

# Instruments de musique à vent : Comment éviter le chaos pour faire de la musique ?

J. Kergomard,

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,

UMR/CNRS 6613,

Institut d'Acoustique et de Mécanique,

Av. O. Messiaen,

BP 535,

72017 Le Mans Cedex

**E**tudier les instruments de musique semble simple : on peut considérer ce que fait un instrumentiste et essayer de l'analyser. On essaye de créer un modèle théorique, ou bien une maquette, pour faire des sons reproductibles. Las ! On se rend compte que les sons produits couramment par le musicien sont une petite partie des sons possibles, qu'il s'est ingénié à privilégier au détriment des sons douteux. Si ceci lui a demandé un long apprentissage, c'est qu'une petite modification des paramètres de contrôle peut produire de grands effets, désirables ou indésirables. Et même après ce long apprentissage, la limite entre sons considérés comme bons et sons douteux est très élastique, selon le contexte (transitions brèves ou non) et évidemment selon l'esthétique retenue. Bien entendu, le choix entre sons acceptables et moins acceptables est facilité par la conception de l'instrument, et donc par le travail du facteur.

Il reste aux scientifiques une alternative : s'intéresser à tous les sons possibles, ou s'intéresser aux sons "normaux", c'est-à-dire au régime permanent périodique de l'instrument-système dynamique. On notera d'emblée un paradoxe : c'est en cherchant à décrire ces derniers au moyen d'un modèle le plus simple possible que les acousticiens ont rejoint la problématique de la physique des oscillateurs non linéaires... et trouvé des sons que l'on n'avait pas encore entendu, en tout cas avec les instruments à vent [Mc Intyre et coll., 1983] !

Encore une fois, l'acoustique musicale nous permet d'apprendre bien des choses originales : étudier des oscillations **souhaitées**, obtenues à partir d'instruments optimisés durant des décennies, ouvre des horizons bien différents de l'étude de la réduction d'oscillations et du bruit. En particulier cela impose d'aller voir ce qui se passe bien au-delà du **seuil** d'oscillations ! Pour ce faire, il est possible d'exploiter la littérature considérable relative aux systèmes bouclés en électronique ou en automatique.

## L'article de Mc Intyre, Schumacher et Woodhouse (1983)

Nous avons fait plus haut allusion au travail de Mc Intyre, Schumacher et Woodhouse, publié en 1983, qui a marqué une date importante dans l'étude de l'acoustique des instruments de musique, en tout cas ceux qui fonctionnent en oscillations auto-entretenues : anches, flûtes et cordes

frottées. Profitons-en pour préciser que nous prenons ici surtout l'exemple des premiers, mais que beaucoup d'idées qui suivent peuvent plus ou moins s'appliquer également aux autres catégories. L'objectif de ces auteurs était donc de simplifier au maximum les modèles de ces instruments, en les ramenant à un excitateur non-linéaire localisé, couplé à un résonateur linéaire du type ligne à retard (tuyau ou corde). La donnée d'une caractéristique non linéaire (pour l'excitateur) et d'une fonction de réflexion (caractérisant l'entrée du résonateur) permet de générer simplement des oscillations, en régimes transitoire et permanent. L'intérêt de l'article résidait en particulier dans une discussion générale de la forme de ces deux caractéristiques.

Mais en appendice, on trouvait le lien avec une classe importante d'oscillations non linéaires : celle qui conduit à des scénarios de route vers le chaos de type Feigenbaum. Les théoriciens des instruments de musique rejoignaient ainsi les idées émergentes, déjà émises par Poincaré, mais surtout développées depuis les années soixante, du chaos déterministe, c'est-à-dire de l'imprédictibilité des systèmes non-linéaires déterministes.

On le voit, cet article ouvrait beaucoup de pistes, et il va sans dire que les idées de ses auteurs ont été abondamment reprises dans de nombreuses directions.

Il se trouve que le scénario de Feigenbaum aboutit à une surprise pour l'instrumentiste à vent : les différents régimes obtenus à pression de souffle croissante correspondent à des divisions successives de la fréquence par 2, 4... (jusque, si c'est possible, le chaos, c'est-à-dire un spectre de bruit blanc auquel reste superposé le spectre de raies du premier régime, normal). Or il est bien connu que forcer le souffle conduit plutôt à octavier (pour les instruments coniques), ou "douzoyer" (pour les instruments cylindriques), c'est-à-dire à des harmoniques, et non des sous-harmoniques. Comment expliquer simplement ce paradoxe ? Pour ce faire, nous allons reprendre le schéma de l'article de 1983, dans le cas particulier de la clarinette, en l'enrichissant d'une méthode graphique due à Maganza et coll. (1986), et en choisissant une non-linéarité issue d'un modèle physique (cf. Kergomard, 1996). Ceci nous permettra de passer en revue les nombreux régimes d'un instrument à vent.

## Modèle simple de clarinette et doublements de période

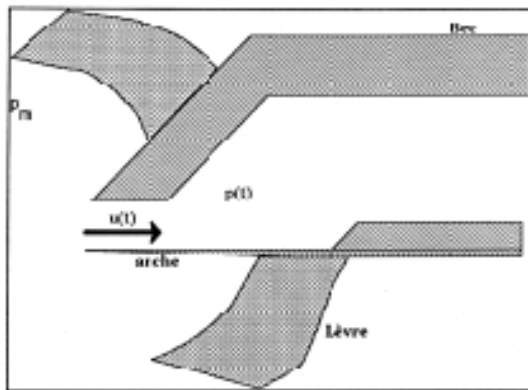


Fig.1 : Géométrie d'une anche. Dans la bouche règne une pression  $p_m$  supposée constante, dans le bec une pression variable  $p(t)$ . Leur différence produit entre l'anche et le bec un débit  $u(t)$ .

passant entre l'anche et le bec et  $p$  la pression acoustique dans le bec de la clarinette. Une anche est une valve : l'instrumentiste produit une surpression statique  $p_m$  dans sa bouche, où l'on admet qu'il n'y a pas de pression acoustique significative, et la différence entre cette pression  $p_m$  et la pression  $p(t)$  dans le bec permet la création du débit  $u(t)$ , proportionnel à l'ouverture de l'anche, supposée être un simple ressort, et à la racine carrée de la différence de pression (nous ne discutons pas ici la validité de ce modèle, cf Hirschberg et coll. 1994 et 1996, les résultats obtenus pourraient être qualitativement les mêmes avec d'autres caractéristiques). Quand  $p(t)$  est fortement négative, l'anche "plaque" et le débit est nul. Si  $p(t)$  est supérieur à  $p_m$ , le débit devient négatif, mais cette situation n'a jamais encore été observée. Autour d'une différence  $p_m - p(t)$  nulle, le débit croît proportionnellement à elle ; mais quand cette différence grandit, donc quand  $p(t)$  diminue, le débit sature (passe par un maximum) avant de décroître. C'est cet effet qui permet la génération d'oscillations.

