

Tommaso Bolognesi <sup>(0)</sup>

COMPOSIZIONE MUSICALE ASSISTITA DA ELABORATORE

Automatismi, processi stocastici ed interazione uomo-macchina

Riassunto. - Il fattore "caso" riveste un ruolo importante nella musica contemporanea e trova nella computer music un fertile campo di applicazione. Vengono illustrate alcune esperienze di composizione musicale mediante computer, con particolare riferimento a tecniche compositive non-deterministiche basate sulla simulazione e l'impiego di sorgenti di numeri casuali, catene di Markov e di grammatiche.

---

(<sup>0</sup>) CNUCE - C.N.R. - Reparto Musicologia - Via S. Maria 36

56100 Pisa - Tel. (050) 45245

1. Musica e caso: esperienze precedenti all'impiego del computer.

L'"Arca musarithmica" (fig.1), descritta in un testo del 1660, è forse il più antico dispositivo meccanico per la composizione di musica casuale. Essa consisteva in una scatola di legno con una fila di paletti sui quali erano marcati i suoni della gamma diatonica e indicazioni per la battuta e il ritmo. Per comporre musica a quattro voci bastava combinare casualmente i paletti in uno degli innumerevoli modi possibili<sup>(1)</sup>.

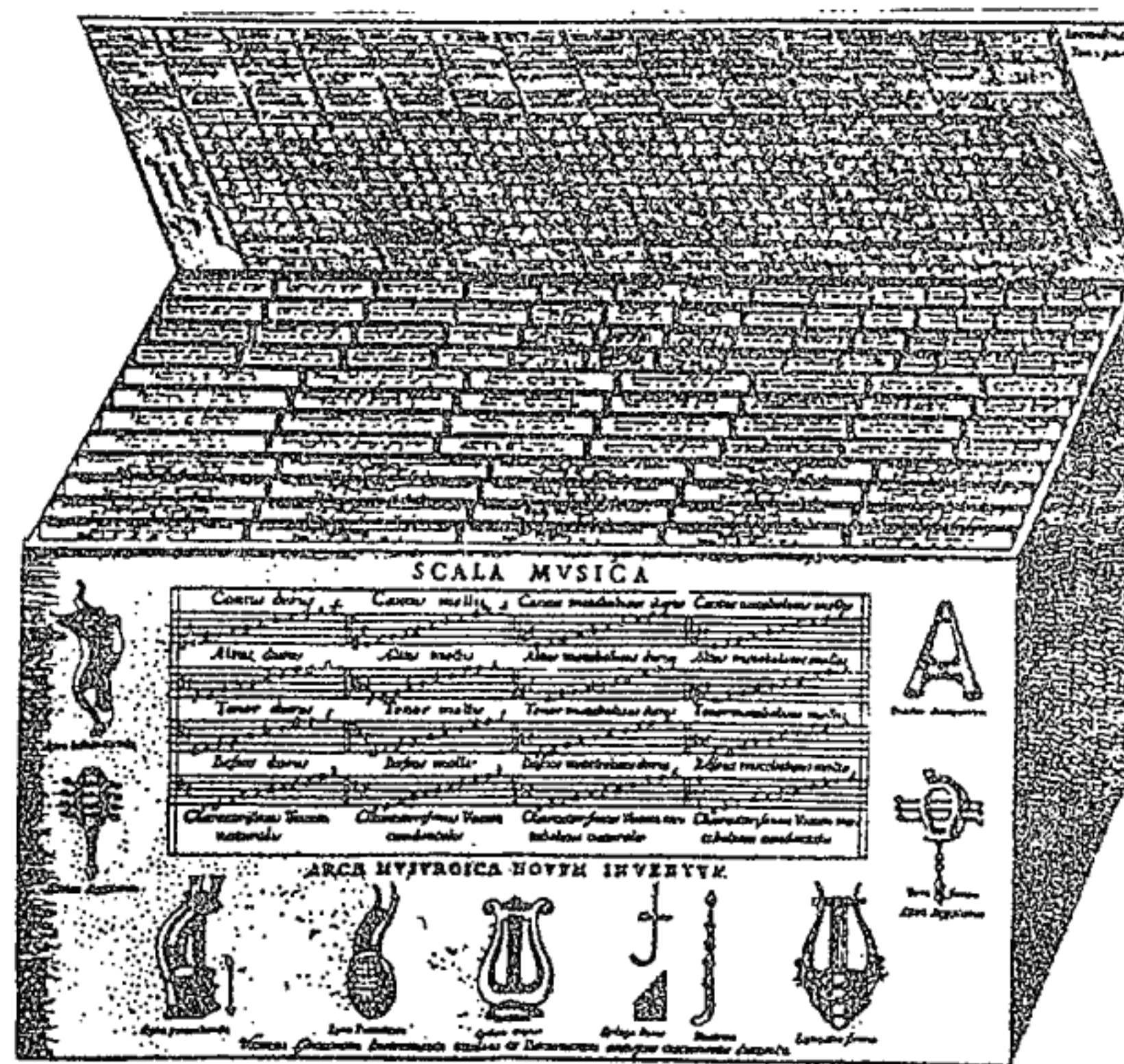


Fig. 1 - L'Arca Musarithmica

Nella seconda metà del '700 vennero pubblicati in diverse città europee manuali di composizione musicale basati sull'impiego dei dadi. Tali pubblicazioni erano legate ai nomi di musicisti anche famosi, come Mozart, Carl Philipp Emanuel Bach, Haydn. Quest'ultimo, ad esempio, scrisse "Il gioco filarmonico; facile metodo per comporre un infinito numero di minuetti e trii anche senza conoscere il contrappunto".

Tutti questi metodi erano basati sullo stesso principio, quello di scegliere e porre in sequenza, con il lancio dei dadi, un certo numero di battute fra quelle "prefabbricate" e organizzate in tabelle dall'autore del manuale.

