

LP300 : Acoustique dans les fluides



Acoustique non-linéaire - applications

Simon AYRINHAC
simon.ayrinhac@sorbonne-universite.fr

I. Applications

II. Acoustique musicale

III. Aéroacoustique

Applications de l'acoustique non-linéaire

- Médecine (ultrasons) : lithotritie (destruction des calculs rénaux),
thermothérapie.
- Imagerie médicale : imagerie harmonique des tissus,
imagerie par agent de contraste.
- Génie civil : sécurité pyrotechnique (par simulation numérique).
- Acoustique sous-marine : sonars paramétriques
→ faisceau basse fréquence (peu atténué) mais directif (voir Annexe 1)
- Cavitation : nettoyage aux ultrasons
sonoluminescence
sonochimie

Source :  le livre blanc de l'acoustique en France en 2010 (pages 96-100)
<https://www.sfa.asso.fr/fr/documentation/livre-blanc-/page96.pdf>

Solitons

- vient de *solitaire* + suffixe -on (excitations en physique de l'état solide)
- dispersion → chaque composante de Fourier se déplace avec une vitesse différente
- ondes solitaires qui se propagent sans se déformer : les *effets non-linéaires* compensent la *dispersion* ; ils peuvent se superposer sans interférer.

Exemples :

- Le mascaret
vague solitaire remontant un estuaire

- Les vagues scélérates
vagues géantes susceptibles d'endommager les navires et les plates-formes pétrolières

- Dans les cristaux : Si, MgO, α -quartz, Al_2O_3 (saphir)
📄 H.-Y. Hao, H.J. Maris, *Phys. Rev. B* **64** 06432 (2001)

Autres exemples

- Le claquement du fouet est dû au bang sonique.
 T.McMillen, *Physica D*, **184** 192 (2003)
- Des simulations montrent que la queue des dinosaures pouvait leur servir de fouet
 <http://gspauldino.com/CommentSoundbarrier.pdf>
- Un ballon qui éclate produit une onde en N caractéristique
 D.T.Deihl, *American Journal of Physics*, **36** 441 (1968)
- Un simple tuyau d'arrosage, le barrissement de l'éléphant ou le carnyx gaulois produisent des ondes de chocs
 http://video.upmc.fr/differe.php?collec=S_C_colloquium2012&video=5
- Les avalanches de sable provoquent la formation d'ondes de choc et des solitons
 J.M.N.T. Gray and K. Hutter, *Continuum Mech. Thermodyn.*, **9** 341 (1997)
- Nous générons des ondes de choc lorsque nous applaudissons
 http://www.acoustics.asn.au/journal/2013/2013_41_2_Fletcher_paper.pdf

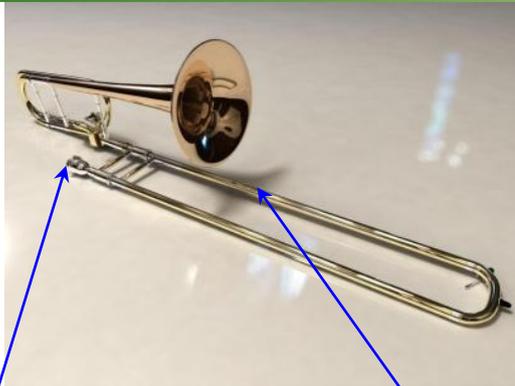
I. Applications

II. Acoustique musicale

III. Aéroacoustique

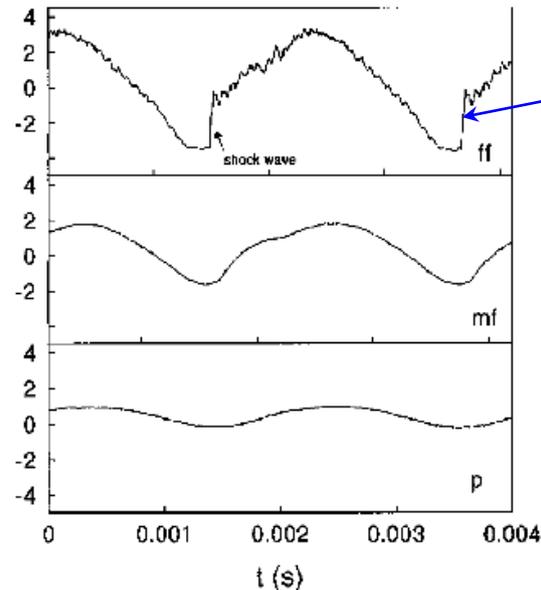
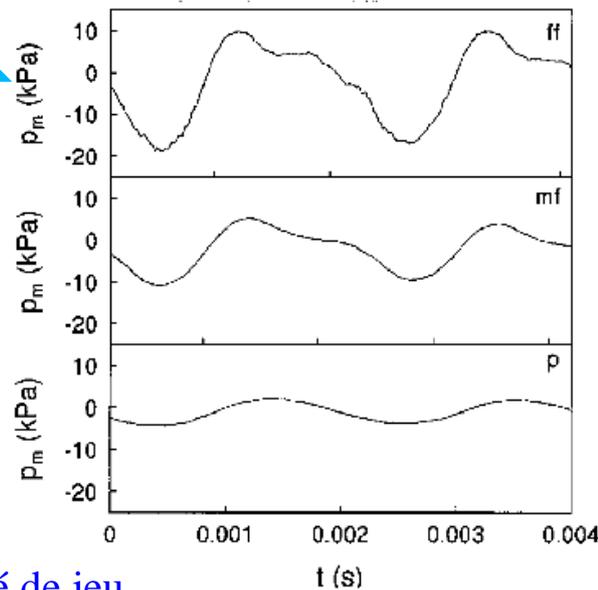
Instruments de musique : le trombone

Source : A.Hirschberg, J.Gilbert *et al* JASA **99** 1754 (1996)