Le modèle retenu pour le résonateur est celui d'un simple tuyau cylindrique sans perte et débouchant à son extrémité sur une impédance nulle, ce que nous discuterons plus loin.

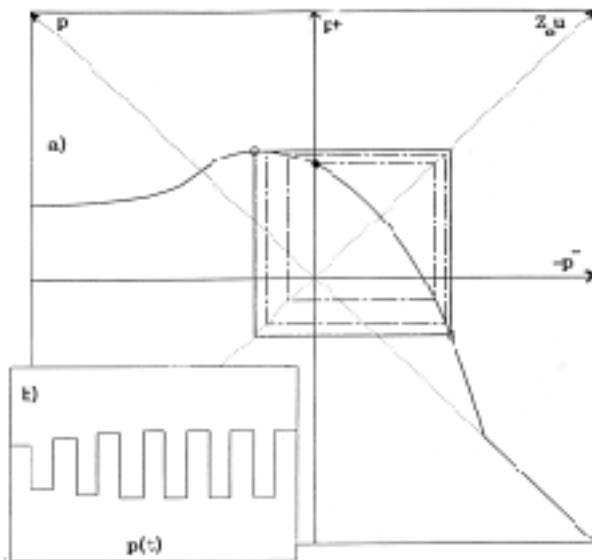


Fig.2 : Méthode graphique de construction d'une oscillation de "clarinette" en signal carré (cf. Maganza et coll 1986). De la courbe non linéaire  $Z_c u(t) = F[p(t)]$  on tire par rotation de  $45^\circ$  la courbe  $p_+(t) = G[-p_-(t)]$  (a), où  $p_+$  et  $p_-$  sont les ondes aller et retour de pression. Un modèle élémentaire pour le résonateur cylindrique est une ligne à retard simple  $-p_-(t+2l/c) = p_+(t)$  (b), où  $l$  est la longueur et  $c$  la vitesse du son. A l'instant initial la pression dans la bouche passe brutalement de 0 à  $p_m$ , et l'onde retour est nulle, ce qui donne la valeur de  $p_+$ , intersection de l'axe des ordonnées avec la caractéristique non linéaire. Il suffit alors de résoudre alternativement (b) et (a) pour en déduire  $p_-$  et  $p_+$  à l'instant  $2l/a$ , et donc  $p$  et  $u$ , et ainsi de suite... On obtient le signal carré de la figure 2b pour la pression. Sur la figure 2a, le point noir est la valeur initiale de  $p_+$ , et les points ronds les 2 valeurs en régime permanent.

### Régime permanent simplissime

Un cas limite d'oscillation peut être aisément compris : en régime permanent, d'une demi-période à l'autre, la pression  $p(t)$  passe alternativement de  $p_m$  (le débit est alors nul) à  $-p_m$  (le débit est encore nul, car l'anche plaque, à condition que  $p_m$  soit suffisamment grand). On a donc un signal carré pour la pression (spectre impair), et un débit nul à tout instant : ceci n'est possible que dans le cas d'un modèle extrêmement simple. En particulier, écrire que le débit est nul pour toutes les composantes du signal carré implique une impédance infinie pour chacune d'entre elles, et donc l'ignorance de la dissipation dans le résonateur. Ce modèle limite nous permet déjà de saisir deux phénomènes essentiels dans les instruments à anche :

- le niveau de pression est très élevé à l'entrée de l'instrument, car dans cette approximation l'anche transforme une pression statique  $p_m$  en une pression alternative  $\pm p_m$ . De fait, des niveaux de 170 dB ont pu être mesurés, soit une pression statique de 30 mbars !

- Par contre, le rayonnement est un phénomène marginal (quasi-accidentel), puisque la dissipation n'intervient que comme correctif à notre modèle de fonctionnement, et en outre ce sont les autres types de dissipation qui sont de loin les plus importants. Un modèle élémentaire montre que la pression extérieure correspond à une dérivée du signal carré, et que la fonction de transfert en fréquence est égale à  $1/2 (k_n a) (a/D)$  où  $k_n$  est le nombre d'ondes,  $a$  le rayon du tuyau,  $D$  la distance de la sortie du tuyau au point d'écoute considéré. Il s'agit donc du produit de deux petites quantités, puisque  $k_n$  est de l'ordre de grandeur de l'inverse de la longueur  $l$  du tuyau. Si on prend des ordres de grandeur du type  $a = 1$  cm,  $l = 1$  m,  $D = 1$  m, on trouve un rapport de  $0,75 \cdot 10^{-4}$ , soit 82 dB de différence par rapport à l'entrée pour le fondamental. C'est plus agréable à entendre !

Nous considérons la caractéristique non linéaire d'une anche simple (figure 1) représentée sur la figure 2.

Si nous tournons la tête de  $45^\circ$ , nous voyons la courbe  $Z_c u(t) = F[p(t)]$ , où  $Z_c$  est l'impédance caractéristique du tuyau (égale à  $\rho c/S$ ,  $\rho$  étant la densité de l'air,  $c$  la célérité du son et  $S$  la section),  $u(t)$  est le signal de débit acoustique

Nous avons donc présenté un régime possible : quand peut-il se produire ? Ceci nous impose de définir la pression statique de plaquage, notée  $p_m$  : au-dessus de cette valeur

dans la bouche de l'instrumentiste, l'anche plaque sans pouvoir osciller. Cette pression doit annuler la raideur du ressort, elle lui est donc proportionnelle ainsi qu'à la distance anche-bec au repos. En régime dynamique, on trouve aisément pour notre modèle que si la pression  $p_m$  dans la bouche est supérieure à la moitié de  $p_M$ , alors on obtient le régime dont nous avons parlé.

Ce régime peut-il se produire réellement? On se heurte immédiatement à des difficultés importantes, liées au fait que, entre autres choses, les facteurs incurvent la table du bec sur laquelle l'anche vient plaquer, pour éviter qu'elle ferme brutalement le conduit, limitant ainsi l'émission de fréquences aiguës. Mais dans le modèle simple, quand  $p_m$  dépasse  $p_M/2$ , ce régime est possible.