L'importanza assunta dal fattore caso nella musica contemporanea può essere osservata da più punti di vista e spiegata in più modi. Molto in generale il fenomeno appare come lo stadio finale estremo del processo di progressivo rigetto delle restrizioni imposte dalle regole musicali tradizionali (si pensi ad esempio al progressivo abbandono del concetto di tonali-



tà). Una delle posizioni più estreme, in questo senso, è quella del compositore John Cage, la cui intenzione è di creare una musica indipendente dal gusto personale e dalla tradizione artistica. Una fonte di casualità utilizzata da Cage è data, ad esempio, dalle leggere irregolarità dei fogli di carta, che il compositore pone in evidenza grafica per poi codificare in notazione musicale.

Il fatto poi che alcune partiture contemporanee prevedano un comportamento aleatorio da parte dell'esecutore può essere posto in relazione, per contrasto, con l'eccessiva rigidità e complessità di certe partiture ai limiti dell'eseguibilità; in questo senso il compositore, rinunciando alla dettagliata specificazione di alcuni parametri, cioè lasciandoli al caso, restituisce libertà all'esecutore.

Infine il non-determinismo, in forma di distribuzione probabilistica, diventa lo strumento formale più adeguato alla generazione e al trattamento di grandi masse di eventi sonori.

Così Iannis Xenakis<sup>(2)</sup>, padre della "musica stocastica", introduce nella sua pratica compositiva la densità di probabilità:

$$P(x) = ce^{-cx}$$

(degli intervalli di Poisson) per calcolare durate delle note o distanze fra gli attacchi di note successive, o la densità:

$$G(v) = \frac{2}{a\sqrt{\pi}} e^{-v^2/a^2}$$

(Gaussiana) per calcolare la velocità dei glissando degli strumenti ad arco nel brano "Pithoprakta" (1955/56), del quale sono riportate alcune battute in fig. 2.

