



La sonie des sons impulsionnels : Perception, Mesures et Modèles

Isabelle Boulet

Thèse de Doctorat

de l'Université de la Méditerranée

Aix-Marseille II

Encadrée par Sabine Meunier (LMA) et Patrick Boussard (GENESIS)

Sous la direction de Georges Canévet (LMA)

Définition et importance de la sonie

La sonie est l'**équivalent sensoriel** de l'intensité physique d'un son.

Elle dépend non seulement du **niveau acoustique**, mais aussi du **contenu fréquentiel** et de la **durée** des signaux.

La sonie est le **facteur prédominant**
dans l'évaluation de la gêne.

Nécessité de connaître la sonie ←

La sonie est aussi un **indice très influent**
dans les études sur la **qualité sonore**.

Tests à sonie égalisée



Mesure et calcul de la sonie

La sonie est une **grandeur sensorielle** !

Mesure



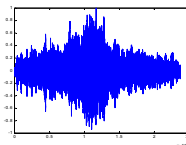
Test

psychoacoustique

Calcul

Modèle

Signal temporel



Sonie

Long
Complexe
Coûteux

Son stationnaire : sonie globale

Zwicker (1958), Moore et coll. (1997)

Son non stationnaire : sonie en fonction du temps

Zwicker et Fastl (1999), Glasberg et Moore (2002)

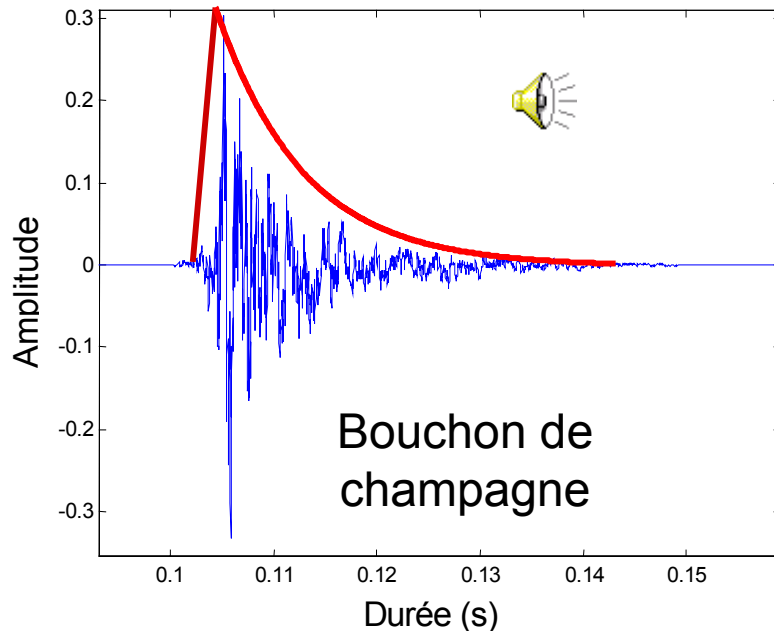
Rapide
Approximatif

Le son impulsif

➤ Définition de l'AFNOR :

« *Bruit consistant en une ou plusieurs impulsion(s) d'énergie acoustique, ayant chacune une durée inférieure à environ 1 s et séparée(s) par des intervalles de temps de durée supérieure à 0,2 s.* »

➤ Caractéristiques physiques



Choc de 2
pierres



Marteau
sur fer



Marteau sur
carreau

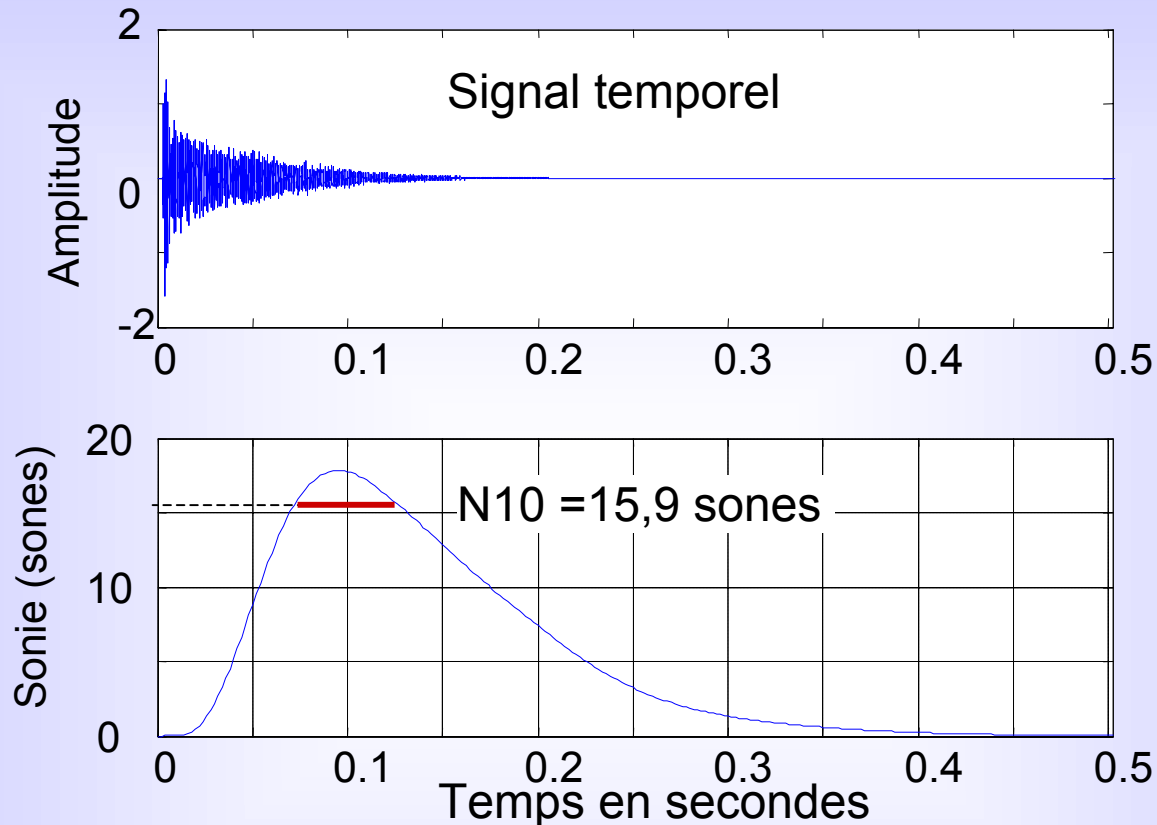


Triangle



Wood-block

Comment calculer la sonie globale de sons non stationnaires ?



Zwicker et Fastl : N4, N5, N7, N10 (Sonie dépassée X % du temps)

Prévu pour des sons variant lentement dans le temps (parole, trafic)

Glasberg et Moore : Maximum de la sonie (sons courts)

Pas d'indicateur proposé pour les sons impulsifs

La sonie des sons brefs

➤ Etudes sur les créneaux

Influence de :

- **Durée**



Durée critique (15 - 500 ms)

Modélisation de l'intégration temporelle
(exponentielle ou puissance)

- **Energie quand la durée varie**

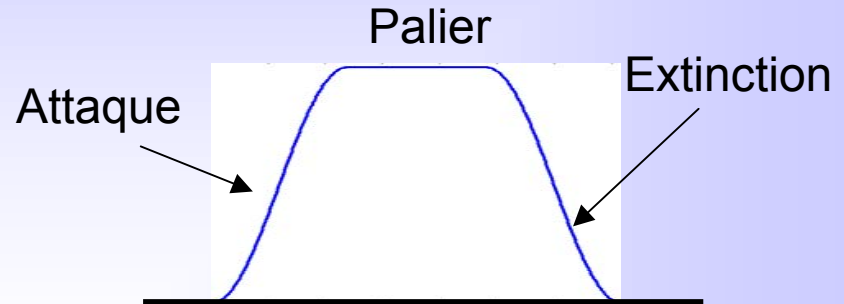
Résultats divergent :

$$S = f(E) \text{ ou } S = f(E, t)$$

- **Durée d'attaque**

Influence à partir de 0,3 ou 1,5 ms

Liée à la largeur spectrale



- **Niveau crête**

Influe sur la durée critique

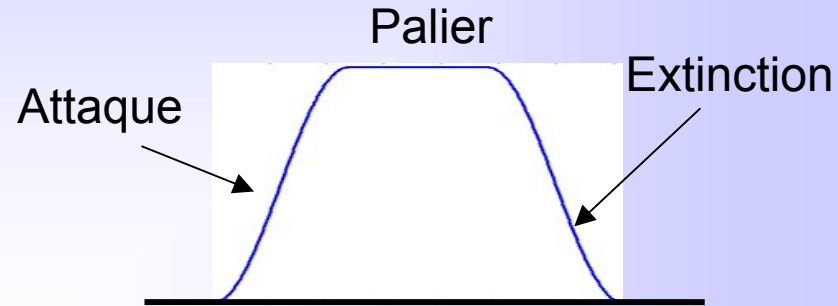
- **Fréquence**

Variation de la sensibilité de
l'oreille avec la fréquence

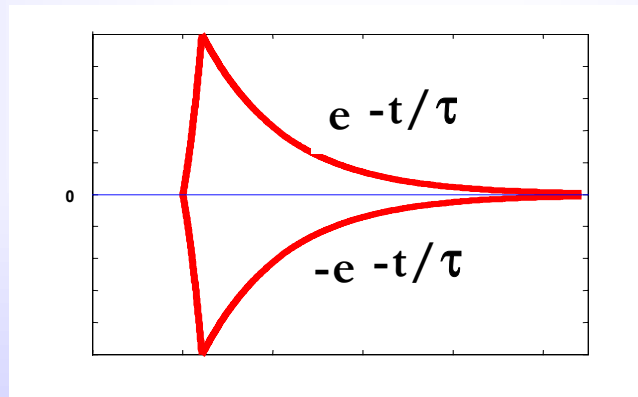
La sonie des sons brefs

➤ Etudes de sons brefs en créneaux

- Influence de :
- **Durée d'attaque**
 - **Durée**
 - **Energie**
 - **Niveau crête**
 - **Fréquence**



➤ Influence de ces paramètres peu étudiée pour les impulsions



➤ Pas de modèle pour les sons impulsionnels

Objectifs

➤ **Caractérisation perceptive de sons impulsionnels**

- Fonctions de sonie
- Lignes isosoniques
- Intégration temporelle

*Méthode de mesure
la mieux adaptée*

➤ **Elaboration d'un outil pour calculer la sonie de sons impulsionnels**

- Modèles existants
- Nouveaux indicateurs
- Estimateur de sonie d'impulsion
- Domaine d'application des différents modèles

Comparaison des méthodes

**Déterminer la méthode la mieux adaptée
pour mesurer le niveau d'isosonie**

Types de sons testés :

Sons stationnaires



Sons impulsionnels



Trains d'impulsions



**Tests réalisés par 14 auditeurs dans une salle anéchoïque du LMA
(restitution par une enceinte)**

Comparaison des méthodes

Estimation de grandeur sans référence

Mesure la sonie (en sones)

Ajustement

Adaptative (2down–1up, 1down–2up)