### Crescendo et bifurcations

Une question est : que s'est-il passé quand  $p_m$  a crû de 0 à  $p_M/2$ ? On note que cette question est intéressante pour le musicien : que se passe-t-il quand il souffle de plus en plus fort? comme pour le physicien : comment le paramètre  $\gamma = p_m/p_M$ , paramètre essentiel de contrôle, permet de passer du régime statique, existant évidemment si  $p_m = 0$ , au régime oscillant?

La réponse n'est pas du tout évidente. En-dessous de  $\gamma = 1/3$ , on ne trouve pas de solution oscillante (Wilson et Beavers 1974). Au-dessus de cette valeur, on trouve une oscillation stable, dont l'amplitude croît régulièrement quand on s'éloigne du seuil  $1/3$ . Ceci est un résultat extrêmement important : la "bifurcation" entre le régime statique (1 seul point limite) et le régime oscillant (signal carré : deux points limites) est dite directe.

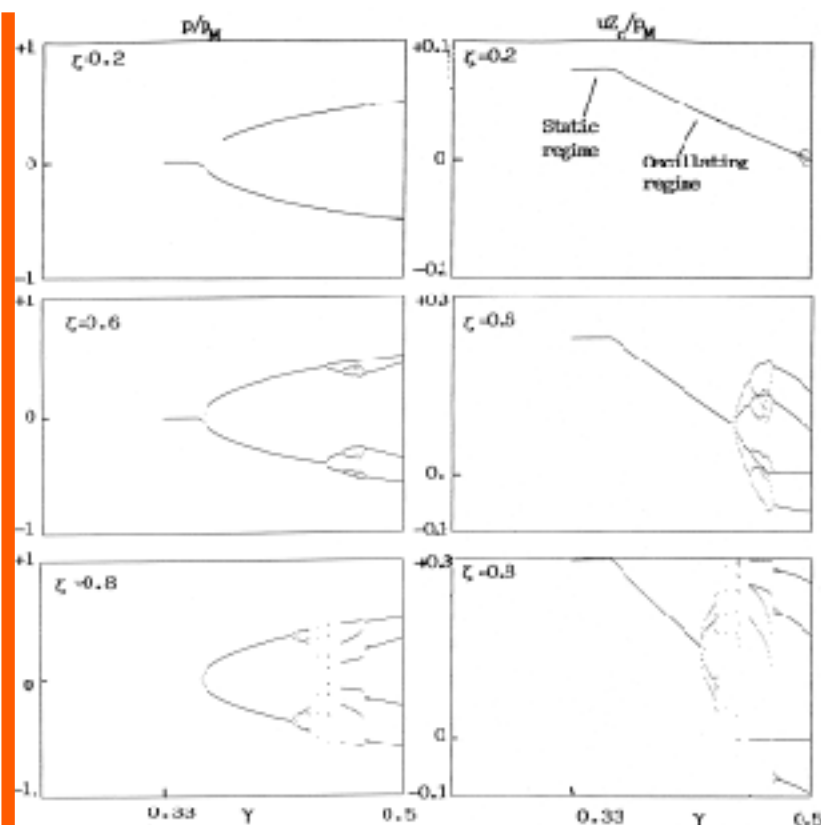
**On peut jouer la clarinette pianissimo.** Grand et coll. [1997] ont montré que ce n'était pas le cas pour les notes graves du saxophone, car la deuxième résonance est plus haute que la première : la bifurcation est dite inverse, et alors il existe un "seuil sous-critique", on peut jouer moins fort en diminuant le souffle qu'en l'augmentant en partant de zéro, mais on ne peut faire tendre la pression acoustique vers zéro. C'est musicalement essentiel!

Mais que se passe-t-il quand on s'éloigne de ce seuil? La réponse nous est fournie par la figure 3. On voit apparaître de nouvelles bifurcations, avec 4, 8, 16... points limites, puis une décroissance avec 8, 6, 4... jusqu'à deux points pour  $\gamma = 1/2$ . 4 points signifient un doublement de la période (on atteint alternativement un point des branches du haut et du bas), 8 points un quadruplement, 6 points un triplement...

Plus la multiplication est d'ordre élevé, moins large est la gamme de paramètres de souffle pour laquelle l'oscillation correspondante est stable. En outre, la figure 3 montre que le résultat dépend fortement d'un autre paramètre sans dimension, que nous avons noté. Celui-ci est contrôlé à la fois en amont par le facteur, et en aval par l'instrumentiste quand il choisit son anche et quand il place ses lèvres et pince plus ou moins fort. On le trouve, dans notre modèle simple, égal à :

$$\xi = \frac{S}{S'} \left( 2\gamma_s \frac{p_a}{p_M} \right)^2$$

où  $s$  est la surface de l'ouverture anche/bec,  $S$  la section du tuyau,  $\gamma_s = C_p/C_v$ ,  $p_a$  la pression atmosphérique.



**Fig. 3 : Scénario de bifurcation pour le modèle représenté par la figure 2. On a choisi trois valeurs du paramètre d'anche.**

La pression du souffle,  $p_m$ , représentée par le paramètre  $\gamma = p_m/p_M$ , varie entre  $\gamma = 1/3$  (seuil d'oscillation) et  $\gamma = 1/2$  (seuil de l'anche battante).

A gauche la valeur de la pression acoustique dans le bec, rapportée à la pression de plaquage  $p_M$ ; à droite celle du débit entrant dans le bec, rapportée à  $p_M/Z_c$ . On note qu'en régime oscillant normal à deux points, le débit est stable (il ne peut avoir de composante non continue, car les pics d'impédance du résonateur ont été supposés infinis, ce qui est différent pour les fréquences sous-harmoniques, de fondamental moitié, quart...).

Les segments où les points manquent sont ceux pour lesquels la convergence numérique est trop lente.

Etant donné les limites de crédibilité du modèle, il est sage de n'en tirer que des conclusions qualitatives, mais cependant très pratiques : si on met un bec de clarinette normale sur une clarinette basse, on divise ce paramètre  $\xi$  par un certain facteur (puisque  $S$  augmente), et on trouve alors que les bifurcations sont plus difficiles à obtenir. Si on prend une anche plus molle, on diminue la pression de plaquage  $p_M$  et alors les bifurcations sont plus faciles. Mais la place des lèvres et leur "pince" jouent aussi un rôle sur ce paramètre.