Naturalmente l'esigenza dei musicisti di maneggiare il caso e di utilizzare la teoria delle probabilità poteva iniziare a trovare nei primi computers un valido strumento di ausilio alla composizione. Tuttavia un impulso ancora maggiore all'impiego compositivo degli elaboratori venne dato dalla diffusione della teoria dell'informazione di Shannon e Weaver, e dalla curiosità, da parte di ricercatori di formazione prevalentemente scientifica, di applicare la nuova teoria alla linguistica ed alla musica, in senso analitico ed in senso generativo.



W B

V I

V II

A

B

pizz. gliss. fff

pizz. gliss. fff

pizz. gliss. fff

pizz. gliss. fff

pizz. gliss. mf

55

55

B A H 19583

Gif. 2 - Alcune battute di "Pithoprakta" di I. Xenakis



## 2. Il continuo ordine-caos ed il concetto di entropia in relazione alla composizione musicale.

Ogni oggetto che susciti un certo interesse, in senso estetico, in chi lo osserva, può essere collocato idealmente in qualche zona intermedia del continuo che collega i due estremi opposti dell'ordine e del caos. Qualsiasi quadro è meno ordinato di una scacchiera ma più ordinato di un metro quadrato di ghiaia.

Herbert Brun <sup>(3)</sup>: "... La musica è il risultato di un continuo tentativo di ridurre all'ordine il caos del sistema degli elementi e degli eventi acustici...".

Sorge il problema di esprimere numericamente, cioè di misurare, la proporzione di ordine e di caos presente nelle strutture di una data classe. A livello di percezione sonora, al momento dell'ascolto di un dato brano musicale, i concetti di ordine e di caos si identificano rispettivamente con i concetti di prevedibilità e non-prevedibilità: consideriamo ordinato un brano del quale siamo in grado di prevedere gli sviluppi e disordinato un brano dagli sviluppi costantemente imprevedibili. Prevedere gli sviluppi, poi, significa poter assegnare a priori ad un solo evento una alta probabilità di succedere all'evento percepito al presente; una situazione comporta invece imprevedibilità quando tutti gli sviluppi sono ugualmente probabili.

E' chiaro allora come la teoria dell'informazione (che si basa sulla teoria delle probabilità) e il suo concetto fondamentale di entropia, che rappresenta una misura di disordine, o di non prevedibilità, abbiano avuto un ruolo importante nelle ricerche sulla struttura musicale.

Nel 1958 J.E.Youngblood <sup>(4)</sup> misura l'entropia di tre gruppi di melodie, di Schubert, Mendelsohn e Schumann (tabella 1) sulla base delle frequenze di occorrenza dei gradi della scala cromatica (dalle quali si ricavano le probabilità dei gradi stessi).

L'entropia  $H$  di una sorgente senza memoria che emette i simboli di un alfabeto  $\alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  con assegnate probabilità  $p(a_i) = p_i$  è definita come

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

Essa rappresenta l'informazione media per simbolo emesso (essendo  $I(a_i) = - \log_2 p(a_i)$  l'informazione associata al generico simbolo  $a_i$ ).

L'entropia relativa  $H_r$  è il rapporto fra l'entropia effettiva e l'entropia massima che la sorgente può esprimere (a simboli equiprobabili):

$$H_r = H / \log_2 n$$

La ridondanza  $R$  è definita come:  $R = 1 - H_r$ .

Tones	Schubert	Mendelssohn	Schumann
I	182	103	215
II	7	4	16
III	168	84	148
IV	23	6	13
V	124	84	144
VI	83	52	66
VII	16	7	22
VIII	203	104	208
IX	30	7	5
X	78	68	118
XI	29	8	23
XII	$\frac{82}{1025}$	$\frac{50}{577}$	$\frac{88}{1066}$
	H = 3.127 H <sub>r</sub> = 0.87 R = 13%	H = 3.03 H <sub>r</sub> = 0.846 R = 15.4%	H = 3.05 H <sub>r</sub> = 0.85 R = 15%

Tabella 1 - Misure di entropia in melodie di Schubert, Mendelssohn e Schumann.