Embouchure (partie au contact de la bouche)

dans la coulisse

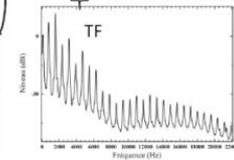
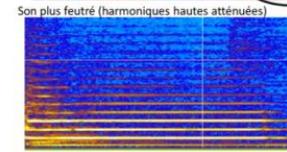
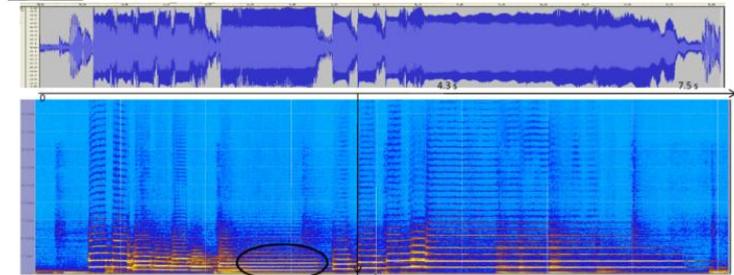


formation d'ondes de chocs

Le son d'un instrument de musique



Intro de « Chez le photographe du motel » (BOF « Ascenseur pour l'échafaud »), du trompettiste Miles Davis.



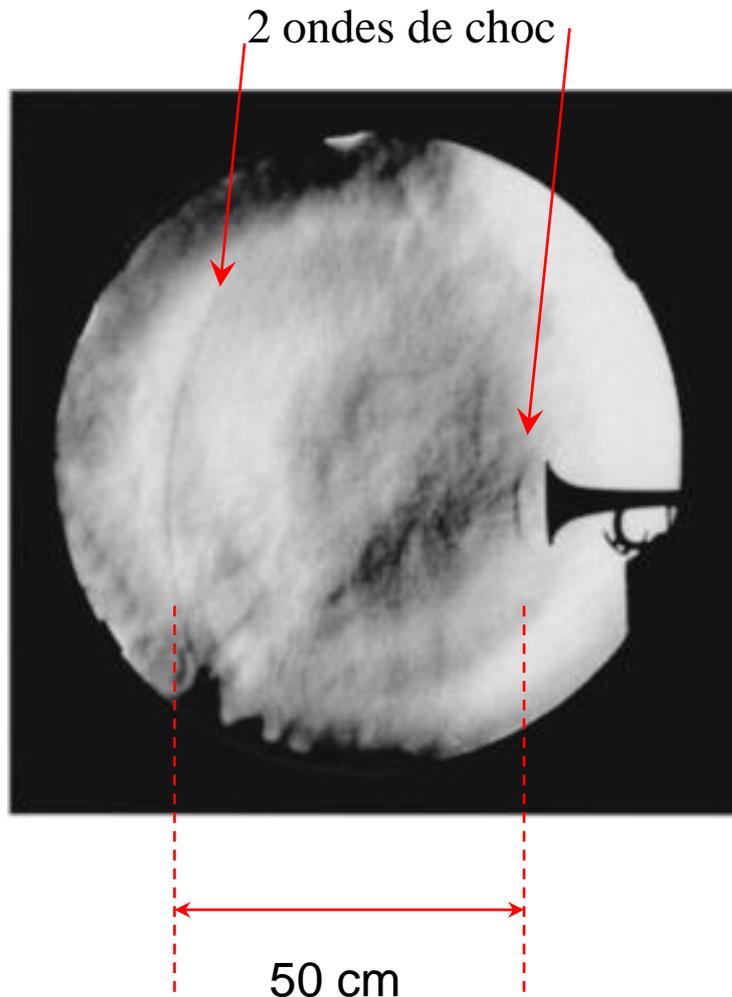
Note tenue (Fa⁵) : les harmoniques arrivent d'autant plus tard qu'ils sont aigus.

intensité de jeu croissante

Instruments de musique : la trompette

Source : Pandya *et al* JASA **114** 3363 (2003)

→ Visualisation des ondes de choc en sortie d'une trompette



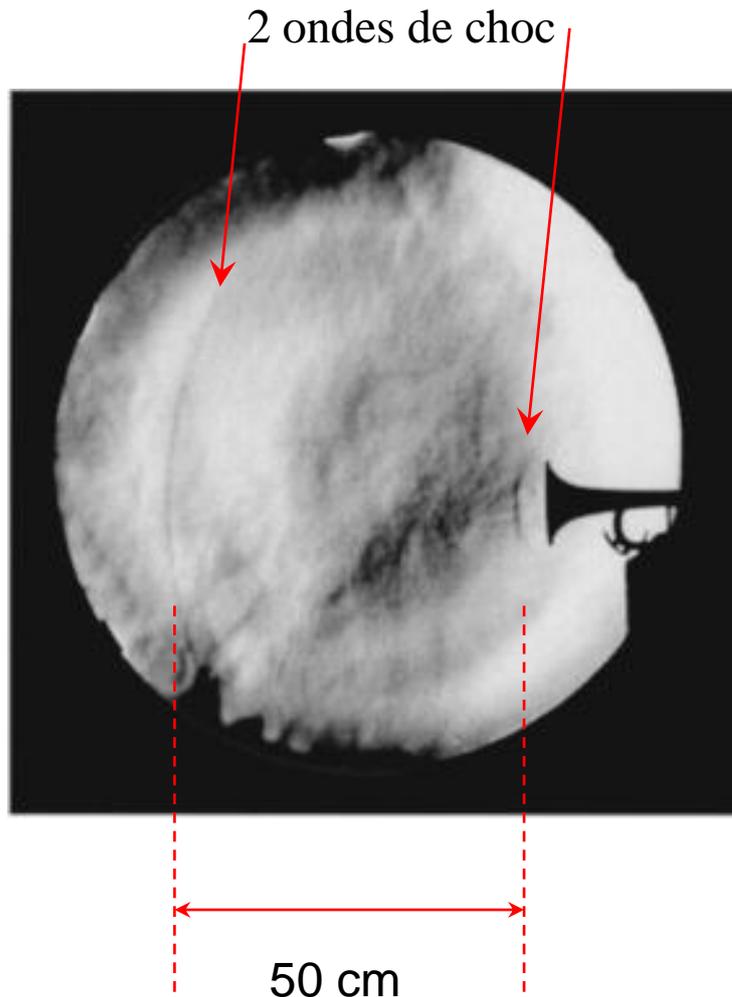
- Quelle est la fréquence du son ?