Quelles conclusions tirer de cette analyse ?

- Pour certaines valeurs des paramètres de jeu (ou de facture), les régimes peuvent être stables, mais très "fugitifs" quand les paramètres varient légèrement ;
- L'obtention de ces régimes n'est pas nécessairement simple, et dépend des conditions initiales : si on considère un doublement de période, plus on en approche, plus la convergence vers le régime permanent est lente, mais dès que la bifurcation est passée, la convergence redevient rapide. En fait juste avant la bifurcation, la convergence est tellement lente qu'il s'agit d'un régime presque non-périodique, chaotique ;
- Dans ce modèle, on n'obtient pas de régime chaotique proprement dit - un régime chaotique est un régime non périodique, bien que cette distinction soit quelquefois subtile puisque notamment on n'observe en pratique un signal que sur une durée finie (voir pour toutes ces questions Bergé et coll. 1984, Manneville 1991, Dahan Dalmedico 1992) ;
- Notre modèle élémentaire, reposant sur seulement deux paramètres sans dimension, nous montre déjà une grande complexité des régimes possibles. Qu'en serait-il si on prenait un modèle avec deux ou trois fois plus de paramètres ? En outre, notre modèle, quand  $x$  devient plus grand que l'unité, se complique encore : en effet, il y a alors plusieurs solutions possibles dans le processus d'itération avec la fonction non linéaire de la figure 2. Ceci ressemble à ce qui se passe avec la caractéristique non linéaire de la corde frottée ; celle-ci comporte une phase "adhérence" corde-archet, et une phase "glissement", et son caractère fortement non linéaire impliquant plusieurs solutions a fait et continue de faire couler beaucoup d'encre.
- Quid de la "réalité" ?

Il y a quelques années, nous avons rencontré un bassoniste, N. Rihs, qui réussit à jouer l'octave au-dessous de la note normale (obtenue, rappelons-le, pour la fréquence  $c/2l$  pour un instrument conique ( $c$  est la vitesse du son,  $l$  la longueur). Autrement dit, il jouait aussi grave que le contrebasson. Comment faisait-il ? Il choisissait bien son anche et plaçait ses lèvres d'une façon appropriée. C'est la première fois que nous entendions ce phénomène, qui a pu être également obtenu dans certaines conditions avec une anche molle sur une clarinette [Rihs et coll. 1995].

Par contre, avec un instrument à cordes frottées, ce qu'on appelle les sous-harmoniques est un phénomène mieux connu, exploré d'ailleurs par les trois auteurs dont nous avons parlé plus haut. Des expériences reproductibles ont été faites par Idogawa et coll. [1993] sur une clarinette excitée artificiellement, malheureusement il est très difficile d'en comparer les résultats à un modèle : en effet, ces régimes fugitifs existent bien en réalité, mais nous avons dit qu'ils dépendaient fortement des paramètres, et a fortiori du modèle.

Pour le nôtre, on imagine bien que le retour au son à deux points limites pour  $\gamma = 1/2$  dépend crucialement du modèle d'anche battante. On voit ici une limite forte aux comparaisons expérience-théorie **quantitatives**. Deux raisons majeures expliquent cette limite : d'une part il est difficile d'estimer correctement les nombreux paramètres contrôlés par un musicien, l'utilisation d'une bouche artificielle n'étant qu'une solution partielle et, d'autre part, le résonateur est souvent multi-résonances (dans ce qui précède, comme il n'y a pas de dissipation, il y en a même une infinité), ce qui entraîne une analyse extrêmement complexe du système dynamique équivalent.

Si l'on revient au qualitatif, on notera un fait intéressant : Maganza et coll [1986] ont été les premiers à obtenir expérimentalement un schéma de Feigenbaum allant jusqu'au chaos, mais ils avaient radicalement modifié la non-linéarité en remplaçant l'anche d'une clarinette par un haut-parleur et, grâce à un microphone placé à l'entrée, ils produisaient ad libitum la non-linéarité qu'ils voulaient de façon électronique ou numérique.

Ce qui est remarquable dans les sons obtenus c'est qu'auditivement la succession (ou cascade) de sons obtenus en augmentant le paramètre de contrôle avait un côté pas tout à fait inhabituel, ressemblant à certaines successions que l'on rencontre réellement avec un instrument et un instrumentiste normaux. Sans doute les transitions se font-elles d'une façon que l'oreille reconnaît comme similaire. Pourtant ces successions "normales" n'ont rien à voir car elles sont montantes !

A ce propos, il semble intéressant de distinguer ici le point de vue physique et le point de vue perceptif. Du point de vue du physicien, que ce soit expérimentalement ou numériquement (les résultats étant obtenus à partir d'un modèle par simulation numérique), ces deux types de succession n'ont pas grand-chose à voir, nous y revenons plus loin. C'est bien du point de vue perceptif qu'il peut y avoir similarité : c'est pourquoi il est légitime de distinguer "**simulation**" et "**synthèse**", la deuxième ayant une finalité musicale. Si l'objectif est de satisfaire l'oreille (et le cerveau !), on a pu de fait constater que la nature de la non-linéarité avait une importance moindre, et que l'essentiel était sans doute le réalisme des transitions entre régimes.

C'est là que la synthèse dite **par modèles physiques** prend tout son intérêt par rapport à la synthèse du signal (c'est-à-dire du **résultat**), car elle prend sa source dans une **cause** de génération du son, du type auto-oscillations, qui est très familière à nos oreilles. Mais la cause précise est moins importante à nos oreilles, et peut s'écarter d'un modèle physique. Ceci permet in fine d'assurer un certain "oecuménisme" des méthodes de synthèse : la finalité étant musicale, le tout est de satisfaire l'auditeur et de permettre à un "instrumentiste" de s'exprimer, la recherche d'un certain réalisme ne devant pas sortir de cette finalité.

Sur toutes ces questions, nous renvoyons le lecteur aux actes du colloque "Modèles physiques, création musicale et ordinateur" (Grenoble, 1990), et plus particulièrement à la contribution de Cadoz.

