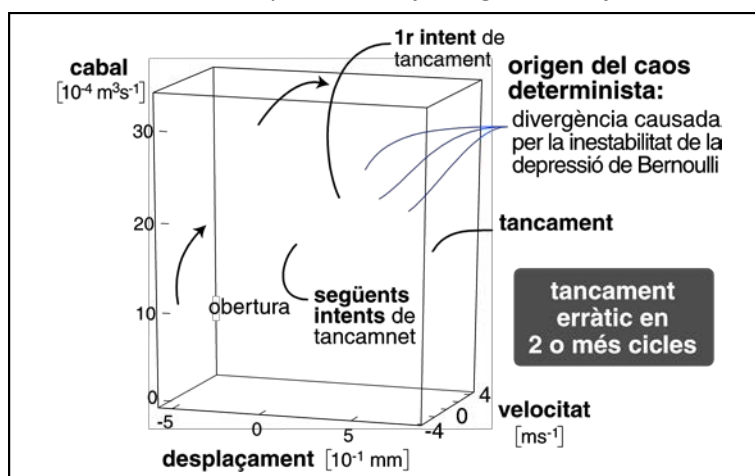


## 5. Component caòtic determinista en la *tenora*.

En el funcionament d'una canya de *tenora* és donen les circumstàncies precises per al caos determinista (Agulló, 1994). En bufar-hi, s'inicia un cabal d'entrada de velocitat creixent. En tractar-se d'un pas estret, s'hi crea una depressió de Bernoulli que tendeix a tancar-la. En ser flexible la canya, hi ha una velocitat crítica de l'aire entrant per damunt de la qual el procés es fa inestable: el progressiu tancament de la canya augmenta la velocitat, la qual cosa reforça la depressió i el tancament, i finalment es produeix un tancament violent de la canya que crea una breu i intensa depressió en el seu interior –que es propaga tub avall si el tudell es troba unit a l'instrument–. En haver-se tancat la canya, s'atura el cabal d'entrada, i sense cabal la canya passa a obrir-se i el procés recomença. Hi ha, doncs, una fase del moviment de tancament inestable acotada per una no linealitat –tancament final de la canya– que reconduïx novament l'evolució del moviment vers la fase inestable. Cada pas per la fase inestable presenta una elevada sensibilitat a les condicions inicials, cosa que dona caràcter impredecible a l'evolució del moviment de la canya si aquesta no està acoblada a l'instrument (figura 3.6). Aquest procés caòtic origina un so ronc, el *rogall*, emprat per comprovar l'adequació de les canyes de *tenora* per a emetre les notes greus. Si la canya està acoblada a l'instrument, les reflexions que li arriben actuen de marcapassos i regularitzen la periodicitat de la vibració (figura 3.7).

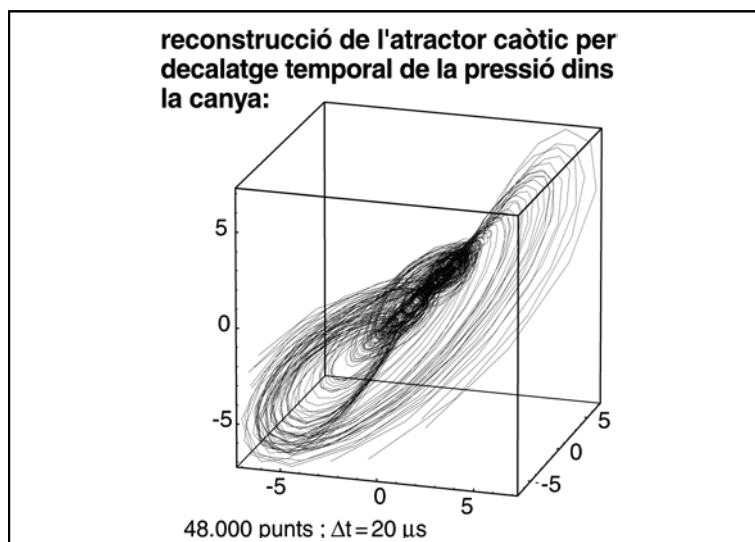
La figura 5.1 mostra una simulació dinàmica de l'evolució de les tres variables de l'espai de fases implicat: desplaçament i velocitat de la canya, i cabal entrant. S'observa com després d'una obertura i ràpid creixement del cabal, la depressió de Bernoulli ocasiona un primer intent no reeixit de tancament seguit d'una nova obertura i creixement de cabal. La sensibilitat a les condicions inicials degudes a les fases progressivament més inestables de tancament es posa de manifest pel conjunt de trajectòries properes. En conseqüència, el tancament es produeix erràticament en dos o més cicles d'oscil·lació de la canya.