- Quelle est la note jouée ?

Instruments de musique : la trompette

Source : Pandya *et al* JASA **114** 3363 (2003)

→ Visualisation des ondes de choc en sortie d'une trompette



- Quelle est la fréquence du son ?

l'écart entre les ondes de choc donne la longueur d'onde λ .

Or $\lambda=c/f$ donc $f=698$ Hz avec $c=345$ m/s et $T=296$ K.

- Quelle est la note jouée ?

cette fréquence correspond à un Fa octave 4 (G_5).

Instruments de musique : les «sons cuivrés»



Séminaire donné à l'UPMC par Joël Gilbert (en 2012):

Physique des instruments de musique à vent : des "sons cuivrés" à la propagation acoustique non-linéaire en guides d'onde non-uniformes

6 février 2012 *par* Joël Gilbert, Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR CNRS (Le Mans)



Comment revoir le séminaire ?

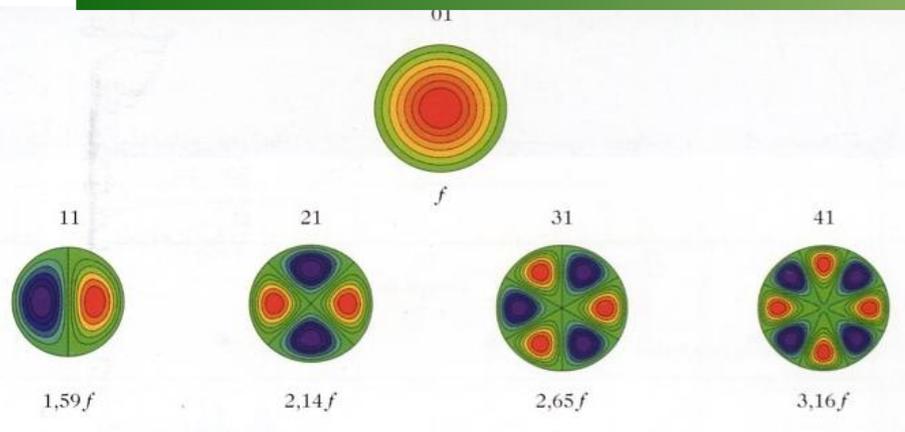
monUPMC > Cours > Vidéothèque >
Vidéothèque UPMC > Conférences >
COLLOQUIUM 2012 :

http://video.upmc.fr/differe.php?collec=S_C_colloquium2012&video=5

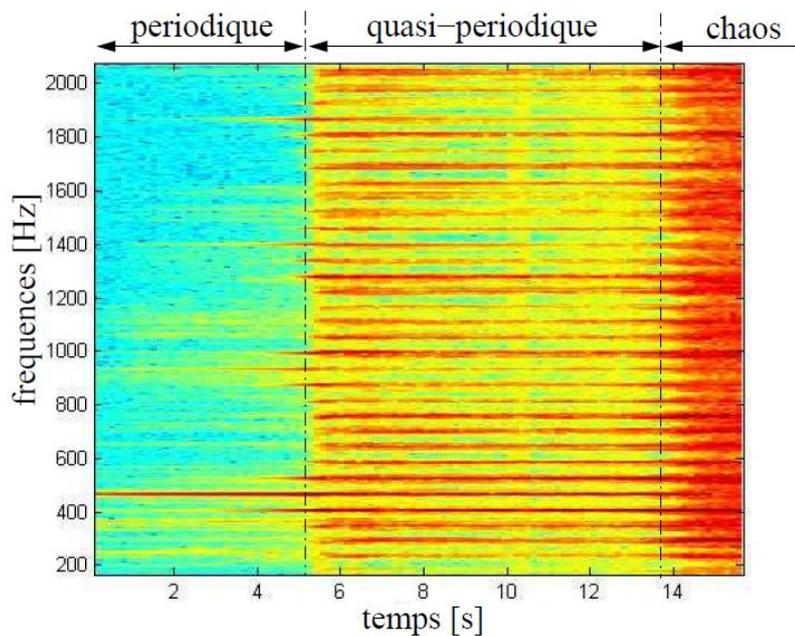
The screenshot shows the 'monUPMC' website interface. At the top, there is a navigation menu with the following items: Accueil, Campus, Outils, Echanges, Visio, Cours (highlighted in green), Enseignement, Documentation, and Bureau +. Below the menu, the page title is 'vidéothèque'. A list of links is displayed:

- Vidéothèque de l'UPMC
- [Vidéothèque UPMC](#)
- [Vidéos de cours en ligne à l'UPMC](#)

Instruments de musique : gongs et cymbales



$$f_{exc} = 467 \text{ Hz}$$



modes de vibration d'une membrane circulaire dans le vide.

La NL est essentielle dans la production du son dans ce type de système.

- Périodique : unimodal, fréq. propre
- Quasi-périodique : $f_{exc} = f_i + f_j$
- Passage à un régime **chaotique** suivant la force de l'excitation
 - spectre large-bande
 - son riche et brillant : sons "cuivrés"
 - Le principe de superposition n'est plus valable dans les systèmes non linéaires.

FIG. 1: Transition vers le chaos mesurée expérimentalement pour une cymbale de diamètre 51 cm et d'épaisseur 1 mm, mettant bien en évidence les trois régimes (périodiques, quasi-périodiques et chaotiques) observés génériquement.