## Autres régimes possibles sur les instruments à vent

### Octaviations et multiphoniques

Un instrumentiste à vent sait que, “normalement”, quand on souffle plus fort, à condition de modifier les paramètres d'embouchure, on obtient un octaviation pour les instruments fonctionnant en demi-onde et un “douzolement” (triplement de fréquence) pour ceux qui fonctionnent en quart d'onde. En fait, il sait aussi que dans la plupart des cas, il doit ouvrir un petit trou, appelé trou de registre, qui facilite l'opération en modifiant l'impédance d'entrée du résonateur pour que l'oscillation se fasse plus facilement avec la deuxième fréquence de résonance. On obtient ainsi une succession qui est cette fois une succession montante et qui est, elle, totalement familière aux musiciens.

Pour bien comprendre la différence avec la succession descendante, on peut préciser un point essentiel : si on referme le trou d'octave après l'attaque, le son ne revient le plus souvent pas à l'octave grave. En fait nous ne l'avons pas dit, mais ce régime aigu était tout à fait possible avec notre construction graphique (figure 2). Il suffisait (ici pour la clarinette) de choisir comme pas temporel entre deux points non pas la durée  $4l/c$ , mais  $4l/3c$  (cf. par exemple Laloe et Laloe 1985). Comment dans cette construction choisir entre ces deux durées ? En fait, cela se fait au moment du choix des conditions initiales ; évidemment, le résonateur trop simplifié ne permet pas de prédire alors si l'un de ces deux régimes est plus facile que l'autre, et de fait il faut en général s'aider du trou de registre pour favoriser l'attaque du second, mais c'est seulement l'attaque qui a besoin d'être aidée.

En résumé, la succession montante s'obtient en changeant les conditions initiales, la succession descendante en changeant les paramètres ; cependant, ceci est assez schématique car expérimentalement la distinction entre paramètres et conditions initiales n'est pas toujours simple, et le musicien apprend de façon réflexe à obtenir les régimes permanents qui l'intéressent, en combinant habilement et finement les deux. Au demeurant, le physicien n'a pas nécessairement non plus un grand intérêt pour les conditions initiales : il existe des méthodes, comme l'équilibrage harmonique (cf Gilbert et coll. 1989), qui permettent de connaître tous les régimes permanents périodiques (cycles limites) possibles indépendamment des conditions initiales, et ceci lui donne des résultats complémentaires des simulations *ab initio*, qui donnent, elles, les transitoires et toutes sortes de régimes, mais peuvent laisser échapper des régimes permanents stables possibles. Les résultats des figures 2 et 3 ont été obtenus pour des conditions initiales particulières données.

A noter qu'a priori, même si ceci a été peu étudié, on peut obtenir le mélange entre ces séries descendantes ( $f$ ,  $f/2$ ,  $f/4$ ...) et montantes ( $f$ ,  $3f$ ,  $5f$ ...) : la construction graphique nous autorise à trouver aussi  $3f/2$ ,  $3f/4$ ...,  $5f/2$ ,  $5f/4$ ...

Mais il faut encore compliquer ce que nous venons d'énoncer dans le cas où le résonateur présente des résonances fortement inharmoniques, ou en tout cas

loin des rapports simples 2, 3... La succession présente alors un caractère assez différent. On peut obtenir différents sons “normaux” au fur et à mesure qu'on augmente le souffle, mais entre eux on obtient alors ce qu'on appelle des “multiphoniques” : ceux-ci portent leur nom parce qu'un auditeur a l'impression d'entendre une superposition de sons de fréquences différentes. En fait, il reste beaucoup de travail à faire pour mieux les comprendre : dans certains cas, il s'agit de sons vraiment périodiques, de fréquence très grave, plus grand commun diviseur des fréquences de résonance (cf. Castellengo 1982, Backus 1978, Keefe et Laden 1991, Gibiat et Castellengo 1995...).

Dans d'autres cas, on a affaire à des sons quasi-périodiques, de modulation d'amplitude, ou encore plus compliqués. Cette cascade normal-multiphonique-normal... est particulièrement remarquable sur les instruments graves (cf. par exemple Riedelbauch 1988), qui possèdent beaucoup de fréquences de résonance, et de fait le physicien l'appellera bien schéma de bifurcation. Moins compliqué à l'audition, le schéma obtenu en augmentant le souffle sur une flûte à bec n'en est pas moins très compliqué à analyser dans les transitions entre régime normaux : Gibiat [1988] en a fait une analyse fine en utilisant les sections de Poincaré. A noter aussi que les multiphoniques de cuivres sont très particuliers, car ils sont obtenus en chantant dans l'instrument : ils s'agit donc d'une auto-oscillation excitée en oscillations forcées (imaginez une équation de Van der Pol avec une source dans le second membre).

Du point de vue de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires, la succession de doublements de période est appelé “scénario sous-harmonique” de route vers le chaos (Manneville 1991). Les autres cas discutés ci-dessus reposent plutôt sur une succession de bifurcations de Hopf, appelée “scénario quasi-périodique”, dont la seconde bifurcation repose sur la déstabilisation d'un régime périodique vers un régime quasi-périodique. Ce phénomène a été mis clairement en évidence en contrôlant soit les écarts de résonances sur un saxophone à l'aide de tubes branchés de longueur variable, soit la “pince” de l'anche. Les résultats expérimentaux (cf Dalmont et coll. 1995) ont été très bien simulés par un modèle simple (cf Gazengel et coll. 1995).

### Transitoires, transitions et canards

Nous avons parlé de “régimes”, sous-entendu “permanents”, et peu de transitoires. Or l'attaque d'un son est une propriété musicale essentielle de celui-ci : d'une part l'instrumentiste souhaite qu'elle ne soit pas trop difficile, d'autre part c'est elle qui peut distinguer deux instruments de spectre identique.