Adaptative à poursuites multiples

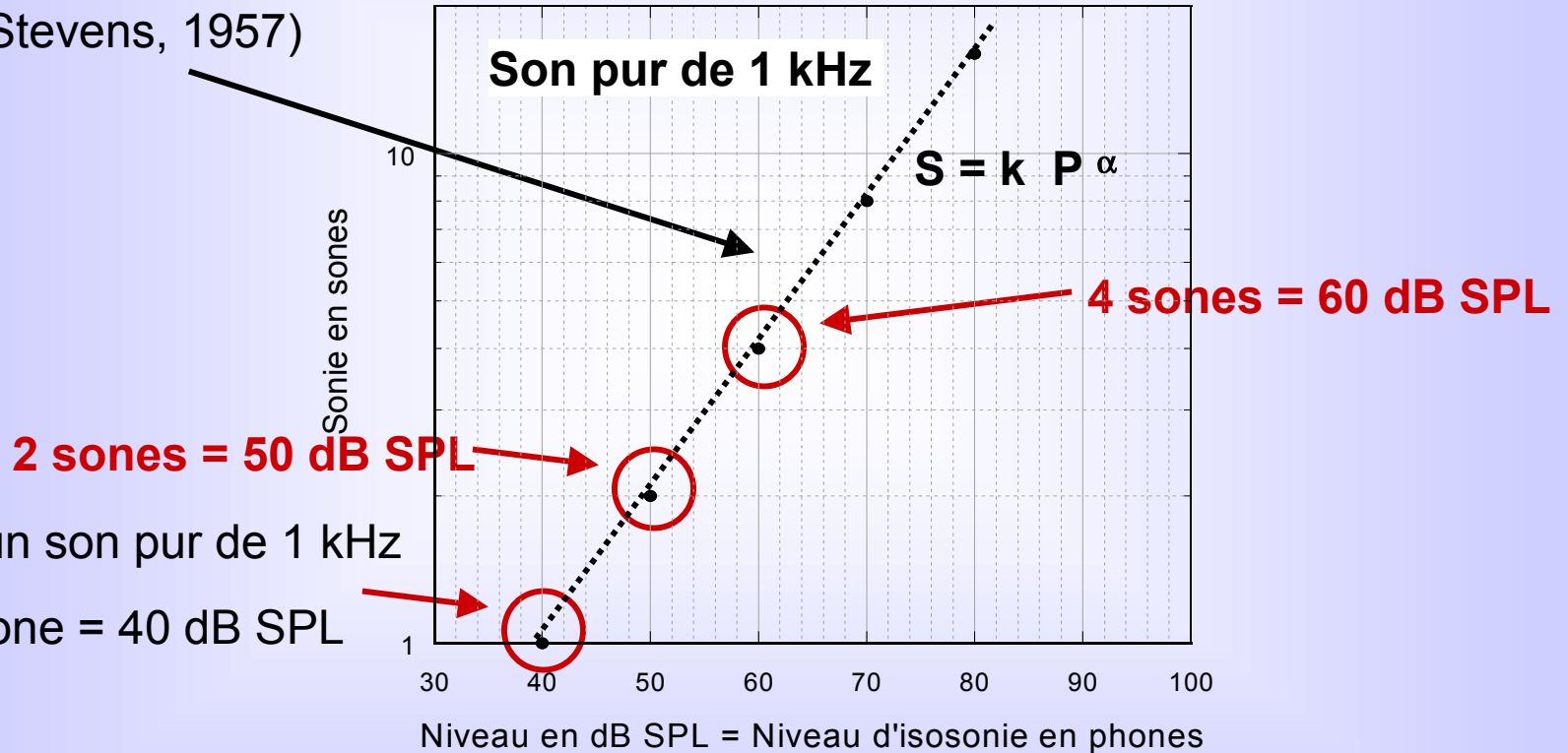
Mesurent le niveau d'isosonie (en phones)

⇒ Problématique de la **relation sones-phones** pour comparer les 4 méthodes

Relation sones – phones (fonction de sonie)

$$\alpha = 0,6 \Rightarrow S = k P^{0,6}$$

Exposant de la fonction de sonie
= 0,6 (Stevens, 1957)



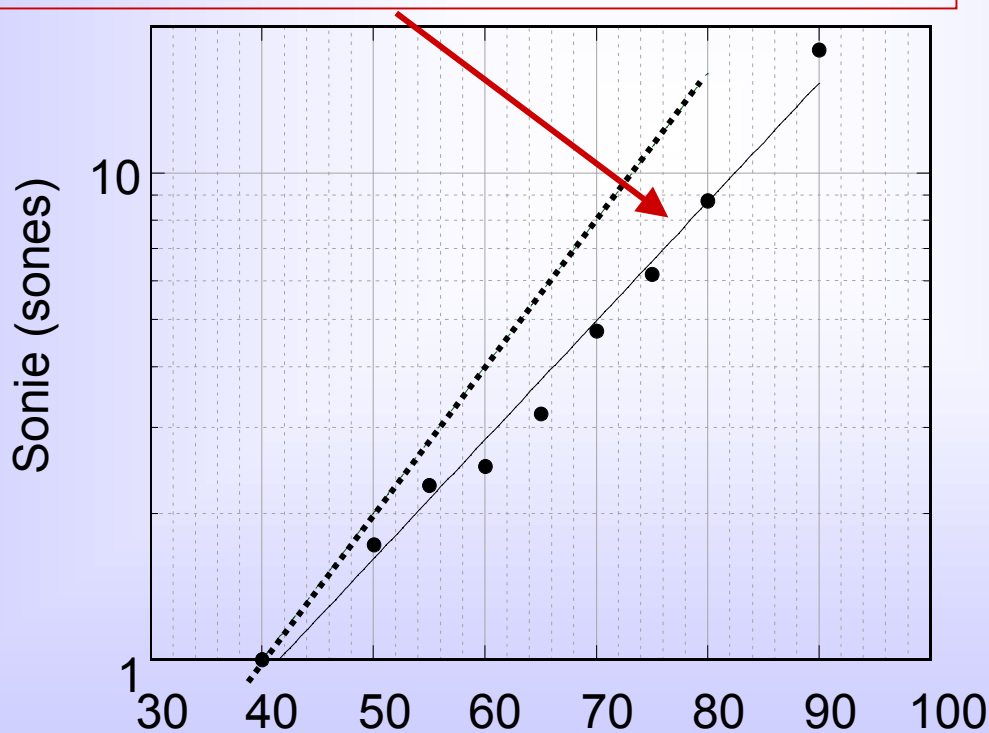
$$\Rightarrow \text{phones} = 40 + 20 \cdot \log(\text{sones}) / \alpha$$

Relation sones – phones (fonction de sonie)

$$\alpha = 0,6 \Rightarrow \mathbf{S = k P^{0,6}} \Rightarrow \mathbf{S_{phones} = 40 + 10 \cdot \log(S) / \log(2)}$$

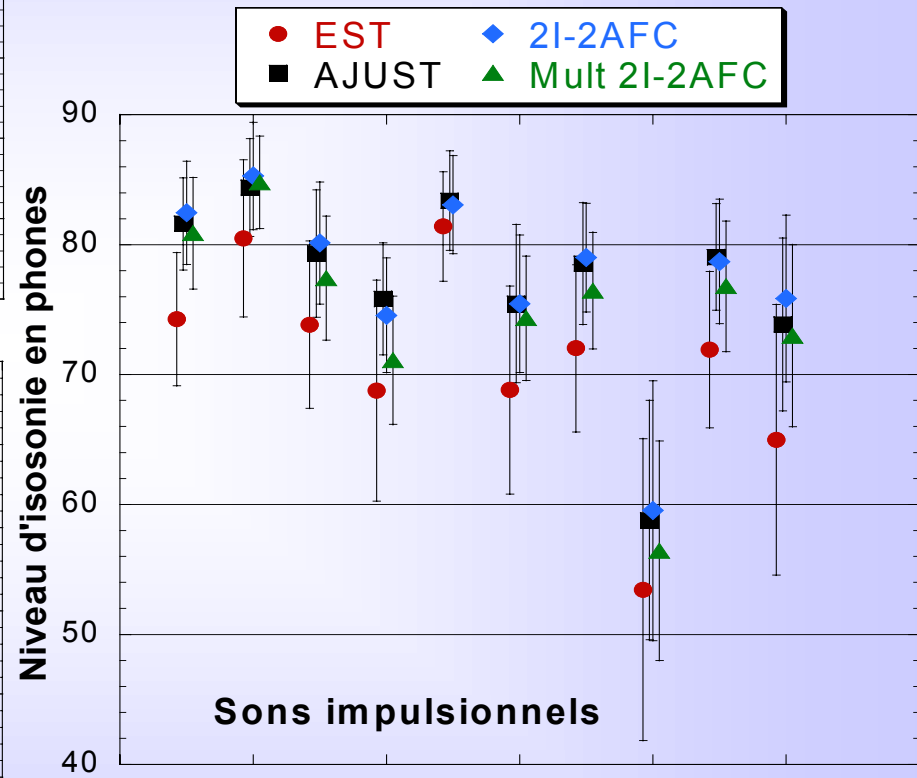
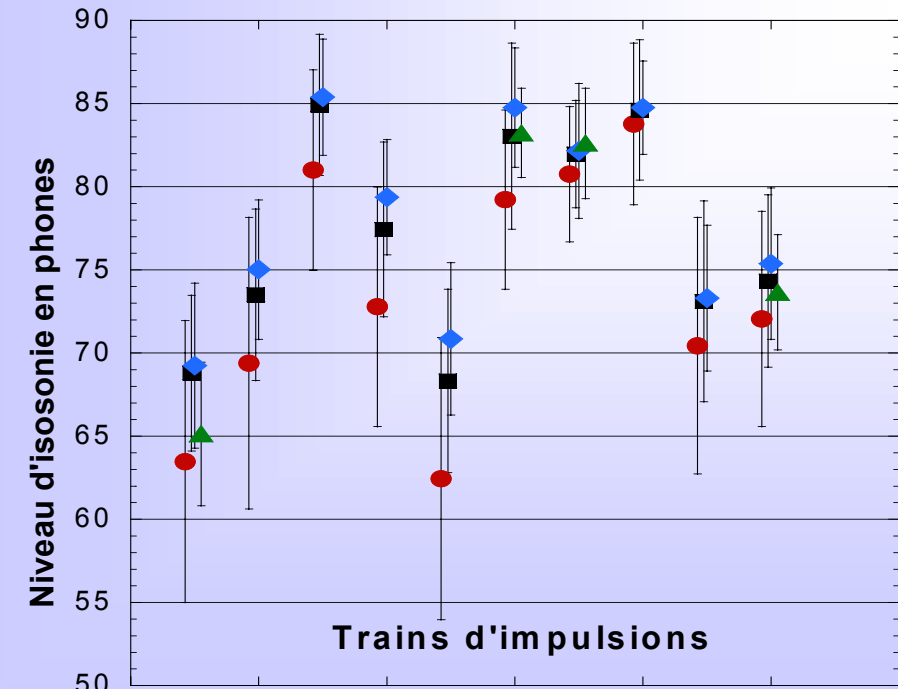
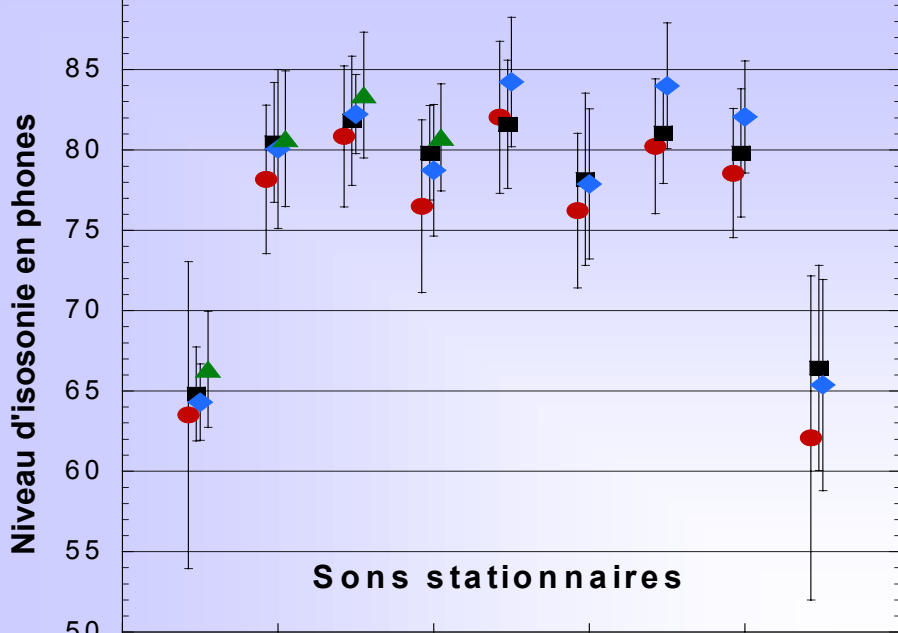
($0,5 < \alpha < 0,7$ (Canévet et coll., 1986))

Fonction de sonie ($\alpha = 0,5$) d'un son pur à 1 kHz établie par 14 auditeurs (GENESIS-LMA, 2003)



**Difficulté de passer
des sones aux phones
sans biais**

Niveau en dB SPL = Niveau d'isophonie en phones



Cohérence relative des méthodes

Précision des méthodes

Ecart types en phones

	Estimation	Ajustement	Adaptative	MAPM
Sons stationnaires	5,4	3,4	3,5	3,8
Sons impulsionnels	7,1	5,25	4,9	5,3
Trains d'impulsions	5,5	4,7	4,3	3,4
Moyenne	6	4,4	4,2	4,2
Durée pour 10 sons	2 min	20 min	80 min	80 min

La méthode d'ajustement présente le meilleur compromis **précision-durée** pour mesurer le **niveau d'isosonie** pour chaque type de son.