La corba d'evolució, tot i trobar-se en un domini finit de l'espai de fases, difereix d'un cicle límit i constitueix un *atractor caòtic*, que és un objecte geomètric *fractal*.



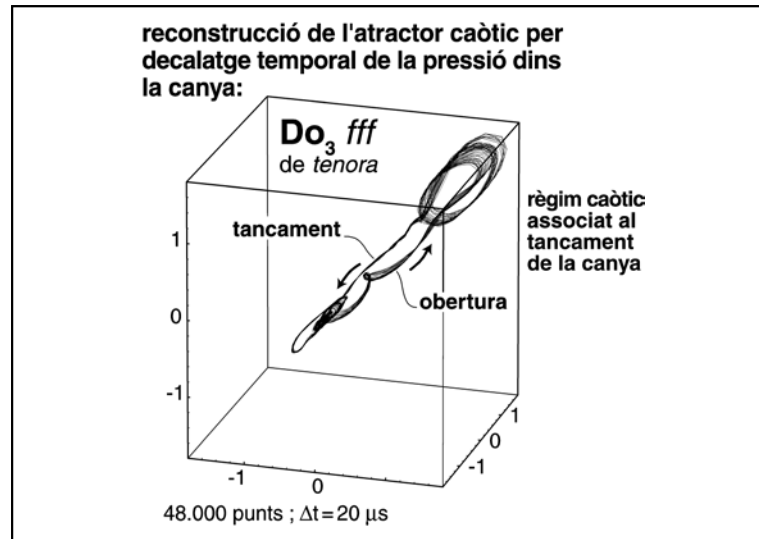
**Figura 5.1** Simulació de l'atractor caòtic del *rogall de canya de tenora*.

La determinació experimental directa d'aquest atractor caòtic és poc factible, però en l'àmbit de la dinàmica caòtica hi ha la possibilitat de la reconstrucció per decalatge temporal d'una única variable. I la pressió dins la canya és la variable de mesura més fàcil. La pressió, com la mostrada en el *rogall* de la figura 3.6, constitueix una de les variables de l'espai de fases reconstruït, i les altres dues corresponen a la pressió amb un i amb dos decalatges temporals, respectivament (figura 5.2). Tot i que l'aspecte de l'atractor reconstruït difereixi del que correspondria a l'espai de fases considerat a la figura 5.1, la seva dimensió fractal és la mateixa. Només cal triar adequadament els decalatges per tal que l'atractor obtingut ofereixi una visualització clara del caràcter fractal i, si és el cas, possibiliti una mesura precisa de la *dimensió fractal*.



**Figura 5.2** Reconstrucció, per decalatge temporal, de l'atractor caòtic del *rogall* a partir de la pressió dins de la canya.

L'aplicació d'aquesta tècnica de reconstrucció de l'atractor en l'espai de fases per mitjà del decalatge temporal de la pressió mesurada dins la canya quan aquesta està unida a l'instrument, com la mostrada en el règim permanent de la figura 3.7 per a un  $\text{Sol}_2$  de *tenora*, porta a un atractor proper a un cicle límit per bé que amb un cert caràcter caòtic associat a la inestabilitat que clou la canya, no del tot extingit per l'arribada de les reflexions que regularitzen la periodicitat de la vibració, com és el cas de l'atractor reconstruït mostrat a la figura 5.3.