Dans notre modèle, pour les sons normaux, nous trouvons que selon la valeur de  $x$ , le transitoire peut durer de 3 ou 4 “périodes” (égales à  $c/4l$ ) à 20 ou 30. Au début la croissance est exponentielle (cf. figure 4), et après il y a saturation et donc stabilisation. On remarque donc ici que ce paramètre, contrôlé, nous l'avons dit, à la fois par le facteur et l'instrumentiste, est déterminant non seulement pour l'existence ou non de bifurcations, mais aussi pour la durée de l'attaque. A ce propos, on voit ici une grande différence avec une excitation forcée, pour



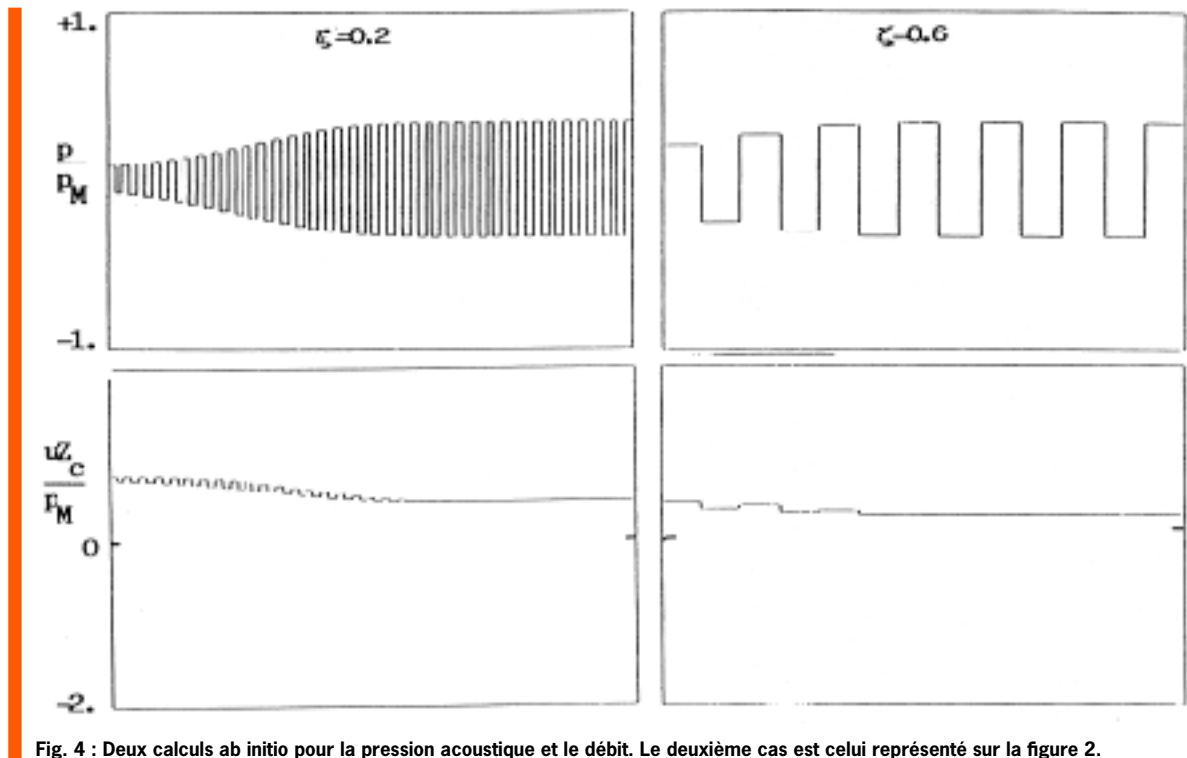


Fig. 4 : Deux calculs ab initio pour la pression acoustique et le débit. Le deuxième cas est celui représenté sur la figure 2. En régime permanent, le débit est continu (cf. la légende de la figure 3).

laquelle le transitoire dure d'autant plus longtemps que le facteur de qualité du résonateur est grand - par contre ceci est vrai ici pour l'oscillation libre qu'est le transitoire d'extinction.

Enfin, la figure 4 nous montre des formes de transitoires obtenus pour notre choix de conditions initiales. Mais nous aurions pu en changer, par exemple en supposant l'anche plaquée par la langue et libérée brutalement, ce qui aurait modifié la perception de l'attaque. On conçoit donc que les instrumentistes bénéficient là d'un moyen d'expression fondamental, analogue à la main droite (commandant l'archet) pour les violonistes.

Nous avons parlé de transitoires, c'est-à-dire de la durée d'établissement d'une note à partir du silence, ou de la durée d'extinction. Mais on peut aussi assurer le passage entre deux notes sans "couper" le souffle, elles sont alors **"liées"**. Il est difficile de traiter ce problème du point de vue théorique, mais la synthèse par modèles physiques proposée par Ducasse [1990], qui a utilisé le même modèle de base avec des raffinements, comme un modèle précis de fermeture de clés, est très réaliste. Il est à noter que l'expression, dans la transition entre deux notes, peut donner lieu à des régimes très particuliers ; en particulier en musiques improvisées ou contemporaines, les instrumentistes ont une grande variété d'attaques et de transitions, qui peuvent déboucher sur des régimes que nous qualifierons de "bizarres".

Dans le même ordre d'idées, on peut changer les paramètres dans les passages suffisamment lents, jusqu'à flirter avec les "canards". Qu'est-ce donc qu'un **canard** ?

Là encore la synthèse de Ducasse a donné une réponse claire : il s'agit de la résonance d'anche, que l'on modélise en prenant en compte sa dynamique, et que l'on obtient en oubliant d'amortir l'anche avec la lèvre, en mettant par exemple le bec entier dans la bouche (cf. Nederveen 1969). On voit donc que pour des configurations normales de jeu, on peut obtenir une très grande variété de régimes, mais que si on cherche des valeurs de paramètres un peu limites, ne serait-ce qu'en agissant sur la cavité buccale, on peut alors trouver de nombreux moyens d'expression. Rappelons que Thomson [1979] avait déjà analysé l'emploi de la résonance d'anche pour jouer en particulier les notes aiguës de la clarinette.

Nous notons également que la résonance de l'anche est similaire à la résonance des lèvres de trompettistes (ou cornistes, trombonistes...), mais que cette dernière joue un rôle central dans l'excitation obtenue, l'instrumentiste cherchant à l'accorder avec la résonance du résonateur : ceci lui permet de modifier beaucoup plus fortement l'excitateur que l'instrumentiste jouant des "bois" et d'en tirer des régimes possibles beaucoup plus nombreux. De ce point de vue, on pourrait classer les instruments à vent selon le degré de modulation possible de l'excitation : les deux extrêmes sont le tuyau d'orgue, pour lequel le facteur a tout fixé, et la voix chantée, d'une extraordinaire flexibilité, et entre les deux on pourra situer dans l'ordre la flûte à bec, les bois de l'orchestre, et les cuivres.