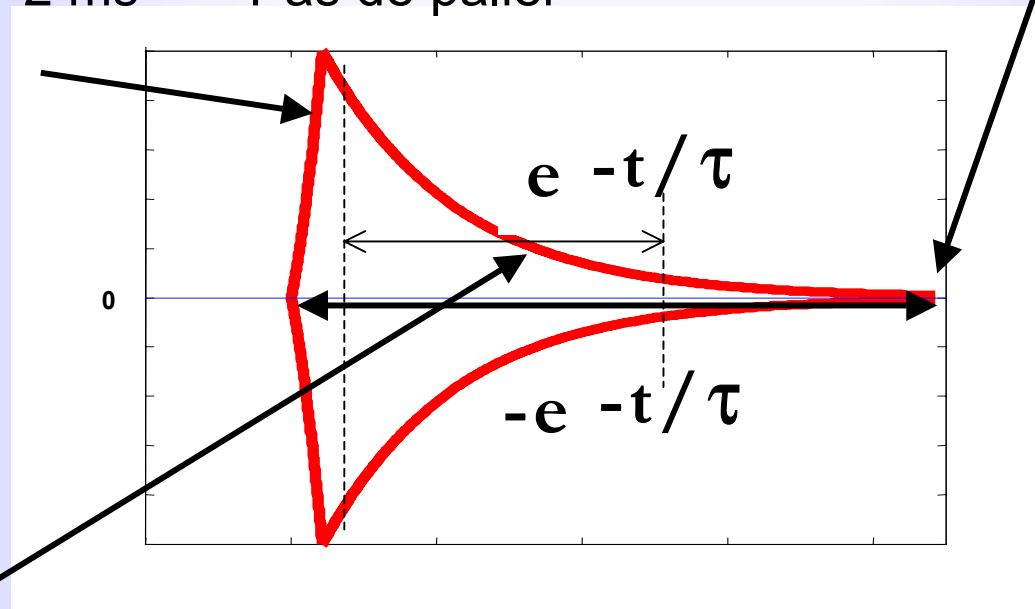
L'estimation directe reste la seule façon de mesurer la sonie

Synthèse d'une impulsion

Signal interrompu à -60 dB
du niveau crête

Attaque linéaire en
amplitude sur 2 ms

Pas de palier



T_d = durée mise pour passer de 90 à 10 %
de l'amplitude maximum

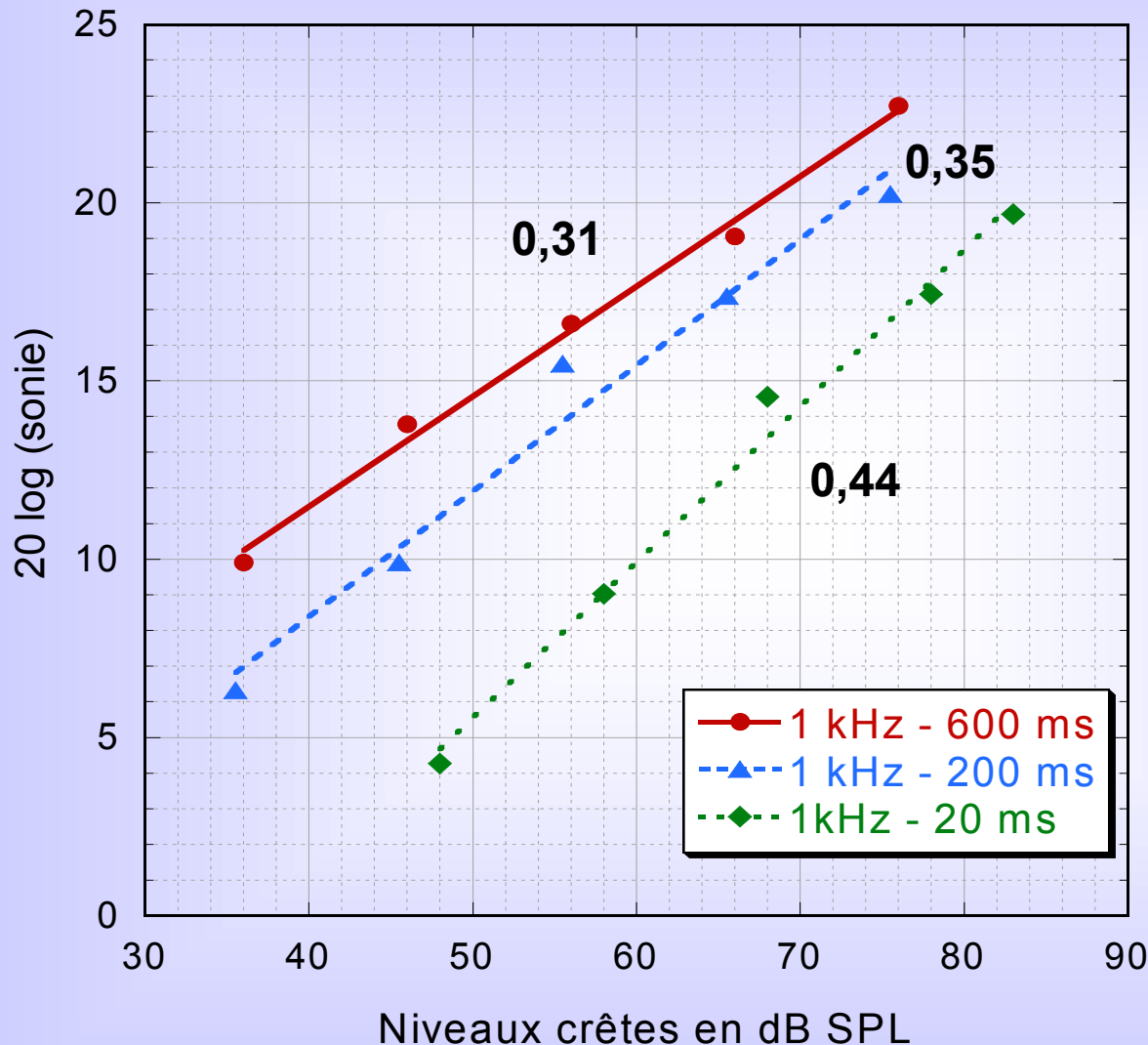
Fréquence de la porteuse de l'impulsion \approx fréquence de l'impulsion

Fonction de sonie d'impulsions

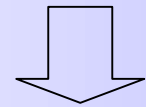
Objectifs

- Influence de la durée des impulsions
- Influence de la fréquence des impulsions
 - Fonction de sonie à 1 kHz : $T_d=20, 200$ et 600 ms
 - Fonction de sonie dont $T_d=20$ ms : $450, 1\ 000$ et $2\ 900$ Hz
 - 5 niveaux crêtes (écarts de 5 ou 10 dB)
 - **Estimation directe** : donner un nombre de son choix proportionnel à la sonie
 - 7 auditeurs

Influence de la durée des impulsions

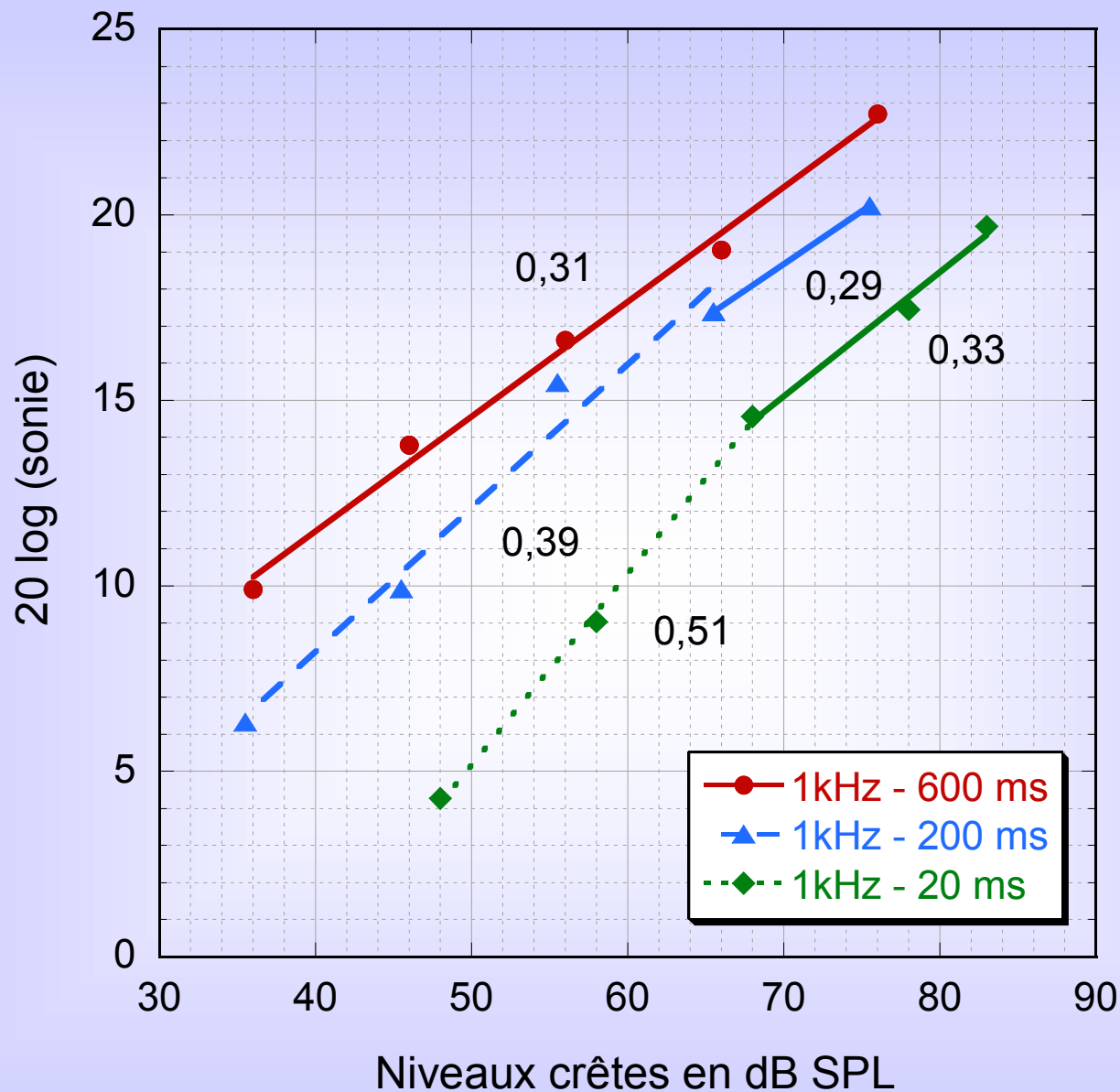


[Buus et coll., 1997]