Interlude : chaos

déterministe : la connaissance en un instant des forces permet de déterminer son état à tout autre instant

Imprédictif : des conditions initiales très proches peuvent donner des résultats qualitativement très différents

Système **chaotique** = déterministe et imprédictif

aléatoire ne signifie pas chaotique

Instruments de musique : cordes

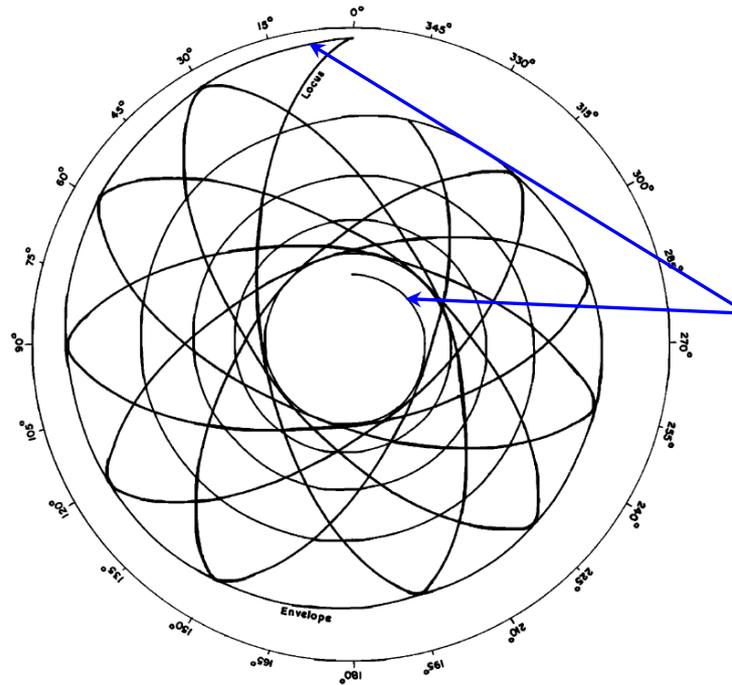
- Origine : variation de tension due aux variations de longueur de la corde

⇒ une force appliquée dans le plan y peut provoquer un mouvement dans le plan z (apparition d'une pola. elliptique)

⇒ couplage T-L : génération d'un mode longi. par un transverse

⇒ on peut exciter un mode à L/n (noeuds) et voir apparaître les harmoniques d'ordre n

Point d'une corde
exécutant une vibration
hors du plan



Enveloppe : spirale décroissante
(atténuation)

Courbe : ellipse en rotation lente

Instruments de musique : à vent

- Phénomène non-linéaire : lorsqu'un phénomène continu se transforme en un phénomène oscillant

Exemples :

- Flûte à bec : hanche
- Trompette : lèvres
- La voix : cordes vocales

(http://auditoryneuroscience.com/?q=vocal_folds)

- Résonateur de Helmholtz excité avec un jet d'air

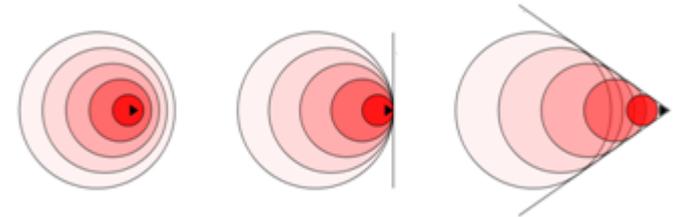
- I. Applications
- II. Acoustique musicale
- III. Aéroacoustique**

Le bang sonique (1/3)

Produit par un avion qui vole au-delà de la vitesse (locale) du son (Mach 1).

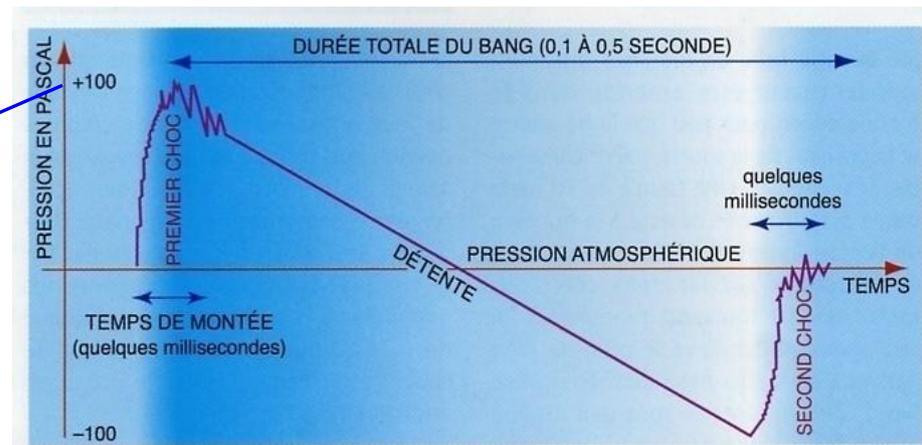
→ les molécules de l'air environnant sont brutalement accélérées

→ accumulation d'ondes au front de l'appareil et écoulement vers l'arrière (cône de Mach)