**Figura 5.3** Reconstrucció, per decalatge temporal, de l'atractor caòtic del  $\text{Do}_3 \text{ fff}$  de la *tenora* a partir de la pressió dins de la canya.

Aquest caràcter caòtic directament associat a la depressió de Bernoulli dins la canya, que és consubstancial al funcionament de les xeremies, no és l'única manifestació caòtica que es pot presentar en aquests instruments. Com ja es va esmentar en l'apartat 2.3 "*Instruments basats en el règim vibratori autoexcitat*", si bé en el funcionament normal d'aquests instruments un mode de ressonància controla el ritme del procés d'autoexcitació, en determinades circumstàncies pot haver-hi dos modes que pugnin per a aquest control que passa a fluctuar entre els dos. Això dona lloc a un so ronc, anomenat *multifònic*, sovint considerat com a defectuós. El caràcter no lineal del procés d'autoexcitació pot fer que aquest comportament estigui lligat al volum amb el qual es produeixi el so.

Aquest modalitat de comportament caòtic es va presentar en el primer prototip de *tenora* construït en el marc del programa de recerca de l'IEC per a la millora d'aquest instrument (Barjau *et al*, 2007). Les tres notes més greus passaven a roncar quan s'incrementava el seu volum.

A la figura 5.4 es mostra la forma d'ona de la nota més greu en règim normal i en règim *multifònic*. S'observa que la forma d'ona passa a fluctuar de manera erràtica.

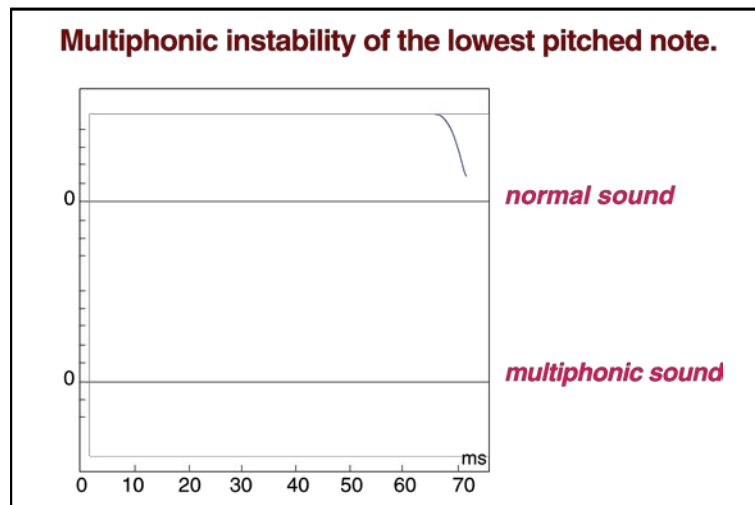


Figura 5.4 Inestabilitat *multifònica* de la nota més greu de la *tenora*.

L'anàlisi freqüencial del so emès amb pressió de bufada creixent posa de manifest (figura 5.5) que a partir d'un cert instant el so fins aleshores normal, passa per un període caòtic amb un fonamental –de freqüència fluctuant– de freqüència  $1/6$  de la que correspondria al fonamental de la nota. En incrementar-se més la pressió de bufada, la forma d'ona tendeix a estabilitzar-se amb un període aproximadament  $1/5$  del de la nota.