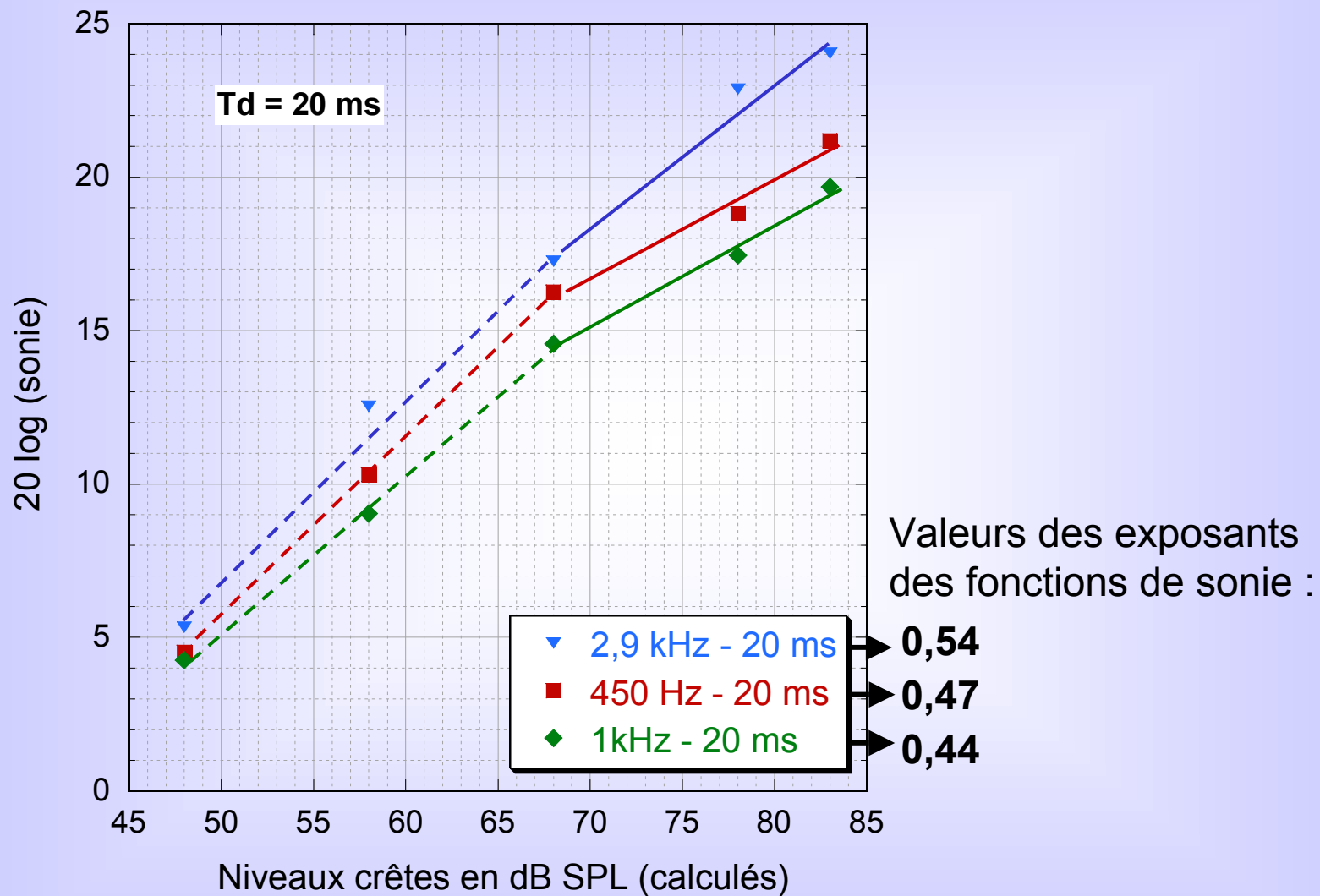
**Plusieurs exposants
en fonction du niveau**

Pas d'influence de la durée sur l'exposant de la fonction de sonie



D'autres expériences nécessaires pour affiner cette hypothèse

pas d'influence de la fréquence sur l'exposant de la fonction de sonie mais :



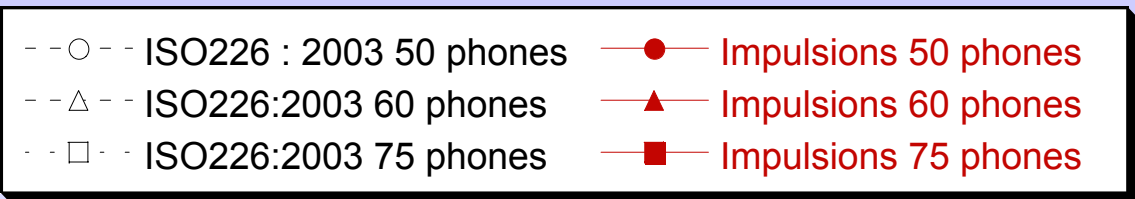
D'autres expériences nécessaires pour affiner l'hypothèse des 2 pentes

Fonction de sonie d'impulsions

- Pente plus élevée pour des niveaux crêtes faibles que pour des niveaux crêtes moyens.
- Résultats limités par un nombre de points expérimentaux peu élevé.
- Pas d'influence de la durée ni de la fréquence sur les pentes des fonctions de sonie de sons impulsionnels.

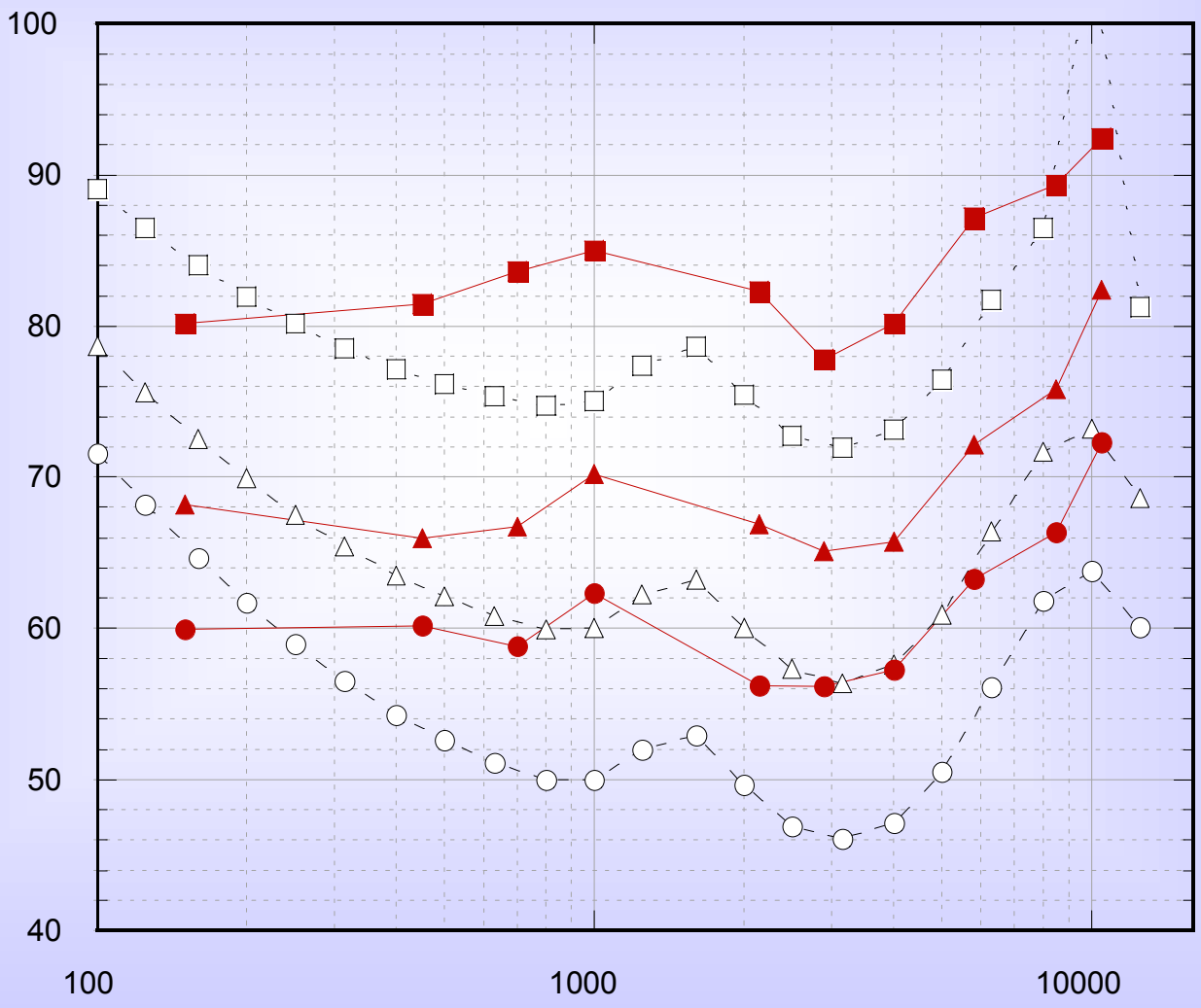
Lignes isosoniques d'impulsions

- **Fréquences testées** : 150, 450, 700, 1 000, 2 150, 2 900, 4 000, 5 800, 8 500 et 10 500 Hz
- **3 niveaux d'isosonie** : 50, 60 et 75 phones
- Ajuster le niveau du son impulsionnel pour qu'il ait la même sonie qu'une bande de bruit de 1s dont le niveau était fixé à 50, 60 et 75 phones
- 15 auditeurs



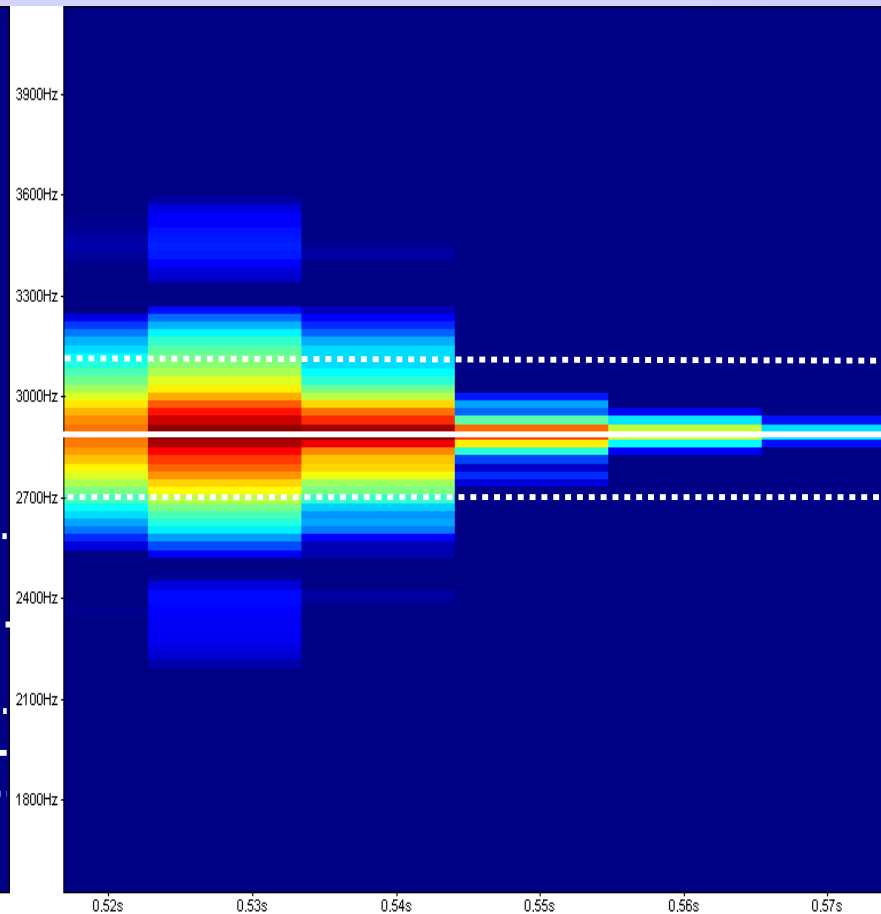
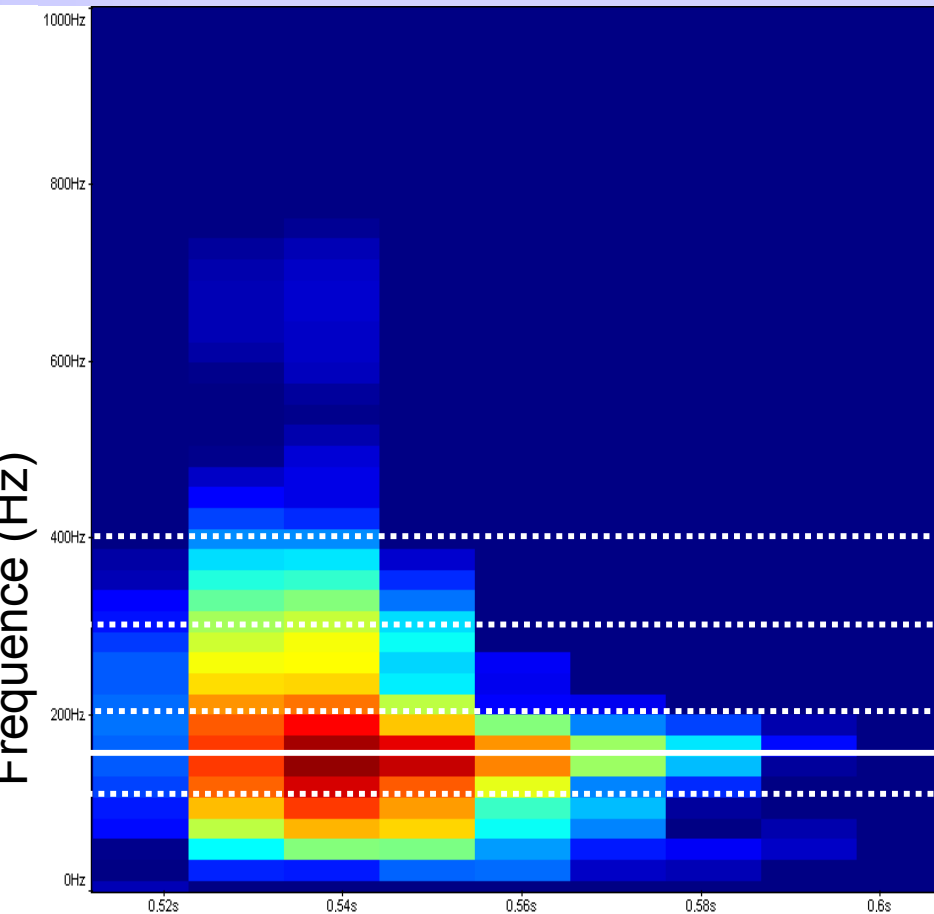
Niveau en dB SPL (symboles blancs)