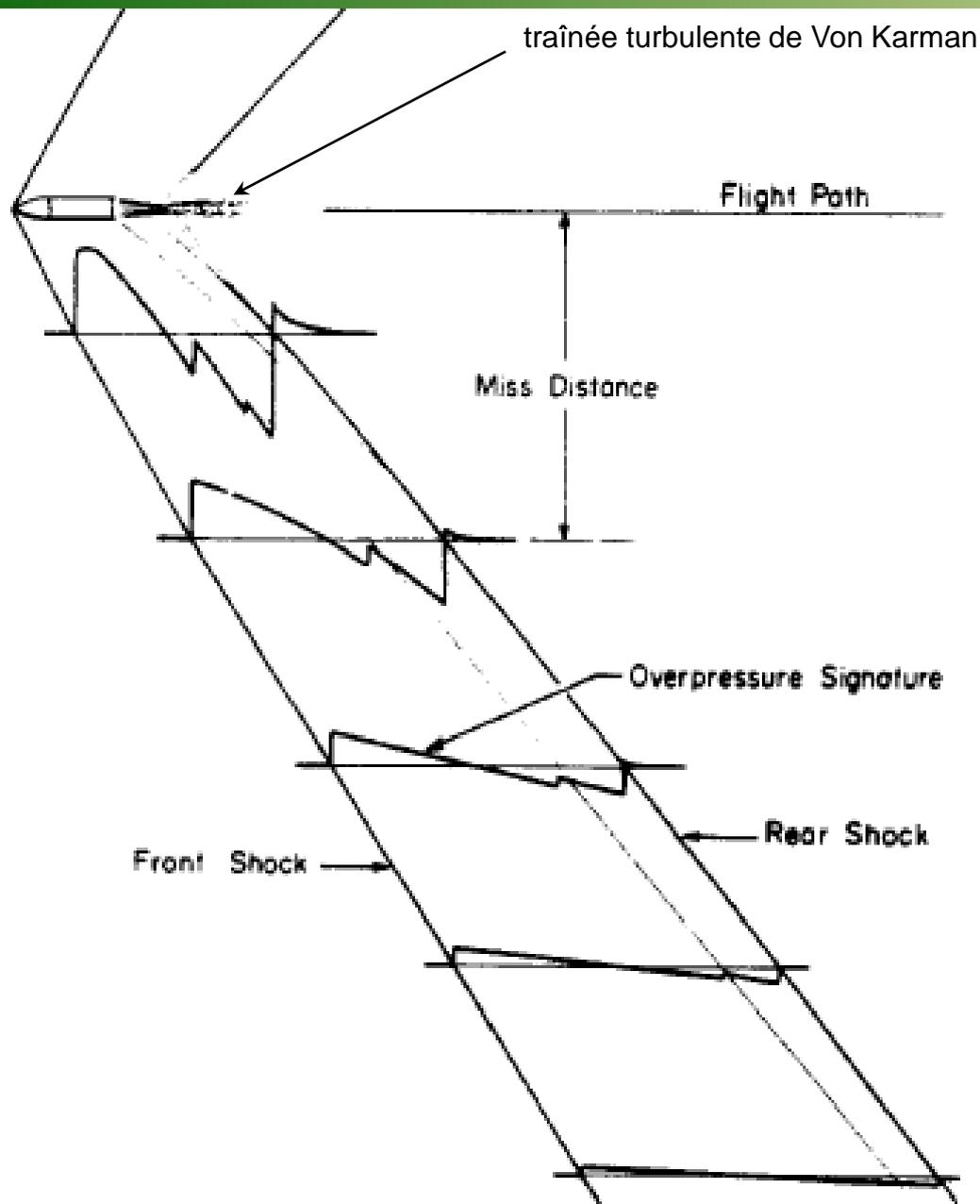
au sol : onde en N

1 mbar

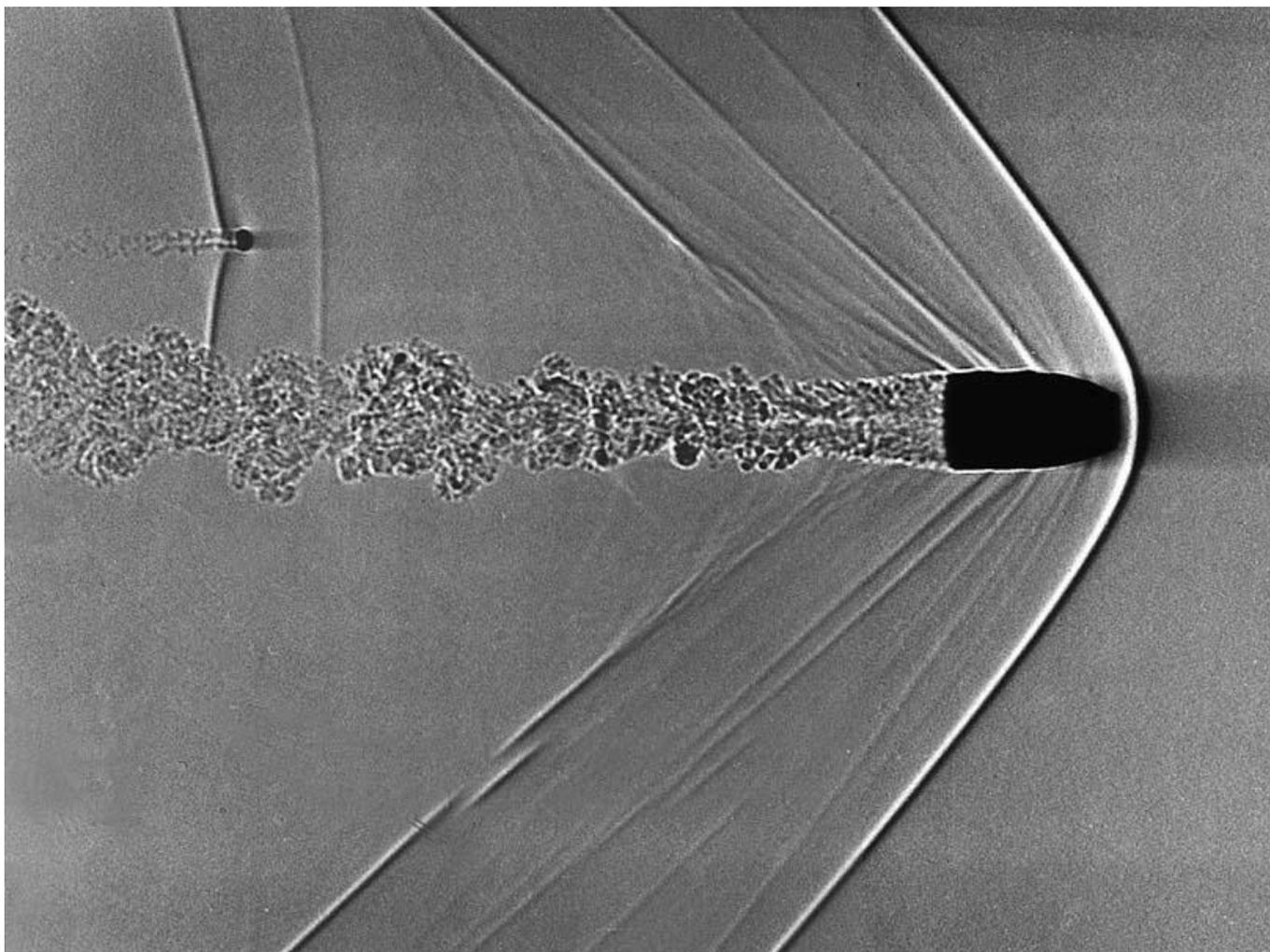


- zone dans laquelle P , ρ , T , varient rapidement (compression + décompression)
- oscillations dans le signal provoquées par les turbulences du milieu ambiant
- double bang (si suffisamment séparés, ex:space shuttle)
- modification du profil avec la distance