Se oltre alle probabilità assolute  $p(a_i)$  dei simboli sono note le probabilità di transizione  $p(a_i|a_j)$ , cioè le probabilità che dopo l'emissione di  $a_j$  (contesto) la sorgente emetta  $a_i$ , l'entropia (condizionale) è data da

$$H_c = - \sum_{i,j=1}^n p(a_j a_i) \log_2 p(a_i | a_j)$$

Essa esprime l'informazione media per simbolo emesso, noto il simbolo emesso in precedenza.

Misurare l'entropia di una lingua, o di un insieme di melodie, significa analizzare statisticamente il corpus in esame, ricavare le probabilità assolute o condizionali (a contesto di data lunghezza) di emissione dei simboli, assumere come modello generativo della lingua o delle melodie una sorgente  $S$  che incorpori i valori di probabilità ricavati, e misurare l'entropia di  $S$ . È naturale che dopo essere giunti, attraverso l'analisi, alla costruzione della sorgente stocastica  $S$  (induzione), sorga l'idea di applicare lo stesso modello in senso generativo per sintetizzare sequenze di elementi dell'alfabeto omogenee a quelle del corpus analizzato (deduzione).



### 3. Composizione musicale mediante catene di Markov e prime esperienze con il computer.

Una catena di Markov è una sequenza di simboli di un dato alfabeto (finito) emessa da una sorgente per la quale le probabilità di emissione dei simboli sono condizionate dalla emissione precedente (ma ci si può ricondurre a catene di Markov anche quando le probabilità dipendono da un prefissato numero  $k > 1$  di simboli emessi in precedenza).

Quasi tutte le prime esperienze di composizione con il computer si basano sulla analisi statistica di un corpus di melodie e sulla sintesi di catene di Markov. Prima ancora di impiegare gli elaboratori, Pinkerton<sup>(5)</sup> analizzò statisticamente 39 canzoncine per l'infanzia e ne rigenerò di nuove col metodo probabilistico, ed Olson e Belar<sup>(6)</sup> costruirono un sintetizzatore che incorporava la statistica di 11 canzoni di Stephen Foster, e componeva e suonava canzoni nello stile del compositore americano.

Uno dei primi esperimenti di composizione markoviana con il computer è quello di Brooks, Hopkins, Newmann e Wright<sup>(7)</sup>. Essi analizzano un campione di 37 semplici inni, tutti in tempo 4/4 e senza note di durata inferiore all'ottavo ( $\frac{1}{8}$ ). Tutti gli inni vengono trasposti nella tonalità di D0, e segmentati in 64 celle della durata di un ottavo ciascuna. Ogni cella viene codificata con il nome della nota o porzione di nota che contiene, specificando se si tratta di nota 'struck' (colpita, iniziata in quella cella), o 'held' (tenuta, continuata dalla cella precedente). Ogni inno diventa così una sequenza di 64 simboli. L'analisi statistica viene estesa fino all'ottavo ordine, cioè fino alle sequenze di 8 simboli, o otto-grammi, ciò che consente, in fase di sintesi, di emettere i simboli sulla base delle 7 emissioni precedenti, essendo

$$p(a_i | p_j^7) = \frac{p(b_j^7 a_i)}{p(b_j^7)}$$

( $b_j^7$  è il generico epta-gramma,  $b_j^7 a_i$  indica la giustapposizione di  $b_j^7$  ed  $a_i$ ) ed essendo la statistica degli epta-grammi implicita in quella degli otto-grammi.

Il processo di sintesi viene anche sottoposto a vincoli di natura ritmica. Fig. 3 mostra alcuni inni artificiali ricavati con diversi valori crescenti dell'ordine  $m$  dell'analisi statistica.