Niveau crête en dB SPL (symboles rouges)

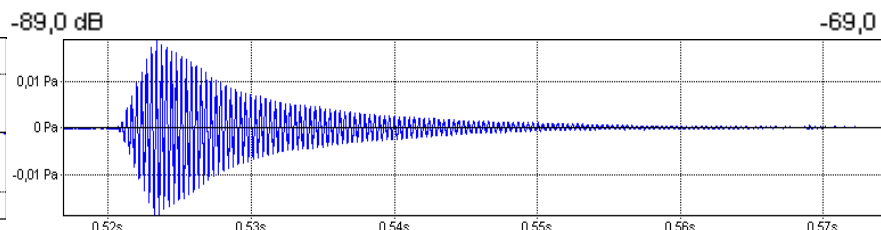
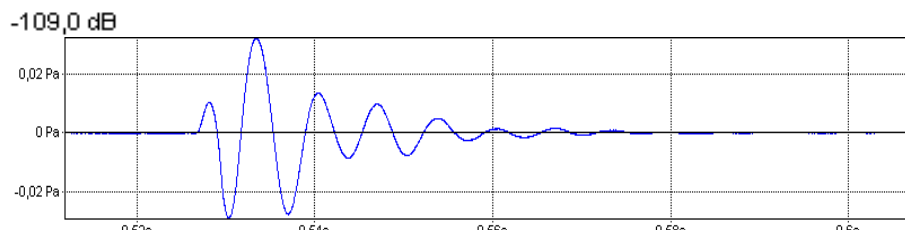


Fréquence en Hz

Temps-fréquence calculé avec le logiciel LEA (GENESIS)



Temps (s)



Lignes isosoniques d'impulsions

➤ Parallélisme des lignes isosoniques de sons impulsionnels.

➤ Pour les fréquences supérieures à 1 kHz :

Similarité avec les lignes isosoniques de sons stationnaires de durée plus longue.

➤ Pour les fréquences inférieures à 1 kHz :

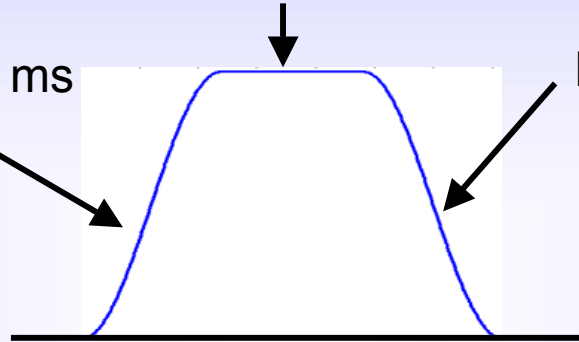
Aplatissement des lignes isosoniques (élargissement spectral).

Intégration temporelle (créneaux et impulsions)

Palier = 0, 12, 40, 90, 210, 490 ms

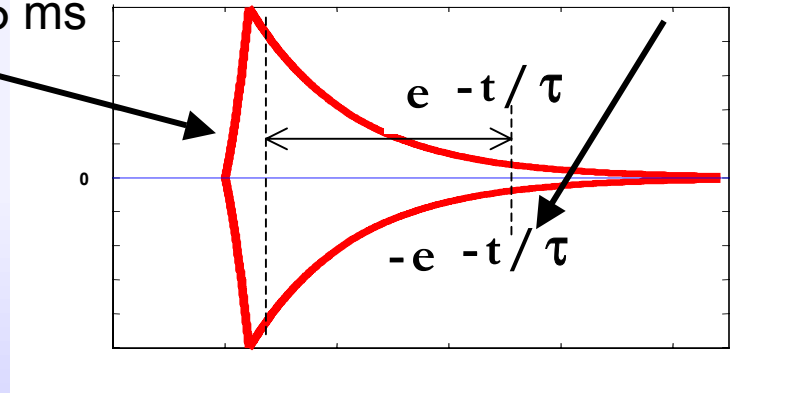
Durée d'établissement = 5 ms

Durée d'extinction = 5 ms



$\tau_d = 2, 5, 10, 22, 50, 100, 220, 500$ et 1000 ms

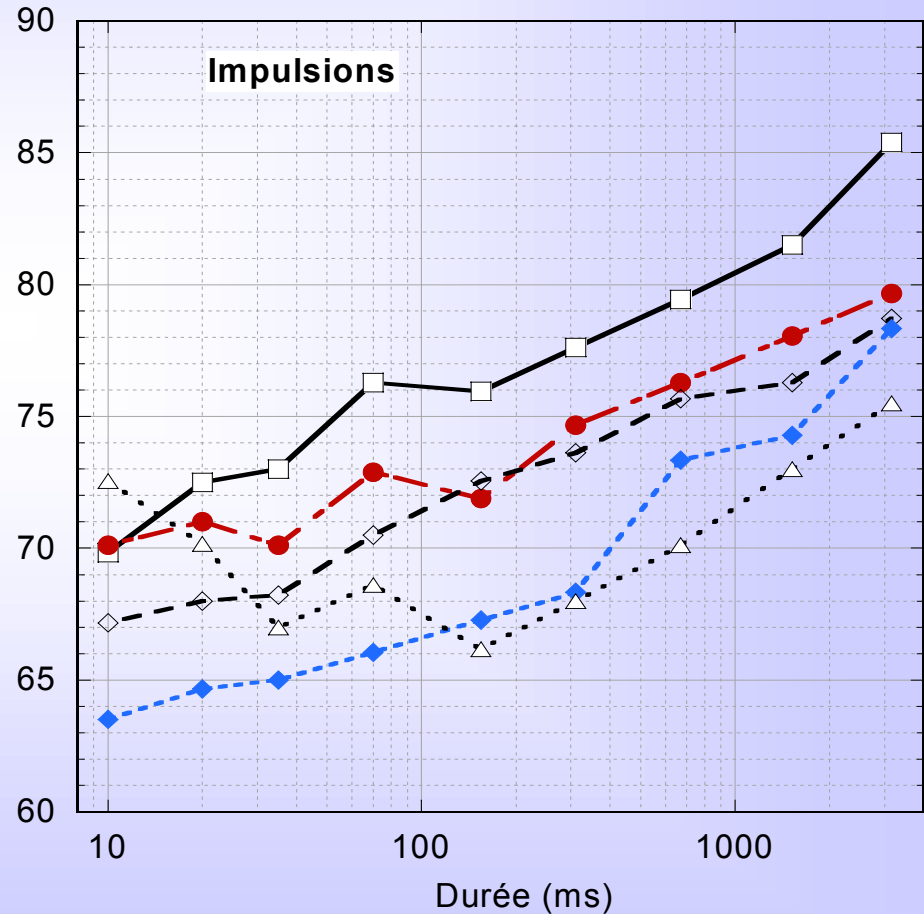
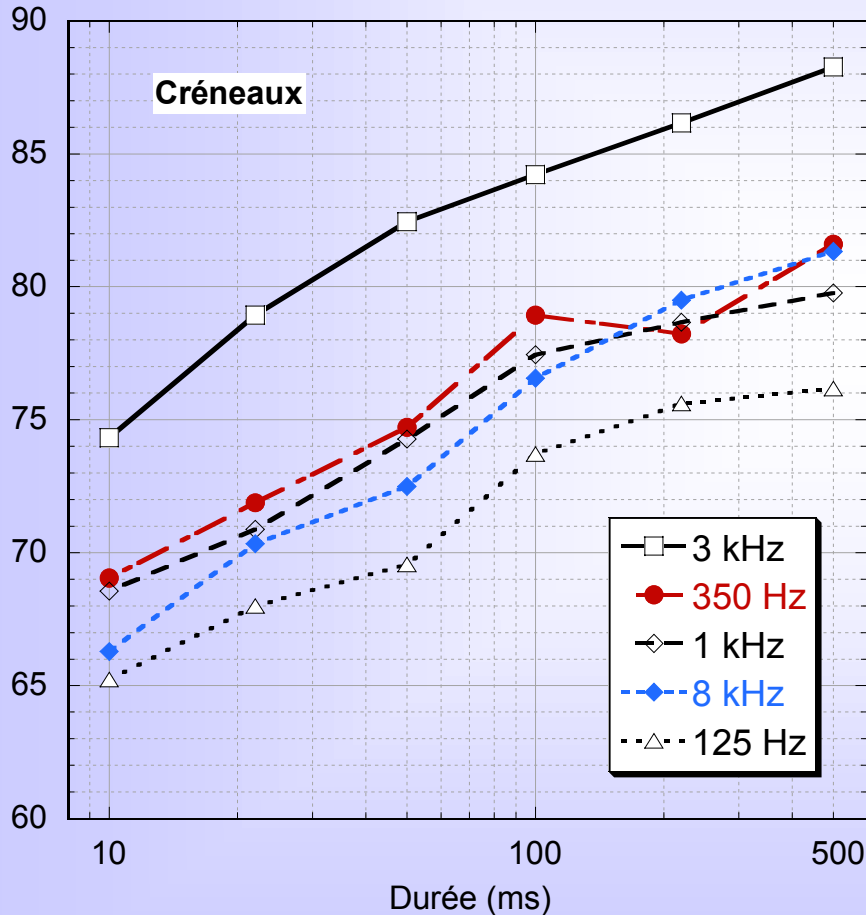
Durée d'établissement = 5 ms



Intégration temporelle

Méthode d'ajustement avec 10 auditeurs

Niveaux d'isophonie (phones)