Le bang sonique (2/3)



- forme plus complexe près de l'avion: chaque rupture du profil induit une onde de choc.
- L'onde en N s'allonge : les surpressions voyagent plus vite que les dépressions (différent d'un signal en dents de scie)
- Elle s'aplatit :
 - extra-atténuation non-linéaire
 - atténuation des hautes fréquences



A. Davidhazy, Phys. Teach. **52**, 402 (2014)
<http://dx.doi.org/10.1119/1.4895353>

Le bang sonique (3/3) : une nuisance considérable

- Dans le cas des sons impulsionnels, on applique une constante de correction de 5 à 12 dB (exemple : bruit d'un champ de tirs)

- Voir coupures de presse



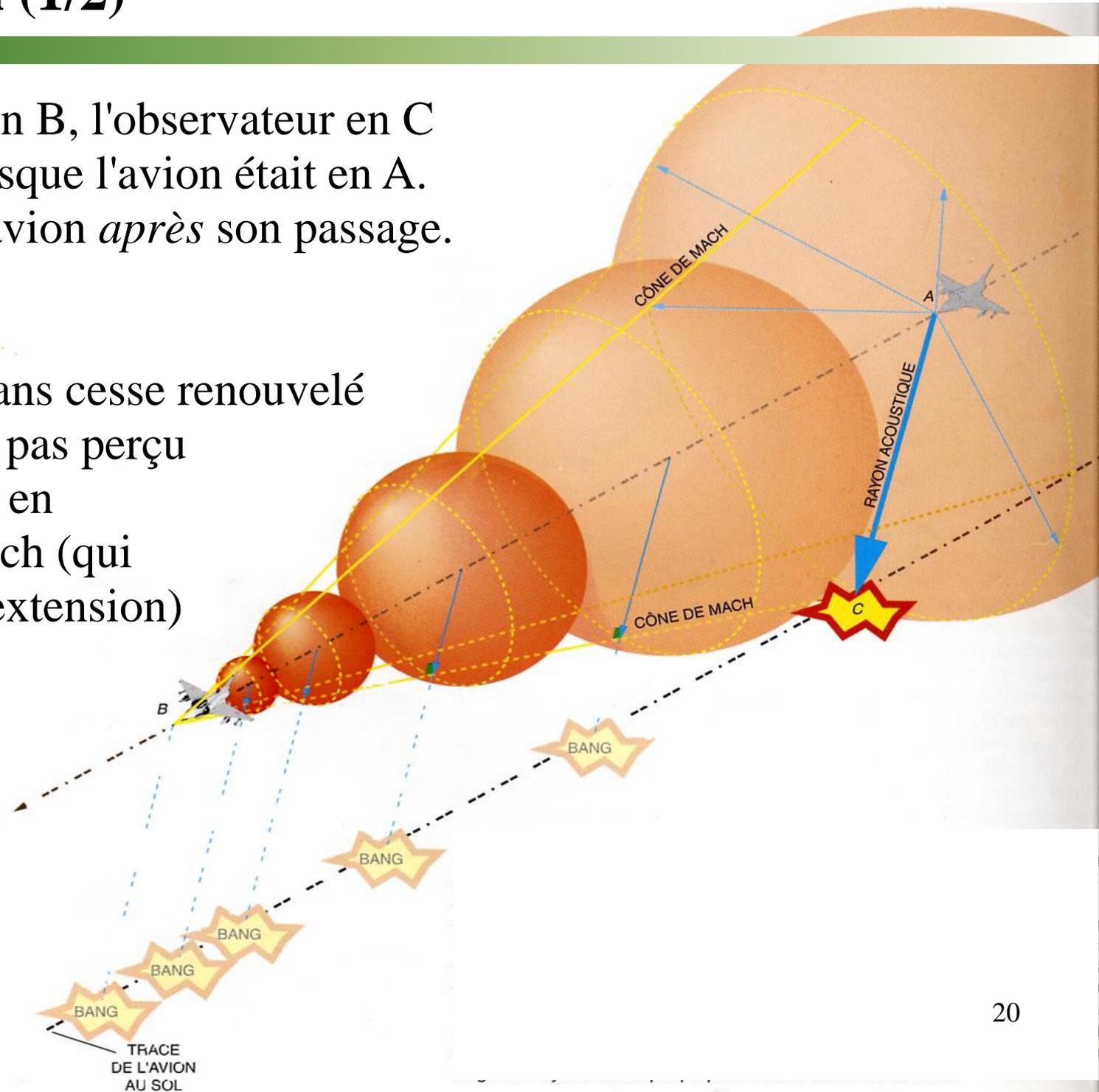
The image shows a screenshot of a news article from the website 'l'union L'Ardennais'. The header includes the date 'lundi 25 juillet 2011', weather information (Mini 13°, Maxi 22°), and a 'WEB 66' logo. The article title is 'Le passage d'un avion ? Une détonation secoue la ville', published on 'mardi 28 juillet 2009 à 01H00 - Vu 74 fois'. The article text describes a violent explosion in Reims on July 28, 2009, at 9:30 AM, which affected the entire agglomeration from the city center to Tinquieux. It mentions that the police and firefighters also heard the explosion but were unaware of any reported incident. The article suggests that the explosion was caused by a supersonic aircraft at high altitude.

- gêne considérable qui freine le développement commercial (le Concorde français traversait l'Atlantique...)