Per riprendere il discorso sul continuo ordine-caos in relazione a questo esperimento si può concludere che si ottengono composizioni soddisfacenti quando la sorgente markoviana ha un comportamento intermedio fra quello eccessivamente preordinato e vincolante dell'analisi-sintesi di ordine troppo alto e quello eccessivamente incontrollato, o caotico, dell'analisi-sintesi di ordine basso.

Il modello compositivo markoviano presenta naturalmente delle limitazioni. La più evidente è quella di non poter controllare le macrostrutture della composizione, per ottenere ad esempio una strutturazione gerarchica: le catene di Markov infatti rendono conto soltanto dalle interazioni a corto raggio fra gli eventi sonori.

#### 4. L'uso combinato di sorgenti di numeri casuali e di grammatiche.

Il principio compositivo markoviano consiste nel limitare la casualità delle sequenze generate dalla sorgente stocastica (dunque, nel diminuirne l'entropia) imponendo restrizioni di natura probabilistica (le probabilità condizionali). Un altro metodo di riduzione del caos consiste nel sottoporre il processo di generazione di eventi casuali a restrizioni di natura deterministica, cioè nel confrontare (ed eventualmente scartare) gli eventi via via generati casualmente, con insiemi di regole, o grammatiche.

Uno dei più famosi esperimenti di composizione mediante computer, la 'Illiac Suite for String Quartet' di Hiller e Isaacson (8) (9), del 1957, è appunto basato sulla implementazione e sul progressivo impiego di 14 regole dello 'stretto contrappunto di prima specie' (16° secolo). Aumentando le restrizioni, cioè il numero di regole impiegate, aumenta la correttezza formale della musica generata dall'elaboratore, ma aumenta anche il numero di tentativi falliti: succede infatti che la macchina, durante il processo compositivo, si possa trovare in un vicolo cieco, cioè non riesca a generare un nuovo evento sonoro, anche iterando i tentativi, senza violare qualche regola. In questo caso la composizione, incompleta, viene scartata ed il processo riparte da capo.

Un interessante metodo per ovviare a questo inconveniente è stato da S. Gill (10). I brani, a tre voci e in stile dodecafonico, vengono ottenuti con un generatore di eventi casuali e una grammatica: parte delle regole vengono incorporate nel generatore, e la parte rimanente viene impiegata per valutare le note via via generate in relazione alla parte già composta.

Ad ogni passo il programma conserva otto composizioni parziali e concorrenti, non necessariamente della stessa lunghezza.

L'algoritmo di composizione è presto riassunto:

- una delle otto sequenze parziali presenti in memoria viene scelta a caso e prolungata della durata di una cromata (p) con la subroutine di generazione;

- la sequenza risultante viene valutata e confrontata con le altre otto sequenze in memoria (viene infatti conservata anche la sequenza scelta, nella sua forma non ancora estesa);
- la sequenza valutata peggiore fra le nove viene scartata ed il processo viene ripetuto con le otto rimaste.

Fig. 4 mostra i primi 100 passi nello sviluppo di una composizione. In ogni fase del processo di crescita dell'albero solo otto nodi sono correnti.