## Conclusion

Ce bref aperçu des régimes d'un instrument à vent nous permet de conclure en passant en revue les divers spécia-

listes qui s'en servent ou y sont confrontés. Nous avons un peu mélangé les instruments, en extrapolant peut-être un peu vite les résultats concernant la clarinette à d'autres instruments. De fait, elle est le seul instrument qui utilise une ligne à retard simple comme résonateur. Dalmont et nous-même [1995] avons montré théoriquement et expérimentalement que les instruments coniques à anche sont à peu près équivalents à une corde frottée près du chevalet, et la clarinette à une corde frottée en son milieu : dans ce cas les deux bouts de la corde étant symétriques sont équivalents à un seul (cf. Mc Intyre et coll. 1983). Nous avons également trouvé des formes de résonateurs permettant d'obtenir les mouvements de Helmholtz (typiques de la corde frottée) intermédiaires, c'est-à-dire correspondant à une position de l'archet intermédiaire.

Commençant par **l'instrumentiste**, nous avons vu qu'il peut obtenir une très grande variété de régimes. L'apprentissage consiste en grande partie à savoir les sélectionner, ce qui n'empêche pas, une fois plus à l'aise, de tenter de jouer avec un plus grand nombre, en particulier dans les transitoires. C'est la problématique de cet apprentissage que nous avons tenté de résumer dans un sous-titre quelque peu provoquant ! Nous avons approché la complexité de la réalité, qui subsiste malgré l'énorme simplification du modèle à seulement deux paramètres sans dimension. Reconnaissons à ce propos qu'il manque toutefois à ce dernier un élément essentiel : les signaux obtenus sont carrés, avec un spectre indépendant de l'amplitude, alors que l'enrichissement du spectre avec le niveau est une composante musicale perceptive fondamentale. Il faut pour le prendre en compte ajouter un paramètre caractéristique des pertes dans le résonateur et une modélisation soignée de l'excitateur.

Quel est le travail du **facteur** ? Il est de réaliser un instrument réalisant un compromis acceptable pour l'ensemble des notes que l'instrumentiste désire jouer, avec une plus ou moins grande tolérance sur la justesse, la facilité d'émission, les variations possibles d'amplitude ou de spectre... On imagine que si une esquisse de l'instrument peut être conçue grâce à une théorie, les raffinements finaux supposent nécessairement des tâtonnements, d'autant qu'entre autres choses, l'ergonomie ne doit pas être oubliée. En fait la théorie peut aider la conception tout au long d'un processus interactif.

Que peut faire **l'acousticien** ? Il a besoin de mesures reproductibles, et pour cela il peut construire des excitations artificielles. Il fixe ainsi un certain nombre de paramètres de jeu de l'instrumentiste. Mais cela lui permet d'effectuer des comparaisons expérience-théorie aussi poussées qu'il le souhaite (citons par exemple Verge et coll. pour la flûte [1995], Gilbert [1991], Gazengel [1994] pour les instruments à anche). Il peut raffiner les modèles, en prenant en compte la dynamique de l'anche, l'interaction jet-biseau pour la flûte, en choisissant des modèles différents pour le(s) régime(s) transitoire(s) et le régime permanent, en ajoutant des non-linéarités dans le résonateur... Il restera toujours contraint de tâtonner avec les paramètres de contrôle pour obtenir le régime qui l'intéresse et que son modèle lui a fourni, car contrôler précisément paramètres et conditions initiales est vraiment une tâche ardue.

Toutefois le tâtonnement peut être réduit si on isole les paramètres sans dimension pertinents, qu'on peut espérer assez indépendants des détails d'un modèle. Enfin l'acousticien peut limiter ses ambitions à l'étude des sons "normaux", dans le but d'aider la facture instrumentale, et pour ce faire un modèle global simplifié, du type de celui présenté ici mais avec quelques améliorations, lui sera extrêmement utile. Ses modèles peuvent être exploités jusqu'à la simulation, permettant une évaluation perceptive des résultats : ainsi on est aujourd'hui capable de simuler deux notes de même hauteur mais de doigté différent, avec une très bonne concordance de la perception de leur différence d'attaque et de spectre par rapport à l'expérience, avec une bouche artificielle ou avec un instrumentiste (Gazengel et coll. 1995). On est également capable de retrouver précisément les fréquences fondamentales de jeu, et donc d'aider le facteur dans la recherche de la justesse, en fonction des paramètres mesurables de l'excitateur et du résonateur.

Que peut faire le spécialiste de **synthèse par modèles physiques** ? Son travail s'apparente à celui du facteur : il peut aujourd'hui, grâce au travail de l'acousticien, obtenir des sons que notre oreille et notre cerveau jugent très réalistes. Il peut encore progresser, mais d'ores et déjà il dispose de sons suffisants pour faire de la musique... à condition de fournir à l'instrumentiste des paramètres contrôlables en temps réel : ceci peut se faire par "un transducteur gestuel", si possible rétroactif (cf. par exemple Cadoz [1990]), permettant au manipulateur à la fois de choisir les paramètres qui lui donnent le régime qu'il souhaite et de les faire légèrement varier pour s'exprimer musicalement. Mais il lui faudra un apprentissage, d'abord pour choisir correctement les paramètres fixés au départ, et ensuite pour éviter en cours de jeu les régimes non souhaitables, comme par exemple des régimes non oscillants ou non périodiques... Le choix des paramètres de départ peut être aidé par la programmation qui peut mettre des "garde-fous" reposant sur une analyse de stabilité pour ne pas sortir des régimes périodiques (cf. Rodet [1995]). On peut noter toutefois que ce sont les écarts aux régimes normaux qui produisent les effets jugés les plus réalistes, ainsi le canard de la clarinette de Ducasse, cité plus haut.

Il resterait enfin à discuter le travail du **psychoacousticien**, dans les domaines de la perception des sons d'auto-oscillations, et de leur utilisation dans l'interprétation musicale. Autant de continents qui restent à explorer !

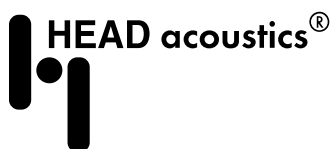
Comme on l'a vu, les voies de recherche ne manquent pas, elles seront d'ailleurs bien représentées lors de ce quatrième Congrès Français d'Acoustique. Je vous renvoie aussi aux actes de l'International Symposium on Musical Acoustics de Dourdan, en 1995, et notamment à l'article de synthèse de W. Lauterborn, ce qui lui permettra de compléter la bibliographie ci-dessous, qui est très insuffisante.

## Remerciements

L'auteur remercie particulièrement J.-P. Dalmont, B. Gazengel et J. Gilbert pour des discussions critiques très utiles.

