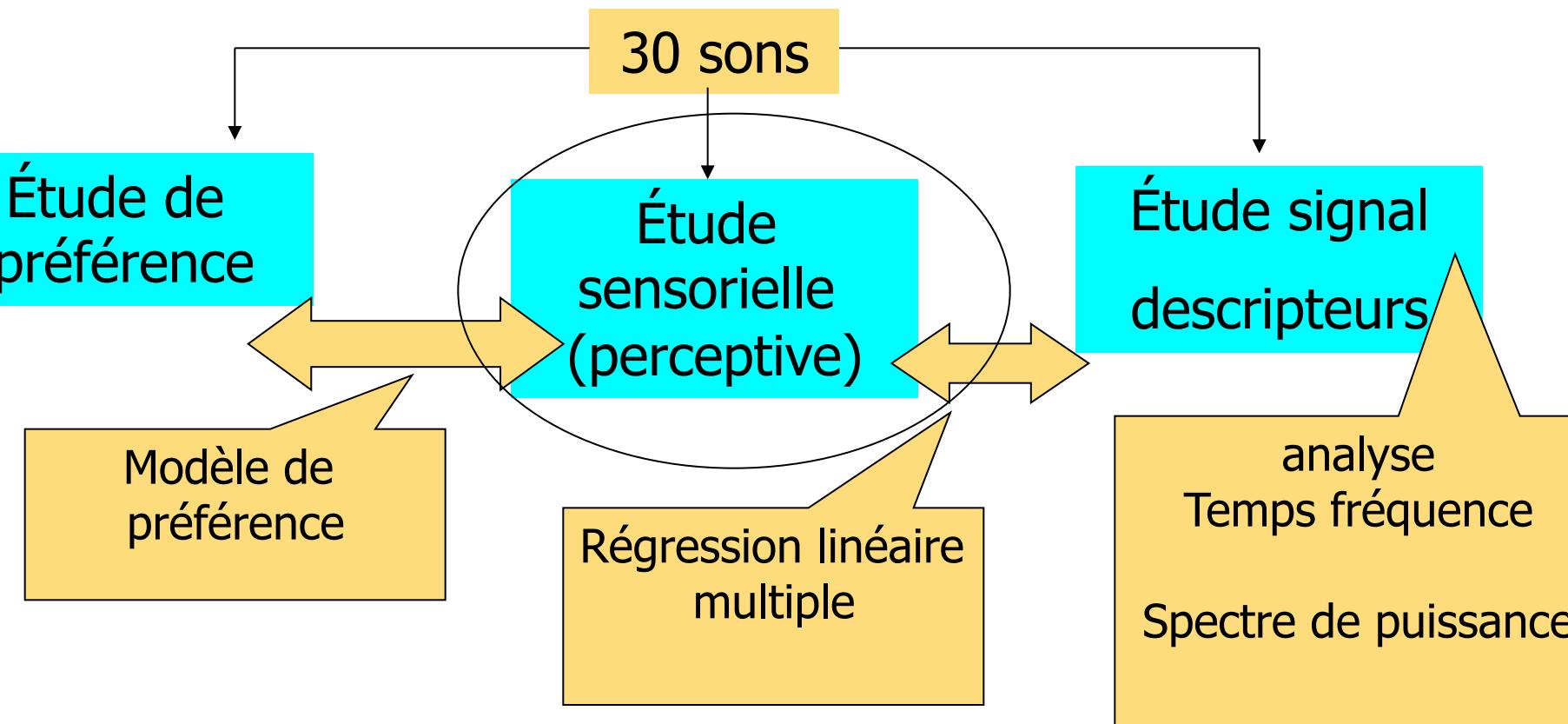


s18 s12 s16

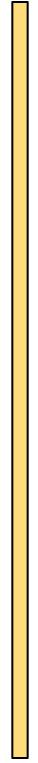
=> Interprétation des descripteurs sensoriels par des critères liés au signal acoustique

Exemple « toqué (3) : Démarche d'étude

- ◆ 3 familles d'évaluations



Etude sensorielle et perceptive

- ◆ Comment comprendre ce qui structure la perception ?
 - ◆ Comment définir les dimensions perceptives principales qui sous-tendent la perception ?
-
- 
- ◆ Méthodes verbales
 - Profil sensoriel (panel d'experts)
 - Différentiel sémantique
 - ◆ Méthodes non verbales
 - Tri libre
 - Épreuve de dissimilarité

Bibliographie

- ◆ MC ADAMS Stephen et BIGAND Emmanuel, Penser les sons. Psychologie cognitive de l'audition, Paris, Presses universitaires de France, 1994, 408 p
- ◆ Musique et Acoustique : de l'instrument à l'ordinateur. Philippe Guillaume. HERMES Lavoisier, 2005.
- ◆ La perception auditive. Alain Goyé. Cours de l'ENST disponible en ligne.
<http://assoacar.free.fr/archives/Cours/Psychoacoustique/Cours%20de%20TELECOM%20PARIS.pdf>
- ◆ Perception Acoustique et qualité sonore. Etienne PARIZET. Techniques de l'ingénieur. R6140.
- ◆ Traité d'évaluation sensorielle. Aspects cognitifs et métrologiques des perceptions. DUNOD, 2001
- ◆ Statistique Exploratoire Multidimensionnelle. Lebart A., Morineau A., Piron M. SCIENCES SUP, 2004.
- ◆ Evaluation sensorielle. Manuel Méthodologique. SSHA, 2^{de} édition, TEC&DOC Lavoisier, 1998.