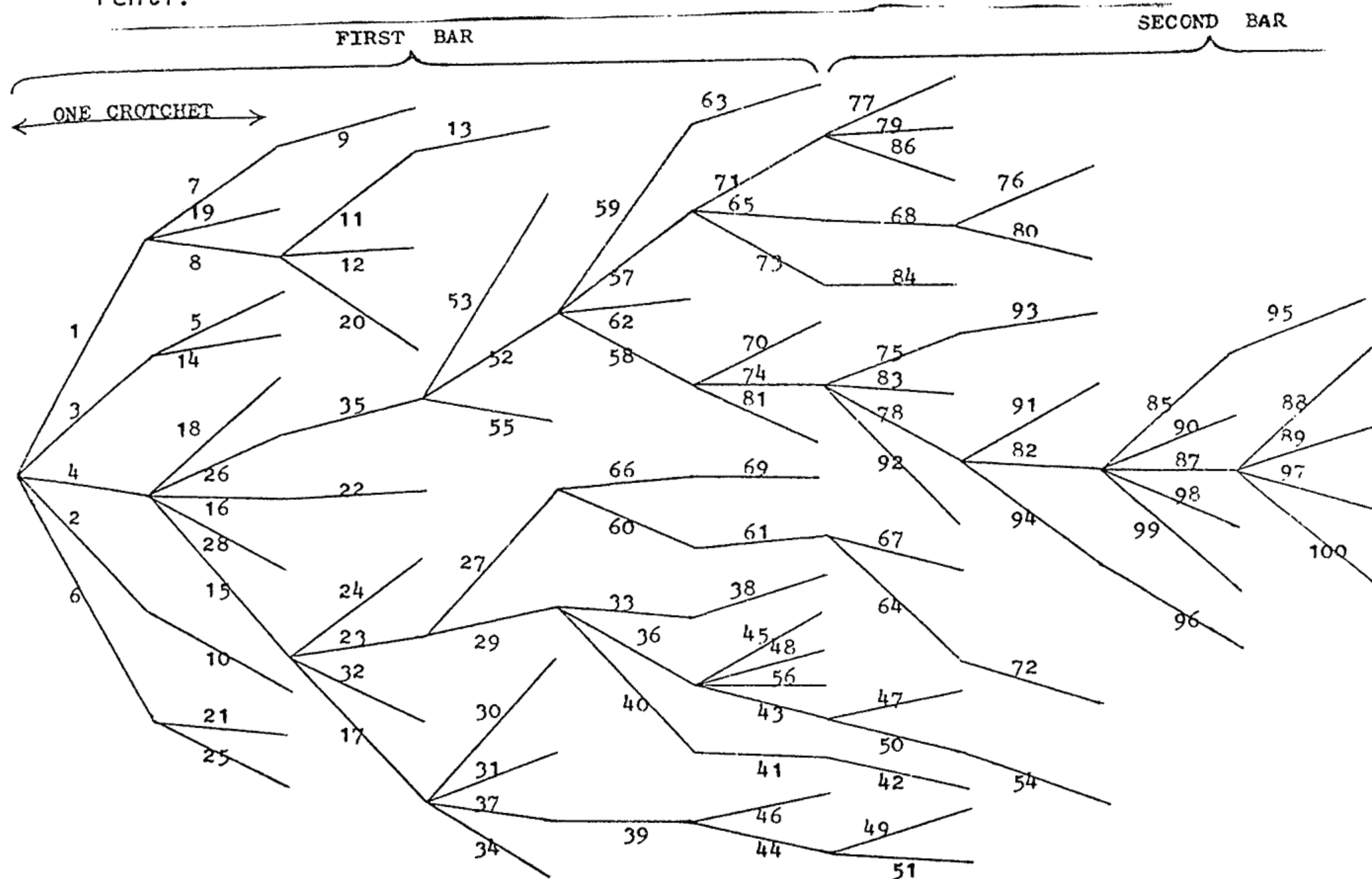


Fig. 4 - La ramificazione degli sviluppi di una composizione nell'esperienza di Gill

Un'altra esperienza di composizione automatica di melodie mediante grammatica (generativa di Chomsky) e generatore di scelte casuali è dovuta a Lidov e Gabura (11).

Il tentativo di estendere l'automazione alla sintesi digitale del suono (in tempo reale) è stato affrontato, fra gli altri, da S.R.Holtzman (12). Il 'Generatore di programmi' impiegato in quest'esperienza, è un programma che genera automaticamente brevi programmi, chiamati 'Funzioni'; a loro volta le Funzioni, eseguite ciclicamente, generano sequenze di campioni del



segnale audio.