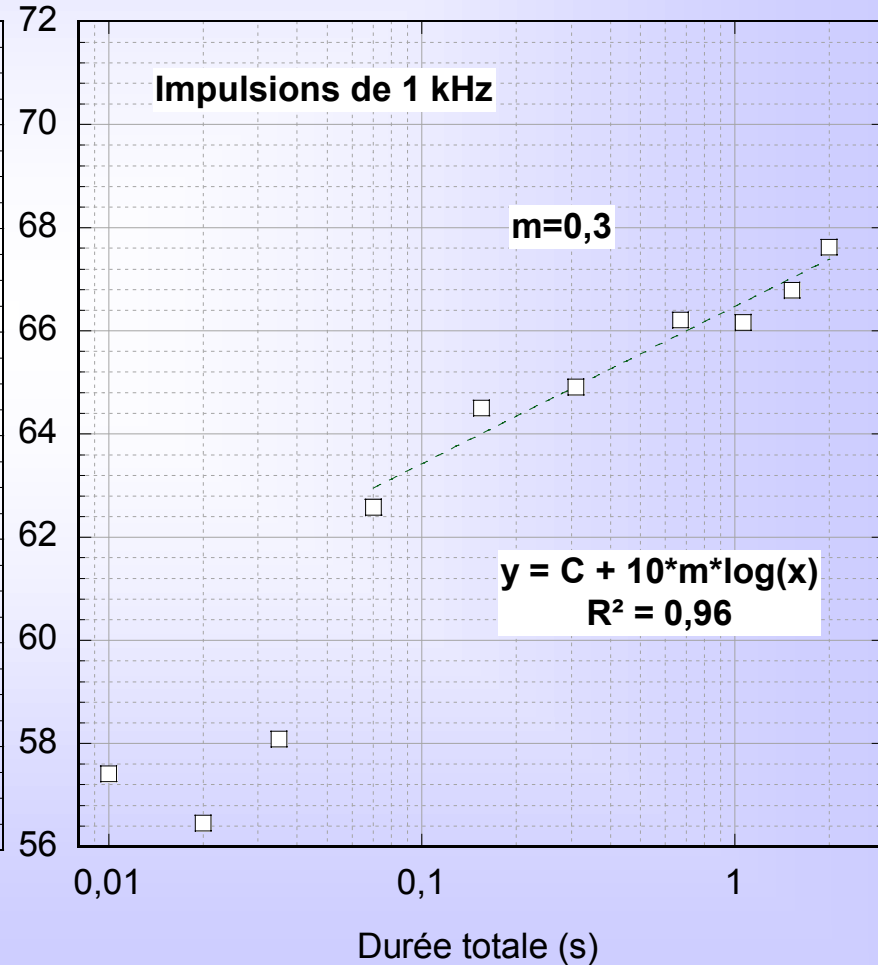
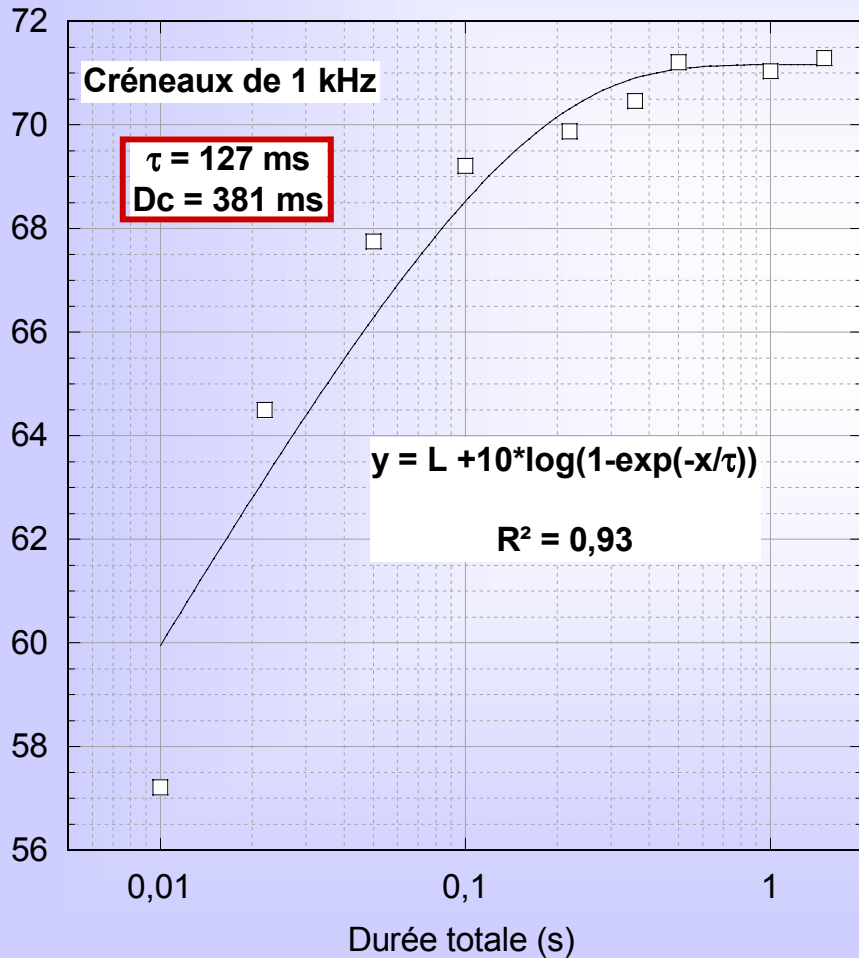


Pas d'influence de la fréquence

Intégration temporelle

Méthode d'ajustement avec 12 auditeurs

Niveaux d'isosonie (phones)



Intégration temporelle

Pas d'influence de la fréquence sur la variation du niveau d'isophonie avec la durée, pour les créneaux et les impulsions

Créneaux de 1 kHz : durée critique de l'ordre de 380 ms.

L'intégration temporelle, pour ce type de sons, peut être **modélisée par une fonction exponentielle** :

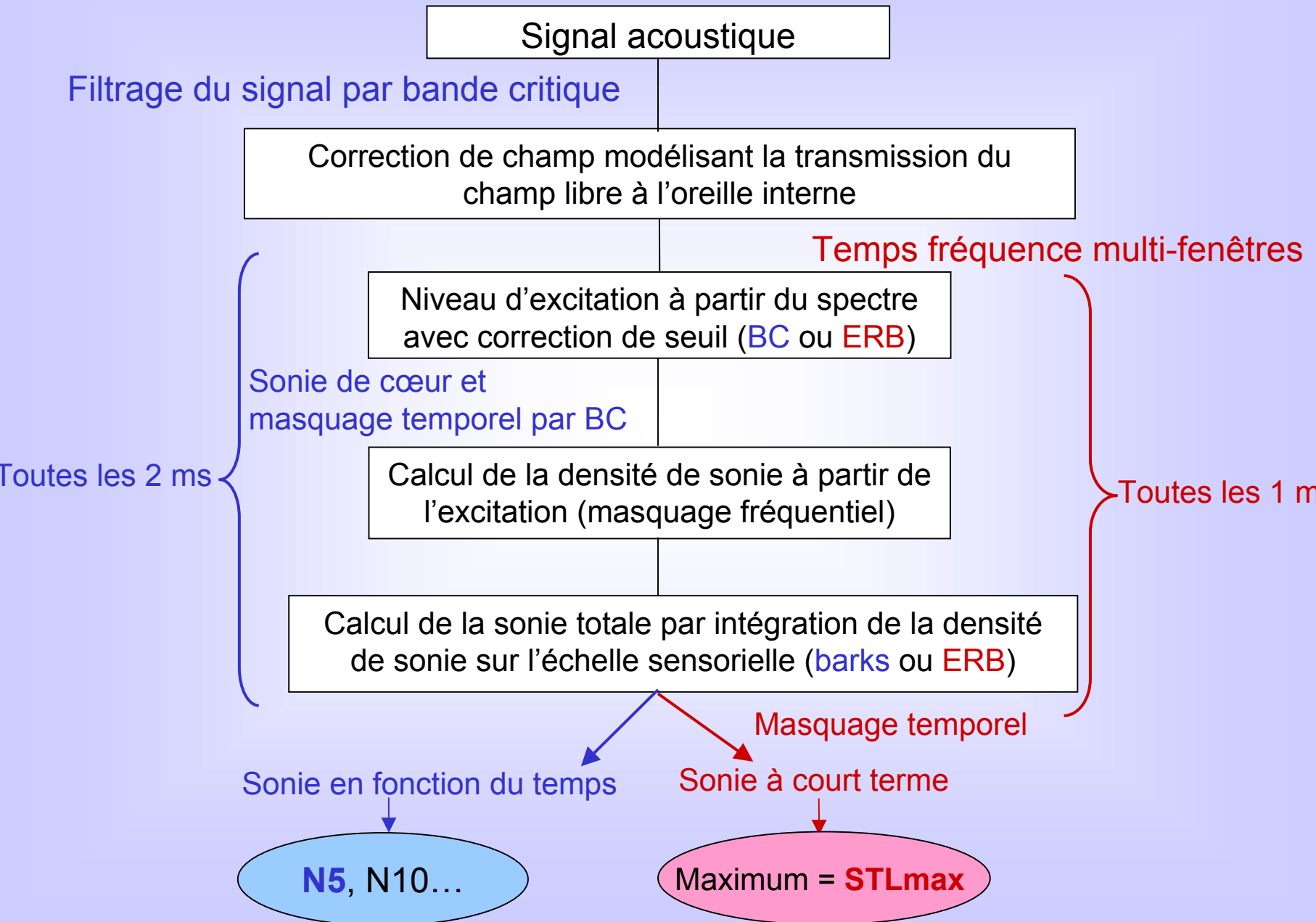
$$L_t = L_{\text{comp}} + 10 \log(1 - e^{-t/\tau})$$

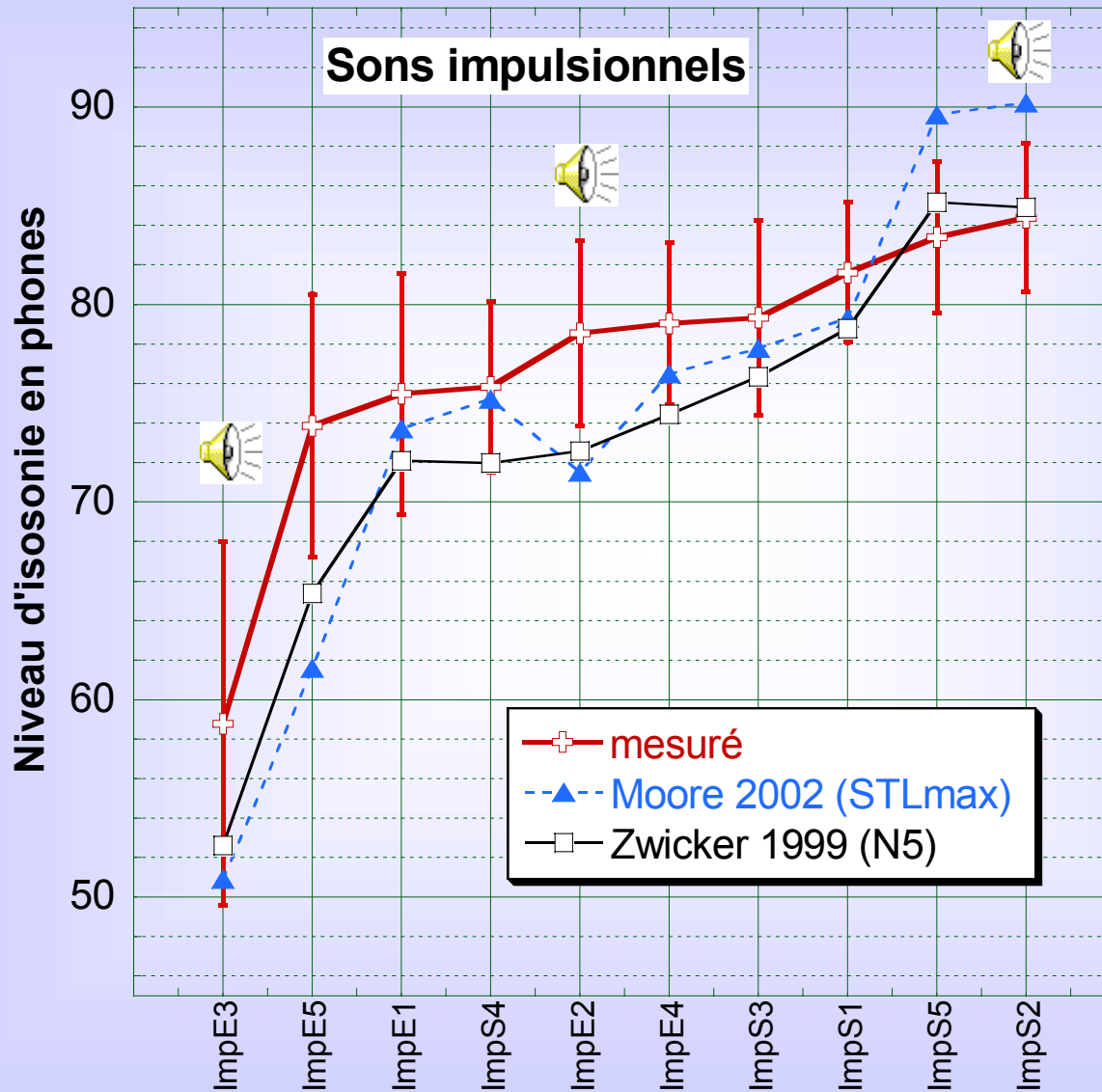
Impulsions de 1 kHz : l'intégration temporelle peut être modélisée, pour des durées comprises entre 70 ms et 2 s, par une **fonction logarithmique de la durée** :

$$L_{\text{bref}} = k + 10 .m . \log(t)$$

Zwicker et Fastl (1999)