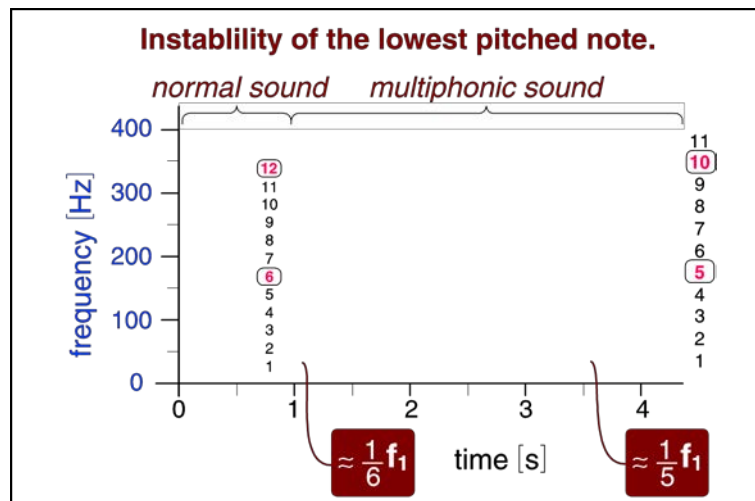
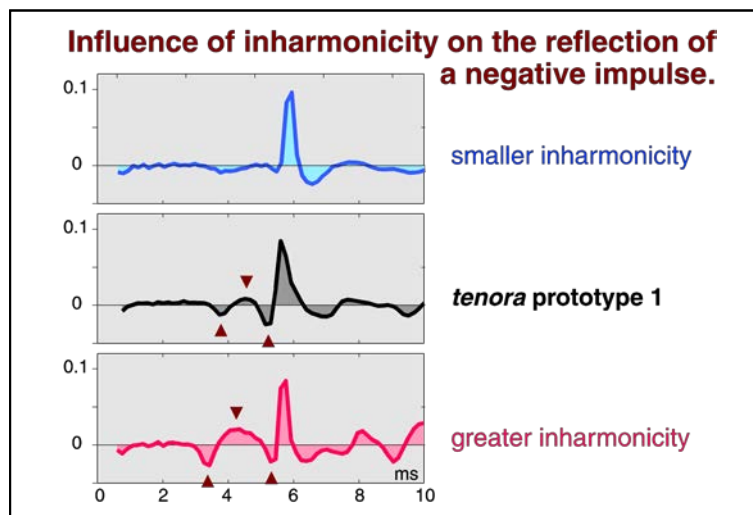


figura 5.5 Anàlisi espectral de la inestabilitat *multifònica* de la nota més greu de la *tenora*.

Analitzades les possibles causes, es va fer evident que aquest comportament estava associat a la inharmonicitat de les tres primeres freqüències de ressonància de la columna d'aire. Com que la columna d'aire de les notes més greus –amb tots els forats tapats o amb forats oberts al pavelló– només s'empra en aquestes notes del primer registre (a partir d'una certa nota del primer registre, els forats es fan servir també per al segon i el tercer registre, i això condiciona la freqüència de les tres primeres ressonàncies), en el càlcul del prototip el perfil del pavelló només s'havia condicionat de manera estricta la freqüència de la primera ressonància.

Aquest fenomen admet una interpretació freqüencial: en incrementar-se el volum de so i fer-se més violentes les tancades de la doble canya, s'incrementa la presència d'harmònics –el so es fa més estrident– i aquest harmònics originen un ris (figura 5.4) que pot fer aparèixer un màxim previ i proper al de la forma d'ona del so normal. Aquest nou màxim pot desencadenar el tancament de la canya abans d'hora de manera imprevisible, i conduir a un comportament caòtic. La forma de la resposta impulsional també es veu afectada per la inharmonicitat (figura 5.6). Per a inharmonicitat feble, la resposta a un impuls negatiu presenta com a primera reflexió rellevant un clar impuls positiu. Amb inharmonicitat creixent, aquest pic va precedit d'altres pics de reflexió –positius i negatius– que, tot i ser d'alçària menor, poden pertorbar el desencadenament del procés de tancament de la canya.



**Figura 5.6** Influència de la inharmonicitat, de les tres primeres freqüències pròpies de la *tenora*, en la reflexió d'un impuls negatiu.