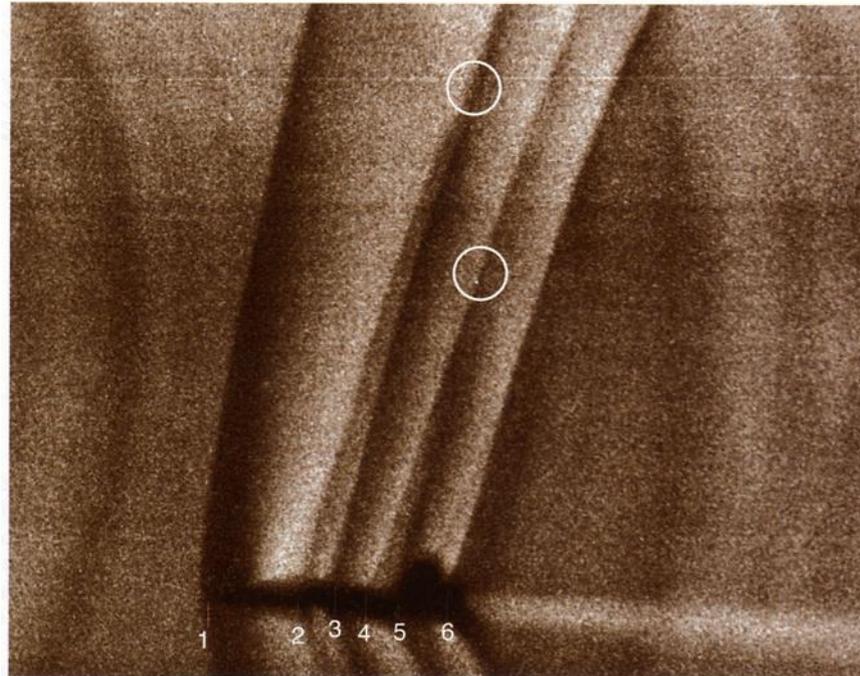
Le cône de Mach (1/2)

- Lorsque l'avion est en B, l'observateur en C entend le son émis lorsque l'avion était en A.
→ l'auditeur perçoit l'avion *après* son passage.

- au sol : le bang est sans cesse renouvelé
- dans l'avion : il n'est pas perçu
- Aucune perturbation en dehors du cône de Mach (qui possède une certaine extension)



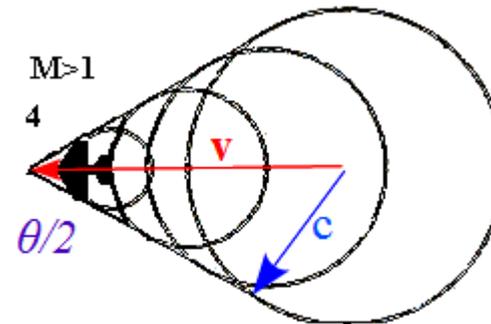
Le cône de Mach (2/2)



4. ONDES DE CHOC autour d'un avion T38 volant à Mach 1,1 le 13 décembre 1993. Les zones les plus sombres correspondent aux chocs les plus intenses sur l'avion. On note les fusions de chocs issus de zones différentes de l'avion (cercles blancs).

l'angle permet de déduire la vitesse

$$\sin(\theta/2) = \frac{c}{v} = \frac{1}{M}$$



Le mur du son (1/2)