Glasberg et Moore (2002)



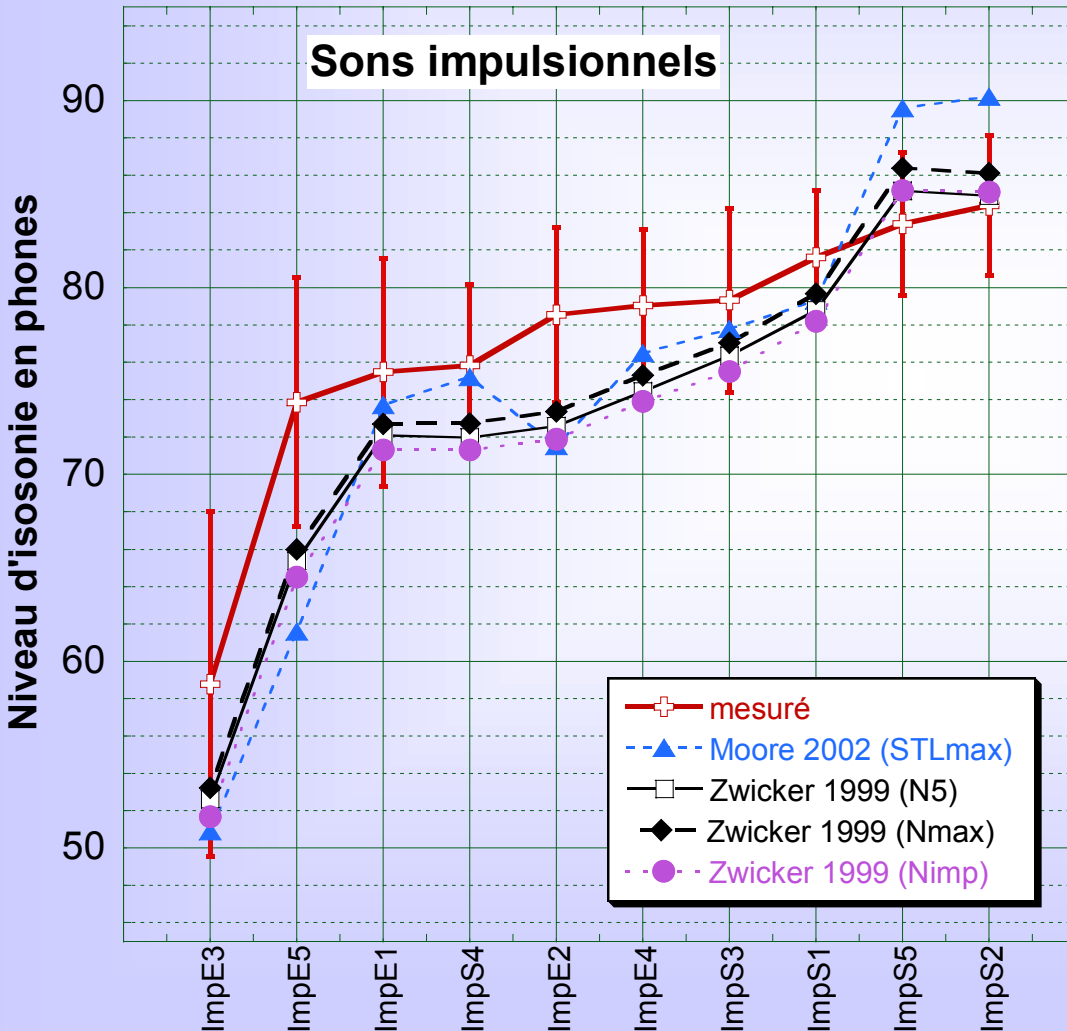


Modèles - sons non stationnaires

Nouveaux indicateurs :

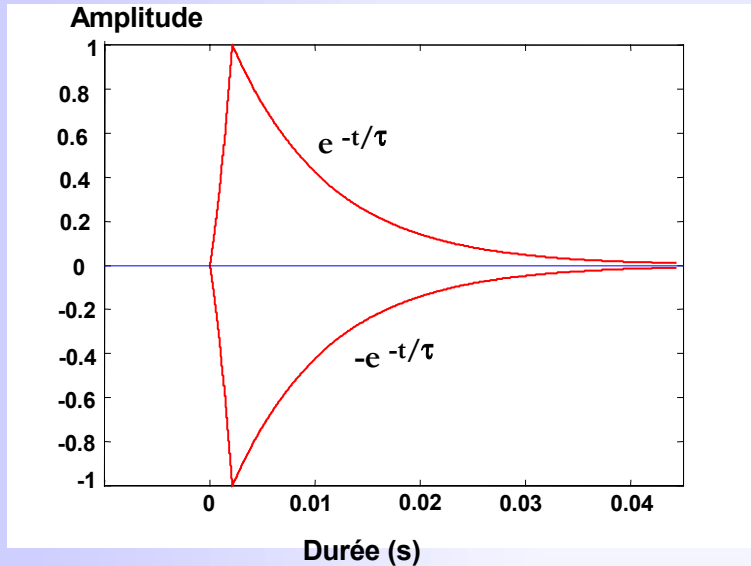
Nmax

Nimp



Estimateur de sonie d'impulsion

- Enregistrement et synthèse de sons impulsionnels



- 24 sons enregistrés

-16 sons synthétisés

4 sons pur 1 kHz et 12 bruits blancs

Durée attaque (0,5 à 5 ms)

Durée décroissance (5 à 300 ms)

- Paramètres physiques :

Durée d'attaque, durée d'extinction, énergie et niveau crête

- Estimation de grandeur sans référence avec 15 auditeurs

Estimateur de sonie d'impulsions

Matrice de corrélations

	Nc	log(Tm)	log(Td)	log(E)	log(S)
Nc	1				
log(Tm)	0,14	1			
log(Td)	0,24	0,16	1		
log(E)	0,86	0,29	0,66	1	
log(S)	0,7	0,15	0,68	0,88	1

Dépendance entre énergie, niveau crête et Td



Régression multiple incrémentielle

	R	R ²	R ² mod	p
log(E)	0,87	0,77	0,77	0
log(Td)	0,89	0,79	0,02	0,085
log(Nc)	0,89	0,8	0,01	0,18

**Influence du temps de descente sur la sonie dépend du niveau.
[Meunier et Rabau (2002)]**

Estimateur de sonie d'impulsions

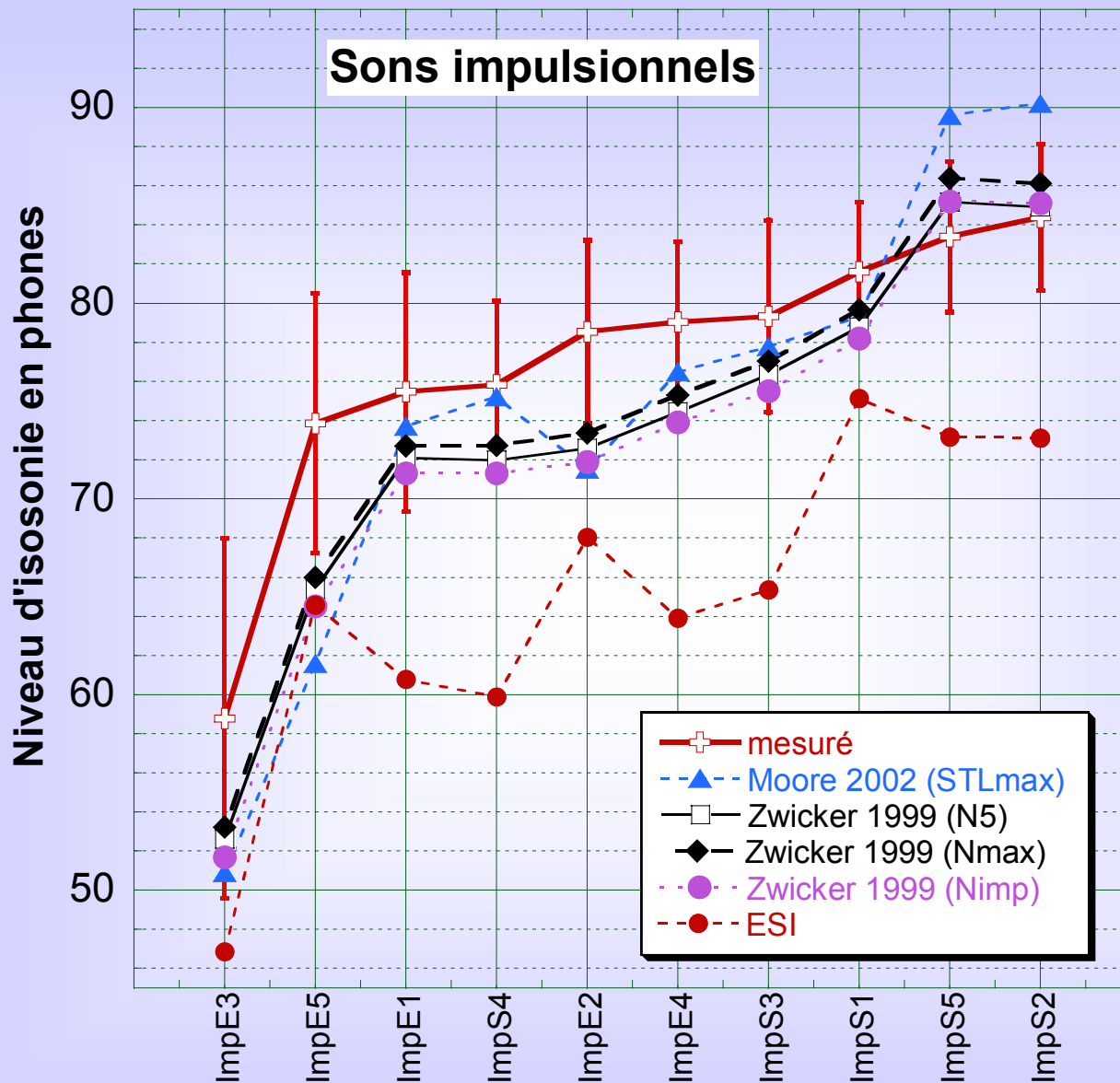
Un modèle de sonie pour des sons impulsionnels naturels peut être proposé tenant compte de l'énergie et du temps de descente :

$$\text{Log}(S) = 0,27 \log(E) + 0,1 \log(T_d) + C$$

$$S = K.E^{0.27}.T_d^{0.1}$$

S : sonie mesurée ; **E** : énergie du signal ; **T_d** : durée d'extinction du signal.

Relation sones – phones pour calculer le niveau d'isophonie



Limites : Fréquence et influence de Td avec le niveau

Axes d'investigation (ESI)

Signal filtré

24 bandes critiques

Calcul de la sonie de cœur

$$p_1(t) \quad S_1 = k_1 E^{\alpha_1} T d^{\beta_1}$$

$$p_2(t) \quad S_2 = k_2 E^{\alpha_2} T d^{\beta_2}$$

$p(t)$

$$p_{24}(t) \quad S_{24} = k_{24} E^{\alpha_{24}} T d^{\beta_{24}}$$

Masquage
fréquentiel de
Zwicker

Sonie (sones)
ou
niveau d'isophonie
(phones)

Axes d'investigation (ESI)

Estimateur 1

$$S = k E^\alpha Td^\beta$$

Estimateur 2

$$S = k E^{\alpha(BC)} Td^\beta, + \text{masquage fréquentiel}$$

α déterminé à partir des fonctions de sonie

Estimateur 3

$$S = k E^{\alpha(BC)} Td^{\beta(BC,E)}, + \text{masquage fréquentiel}$$

β ajusté sur les lignes isosoniques (50, 60 et 75 phones)

β fonction de l'énergie et de la fréquence

Energie < 0,01

sonie = 0

Ajustement sur trop peu de données expérimentales

Domaine d'application des modèles

Le modèle de **Zwicker et Fastl (1999)**

Nmax et **Nimp** : mieux adaptés pour des sons impulsionnels dont la porteuse est un son pur (écart moyen de 2 phones) que pour des sons impulsionnels plus complexes (écart moyen de 6 phones)

Donne de bons résultats avec un écart moyen de 4 phones.

Domaine d'application des modèles

Le modèle de **Glasberg et Moore (2002)**

Donne de bons résultats pour des sons de 1 kHz.