## Références bibliographiques

- [1] Backus, J., Multiphonic tones in the woodwind instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 63, PP 591-599, 1978.
- [2] Bergé P., Pomeau Y., Vidal C., *L'ordre dans le chaos*, Hermann, Paris 1984.
- [3] Cadoz C., Simuler pour connaître, connaître pour simuler : réflexions sur la représentation, la modélisation et la création avec l'ordinateur, Actes du colloque "Modèles physiques, création musicale et ordinateur" PP 663-708, Ed. de la Maison des Sciences de l'homme, 1990.
- [4] Castellengo M., Sons multiphoniques aux instruments à vent, Rapports IRCAM 34/82, Centre Georges Pompidou, Paris 1982.
- [5] Dahan Dalmedico A., Chabert J.-L., Chemla K., *Chaos et déterminisme*, Seuil, Paris, 1992.
- [6] Dalmont J.-P., Gazengel B., Gilbert J., Kergomard J., Some aspects of tuning and clean intonation in woodwinds, *Applied Acoustics* 46 PP 19-60, 1995.
- [7] Dalmont J.-P., Kergomard J., Elementary model and experiments for the Helmholtz motion of single reed wind instruments, *International Symposium on Musical Acoustics*, Dourdan (France), PP 114-120, 1995.
- [8] Ducasse E., Modélisation d'instruments de musique pour la synthèse sonore : application aux instruments à vent, 1er Congrès français d'acoustique, Suppl. *J. Physique*, II C2 PP 837-840, 1990.
- [9] Gazengel, B., Caractérisation objective de la qualité de justesse, de timbre et d'émission des instruments à vents à anche simple, Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans 1994.
- [10] Gazengel B., Gilbert J., Amir N., *Acta Acustica* 3 PP 445-172, 1995.
- [11] Gibiat V., Phase space representations of musical acoustical signals, *J. Sound Vib.*, 123, PP 529-536, 1988.
- [12] Gibiat V. et Castellengo M., Period doubling scenarii, multiphonic productions and chaos in musical playing, en préparation, 1997.
- [13] Gilbert J., Kergomard J., Ngoya E., Calculation of the steady state oscillations of a clarinet using the harmonic balance technique, *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, PP 35-41, 1989.
- [14] Gilbert J., Etude des instruments de musique à anche simple : extension de la méthode d'équilibrage harmonique, rôle de l'inharmonicité des résonances, mesure des grandeurs d'entrée, Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, 1991.
- [15] Grand N., Gilbert J., Laloé F., Oscillations threshold in models of woodwind instruments, *Acta Acustica* 83 PP 137-151, 1997.
- [16] Hirschberg A., Aero-acoustics of wind instruments, in *Mechanics of musical instruments*, A. Hirschberg, J. Kergomard, G. Weinreich eds., Springer, 1996.
- [17] Hirschberg A., Gilbert J., Wijnands A.P.J., Valkering A.M.C., Musical aero-acoustics of the clarinet, 3ème Congrès français d'acoustique, Toulouse, Suppl. *J. Physique III* 4 C5 PP 559-568, 1994.
- [18] Ilogawa T., Kobata T., Komuro K., Iwaki M., Nonlinear vibrations in the air column of a clarinet artificially blown, *J. Acoust. Soc. Am.*, 93 PP 540-551, 1993.
- [19] Keefe D.H., Laden B., Correlation dimension of woodwind multiphonic tones, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90, PP 1754-1765, 1990.
- [20] Kergomard J., Elementary considerations on reed-instruments oscillations, in *Mechanics of musical instruments*, A. Hirschberg, J. Kergomard, G. Weinreich eds., Springer, 1996.
- [21] Laloé S., et Laloé F., La clarinette, in *Les instruments de l'orchestre*, PP 74-83, Belin, 1985.
- [22] Lauterborn W., Bifurcations and chaotic dynamics in acoustics, *International Symposium on Musical Acoustics*, Dourdan (France), PP 153-163, 1995.
- [23] McIntyre M.E., Schumacher R.T., Woodhouse J., On the oscillations of musical instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, 74, 1325-1345, 1983.
- [24] Maganza C., Caussé R., Laloé F., Bifurcations, period doubling and chaos in clarinet like systems, *Europhysics Letters*, 1, PP 295-302, 1986.
- [25] Manneville P., *Dissipative structures and weak turbulence*, Academic Press 1990.
- [26] Rodet X., Oscillation, chaos, and control of nonlinear dynamical models of musical instruments with sustained sound, *Proc. Int. Symp. on Nonlinear Theory and Applications*, NOLTA '96, Las Vegas, PP.367-370, 1995.
- [27] Nederveen C.J., *Acoustical aspects of woodwind instruments*, Fritz Knuf pub., Amsterdam 1969.
- [28] Riedelbauch H., *Systematik moderner Fagott- und Bassontechnik*, Moeck Verlag, 1988.
- [29] Rihs N., Gibiat V., Castellengo M., Period doubling production on a bassoon, *International Symposium on Musical Acoustics*, Dourdan (France), PP. 194-188, 1995.
- [30] Thompson, S.C., The effect of the reed resonance on woodwind tone production, *J. Acoust. Soc. Am.*, 66 PP 1299-1307, 1979.
- [31] Verge M.P., Fabre B., Maher WEA, Hirschberg A., Van Hassem RR., Wijnands APJ., de Vries JJ, Hogendoorn CJ, Jet formation and jet fluctuations in a flute organ pipe, *J. Acoust. Soc. Am.* 95, PP 1119-1132, 1995.
- Wilson T.A., Beavers G.S., Operating modes of the clarinet, *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, PP 653-658, 1974.



**HEAD acoustics GmbH est une société innovatrice qui offre des systèmes de mesure et d'analyse et du conseil dans les domaines suivants :**

- Enregistrement binaural par tête artificielle et reproduction binaurale audio-exacte
- Qualité et design acoustique des produits
- Télécommunication : mesure et analyse électroacoustique des terminaux et réseaux
- Réalité virtuelle et des simulateurs acoustiques de conduite
- Evaluation des gênes dues au bruit dans l'environnement et au poste de travail
- Protecteurs de l'ouïe, aides à l'audition
- Projets et programmes de recherche en collaboration avec l'industrie et les universités

**Depuis 1986 la technologie AACHENHEAD<sup>®</sup> est utilisée par des acousticiens dans le monde entier pour améliorer le son de leurs produits.**

*Rejoignez notre stand au cœur de l'espace Congrès.*