- Échelle du nombre de Mach

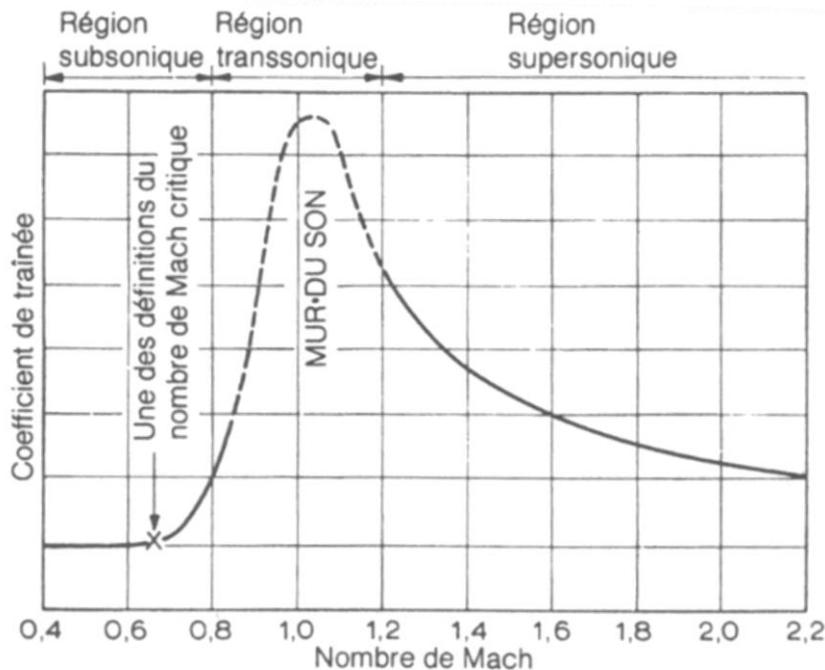
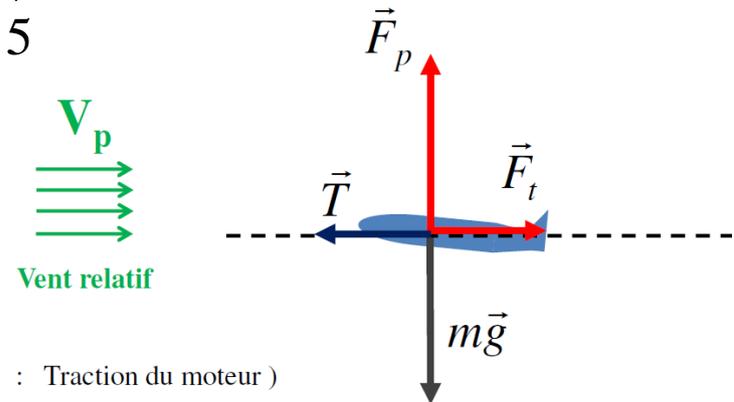
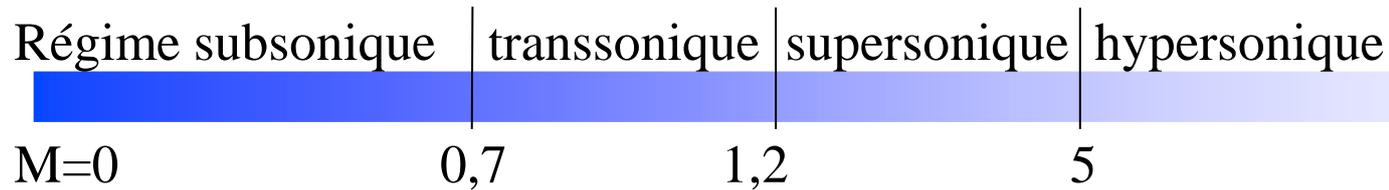
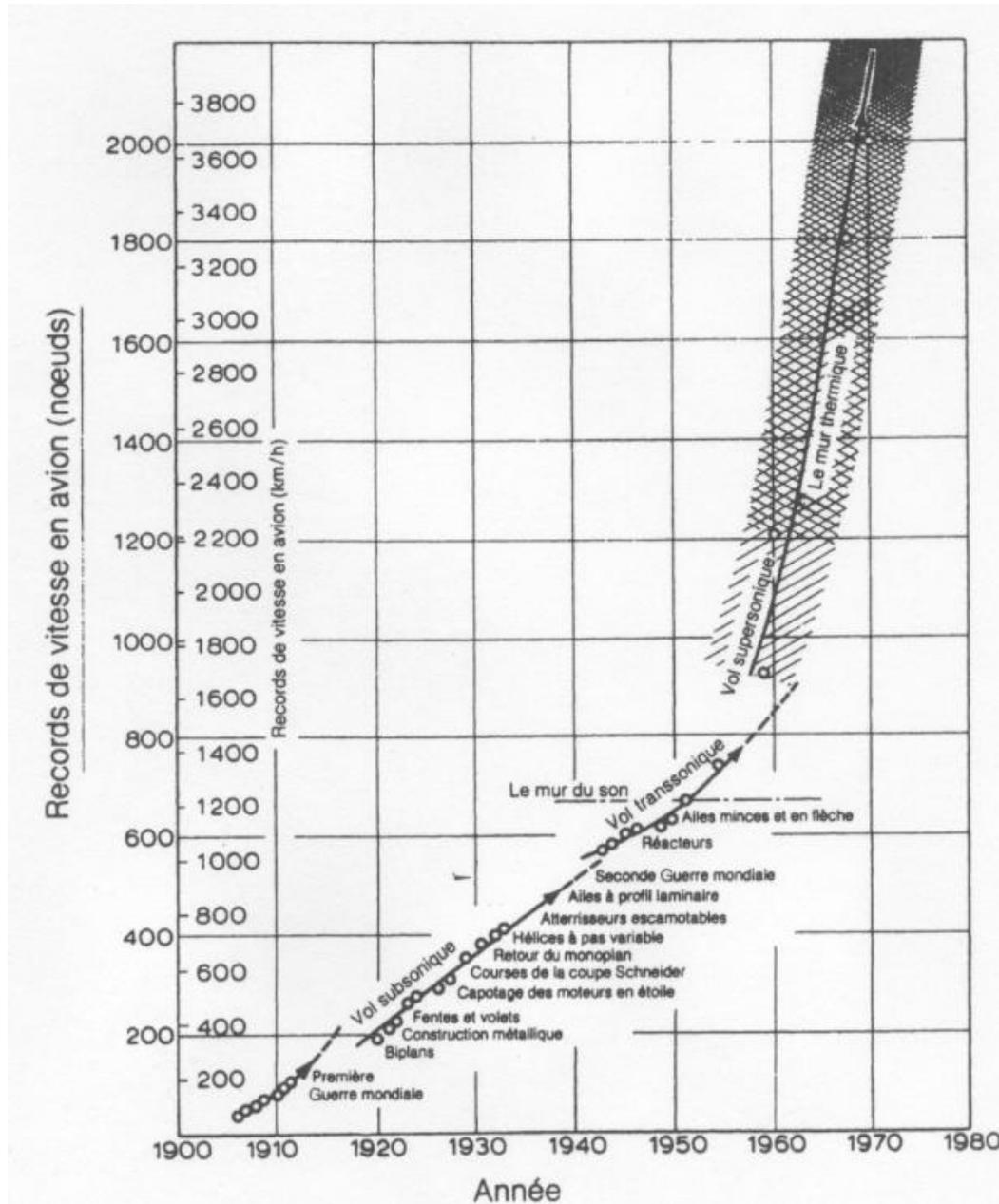


Figure 11.7 Augmentation de traînée en régime transsonique.

- Mach critique : le nombre de Mach est atteint localement (vers $M=0,7$)
- Transsonique, **le mur du son** : redouté des pilotes, augmentation de la traînée, réduction de la portance, commandes perturbées
- Supersonique : bien connu grâce à la balistique
- Hypersonique : effets nouveaux, thermiques, etc.

Le mur du son (2/2)



- Étude des projectiles à Mach 2 : 1742
- Premier homme à vaincre le mur du son : Chuck Yeager à bord du Bell X-1 le 14 octobre 1947
- Premier homme à vaincre le mur du son en chute libre : Félix Baumgartner le 14 octobre 2012

Bibliographie

Français

- *Acoustique : propagation dans un fluide*

D. Royer et E. Dieulesaint

Techniques de l'ingénieur AF3812

- *Acoustique des instruments de musique*

A. Chaigne et J. Kergomard

ISBN 978-2-7011-3970-8

chapitre 8. Non-linéarités, pages 344-369

- Frédéric Elie, mai 2009 : http://fred.elie.free.fr/acoustique_nonlineaire.htm

- Cours généraliste sur les non-linéarités en physique:

<http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~ddwit/enseignement/cours-nonl.pdf>

Anglais

- *Springer handbook of acoustics*

ISBN : 978-0-387-30446-5

chapitre 8. Nonlinear Acoustics in Fluids

pages 257-297

- *Nonlinear Acoustics: Theory and Applications*

Mark F. Hamilton et David T. Blackstock

Annexe 1 : directivité en fonction de la fréquence

- La génération du rayonnement acoustique par un piston circulaire (de diamètre d) obéit au phénomène de **diffraction**.
 - La directivité dépend de la longueur d'onde λ : plus la fréquence est haute, plus le faisceau est directif.
 - Les basses fréquences diffractent plus rapidement que les basses fréquences
 - La transition entre **champ proche (zone de Fresnel)** et **champ lointain (zone de Fraunhofer)** se trouve à une distance $z=(d/2)^2/\lambda$