Écarts d'autant plus grands que la fréquence du son impulsionnel est plus éloignée de 1 kHz

Sous-estime les niveaux d'isophonie mesurés faibles et surestime les niveaux d'isophonie élevés pour les sons impulsionnels complexes.

Domaine d'application des modèles

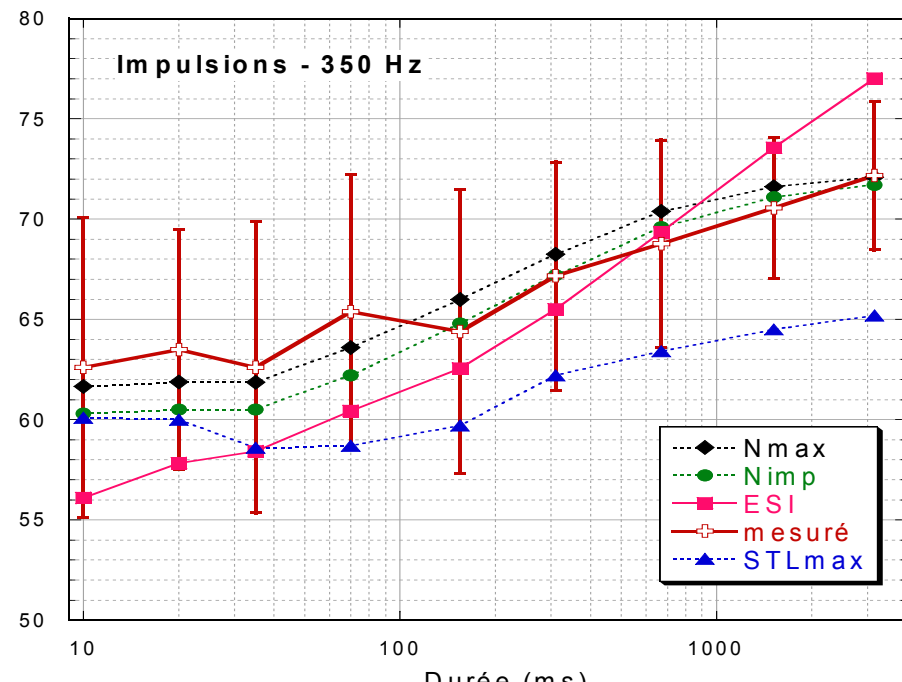
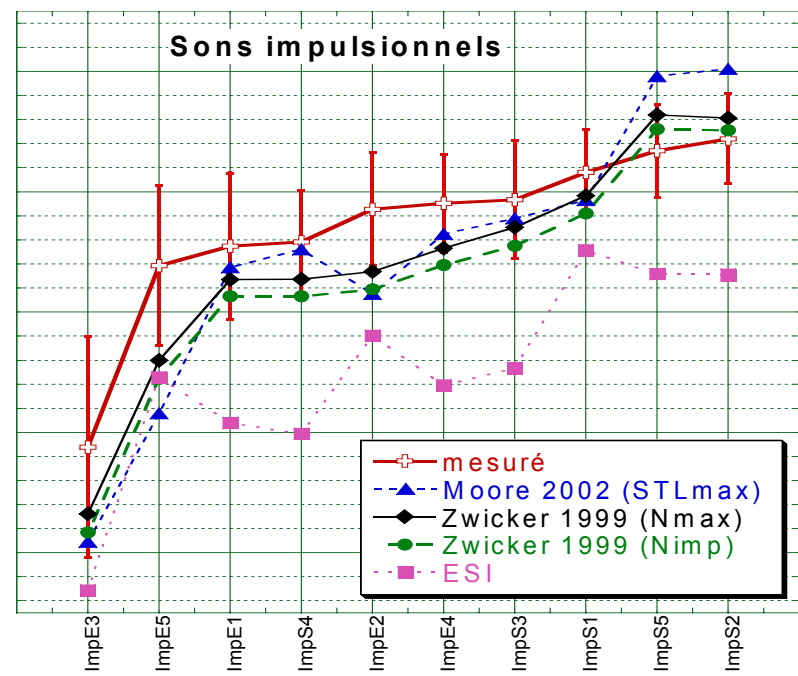
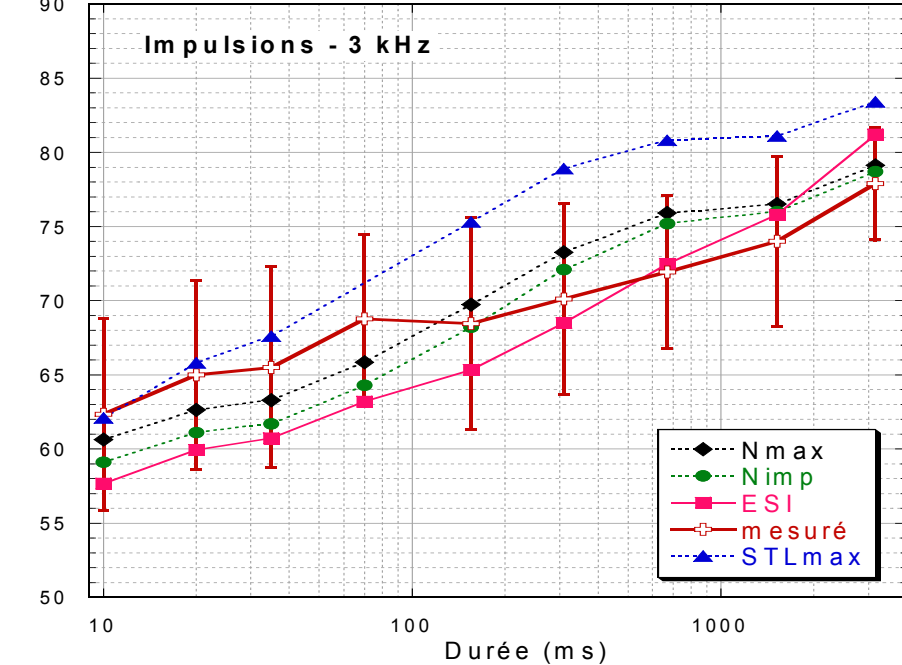
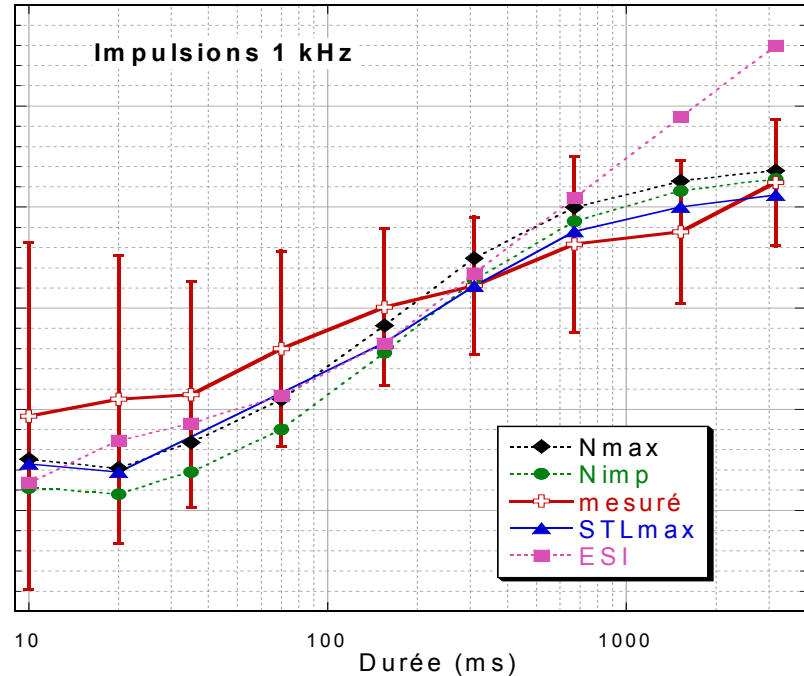
Estimateur de sonie d'impulsion (**ESI**)

Niveaux d'isosonie proches de ceux mesurés pour :

- Créneaux de durée inférieure à 300 ms
- Impulsions de durée inférieure à 1 s

- Sous-estime les niveaux d'isosonie élevés
- Surestime les niveaux d'isosonie de sons impulsionnels dont les fréquences sont élevées

- Pour des sons plus complexes :
sous-estime les niveaux d'isosonie obtenus avec la méthode d'ajustement.



Conclusions

- Méthode d'ajustement : la mieux adaptée pour mesurer le niveau d'isosonie
- Méthode d'estimation directe : fiable pour mesurer la sonie et très rapide

- Lignes isosoniques et fonctions de sonie

Premières données expérimentales sur ce type de son

- Intégration temporelle

Durée critique de 380 ms (créneaux)

Modélisation de l'intégration temporelle

Conclusions

➤ Sons stationnaires

Les modèles de Zwicker (1958) et Moore (1997)

➤ Sons impulsionnels

Nmax et Nimp proposés à partir de Zwicker et Fastl (1999)
sont les plus stables

Application industrielle : LEA

A propos de LEA...



LEA 1.0

Logiciel d'Expertise Acoustique

Florent JAILLET, Florent POIROT, Benoît GAUDUIN,
Isabelle BOULLET, Nicholas SMETHURST
Sébastien ONIS, Julien LESECO



www.genesis.fr
Copyright GENESIS 2004

Logiciel d'Expertise Acoustique

Fichier Fenêtre ?

P : Indices d'13kHz_50

Début : 0,000 s
Fin : 1,323 s

Valeurs moyennes
(valables pour les sons stationnaires)

Niveau dB SPL	59,2
Niveau dB A	60,4
Niveau dB B	58,9
Niveau dB C	58,8
CGS (Hz)	2986,0
Sonie stationnaire (Phones)	62,4
Acuité (Acum)	1,380
Force de fluctuation (Vacils)	0,000
Rugosité (Asper)	0,00

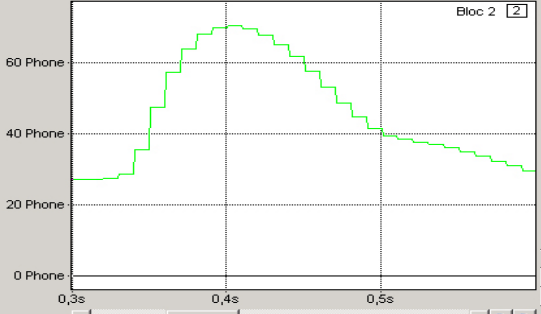
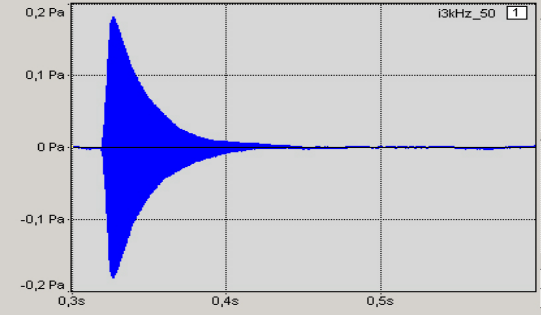
Valeurs crêtes
(pour les sons non-stationnaires)

Maximum dB SPL	74,6
Maximum dB A	75,8
Maximum dB B	74,3
Maximum dB C	74,2

Estimateurs de sonie globale
(valables pour les sons non-stationnaires)

Sonie maximum (Phones)	70,3
N5 (Phones)	61,5
N10 (Phones)	59,6
Sonie Impulsionnelle (Phone)	68,2

Genesis-LMA version 1.0



Nimp

Perspectives

➤ Modèles : amélioration de ESI

Fonctions de sonie de sons impulsionnels

- Confirmer la différence de pente entre des niveaux crêtes faibles et élevés (plus de points expérimentaux et plus d'auditeurs)
- Comparer à des créneaux brefs pour vérifier que les faibles valeurs des pentes des fonctions de sonie sont une caractéristique des sons impulsionnels.

Lignes isosoniques

Ajuster les modèles plus précisément pour les sons impulsionnels et confirmer l'allure générale (plus de données pour des fréquences inférieures à 500 Hz et comprises entre 1 et 2 kHz).

Influence du temps de descente

tests à énergie constante pour différentes fréquences centrales des BC

➤ Méthode : relation sones - phones

Fonctions de sonie de sons naturels + sons stationnaires à 1 kHz



Merci pour votre attention !

boulet@lma.cnrs-mrs.fr