### 5. Simulazione di distribuzioni probabilistiche.

Molte esperienze di composizione musicale non deterministica mediante elaboratore elettronico fanno uso di subroutines di generazione di numeri pseudo-casuali. La subroutine Fortran RANDU, ad esempio, genera ad ogni sua chiamata un numero reale YFL a densità uniforme nell'intervallo (0,1) e un numero intero IY random fra 0 e  $2^{31}-1$  (fig. 5).

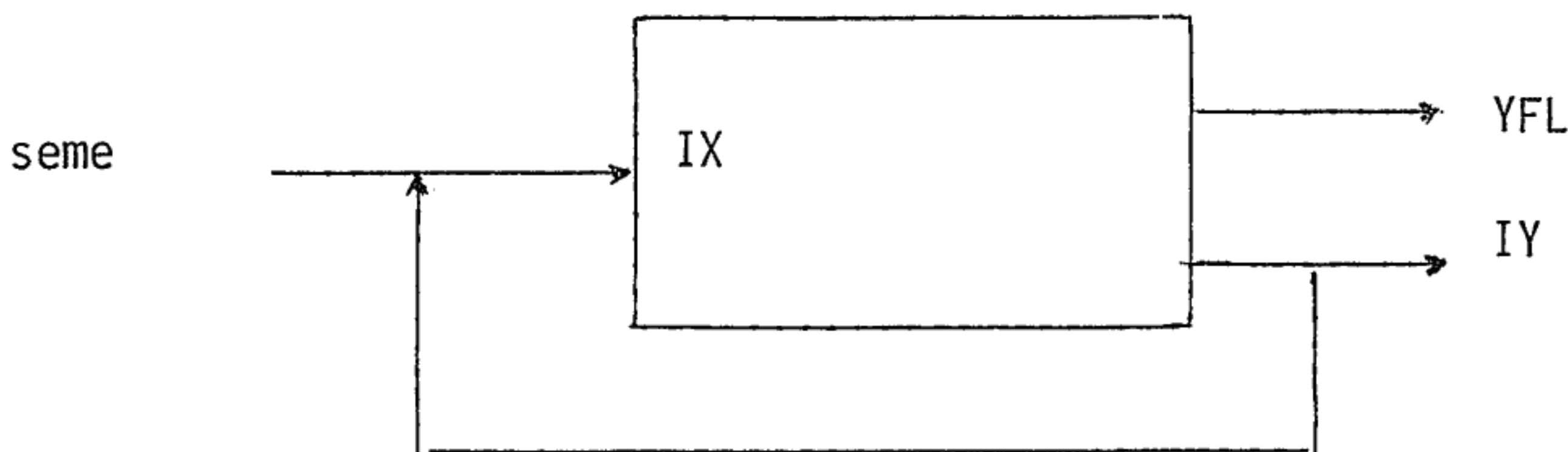


Fig. 5 - Ingressi e uscite della subroutine RANDU

Il processo di generazione dei numeri pseudo-casuali viene inizializzato con un primo valore (seme) assegnato a IX. In seguito come input IX alla subroutine viene impiegato lo stesso output, IY.

Questa stessa subroutine può venire impiegata per simulare distribuzioni probabilistiche più complesse di quella a densità uniforme. Per ottenere una variabile aleatoria a densità gaussiana, ad esempio, è sufficiente sommare un certo numero di volte una variabile aleatoria a densità uniforme in (0,1), come YFL, (sfruttando il teorema del limite centrale), e scalare opportunamente il risultato.

Per ottenere variabili aleatorie di altro tipo, sempre a partire da YFL, si può sfruttare il seguente risultato: se  $F_y(y)$  è una funzione monotona crescente (con  $0 \leq F_y(y) \leq 1$ ) ed  $x$  è una variabile aleatoria a densità uniforme in (0,1), come YFL (fig. 6), la variabile aleatoria  $y \equiv y(x) = F_y^{-1}(x)$  ammette, come funzione di distribuzione proprio la  $F_y(y)$ .

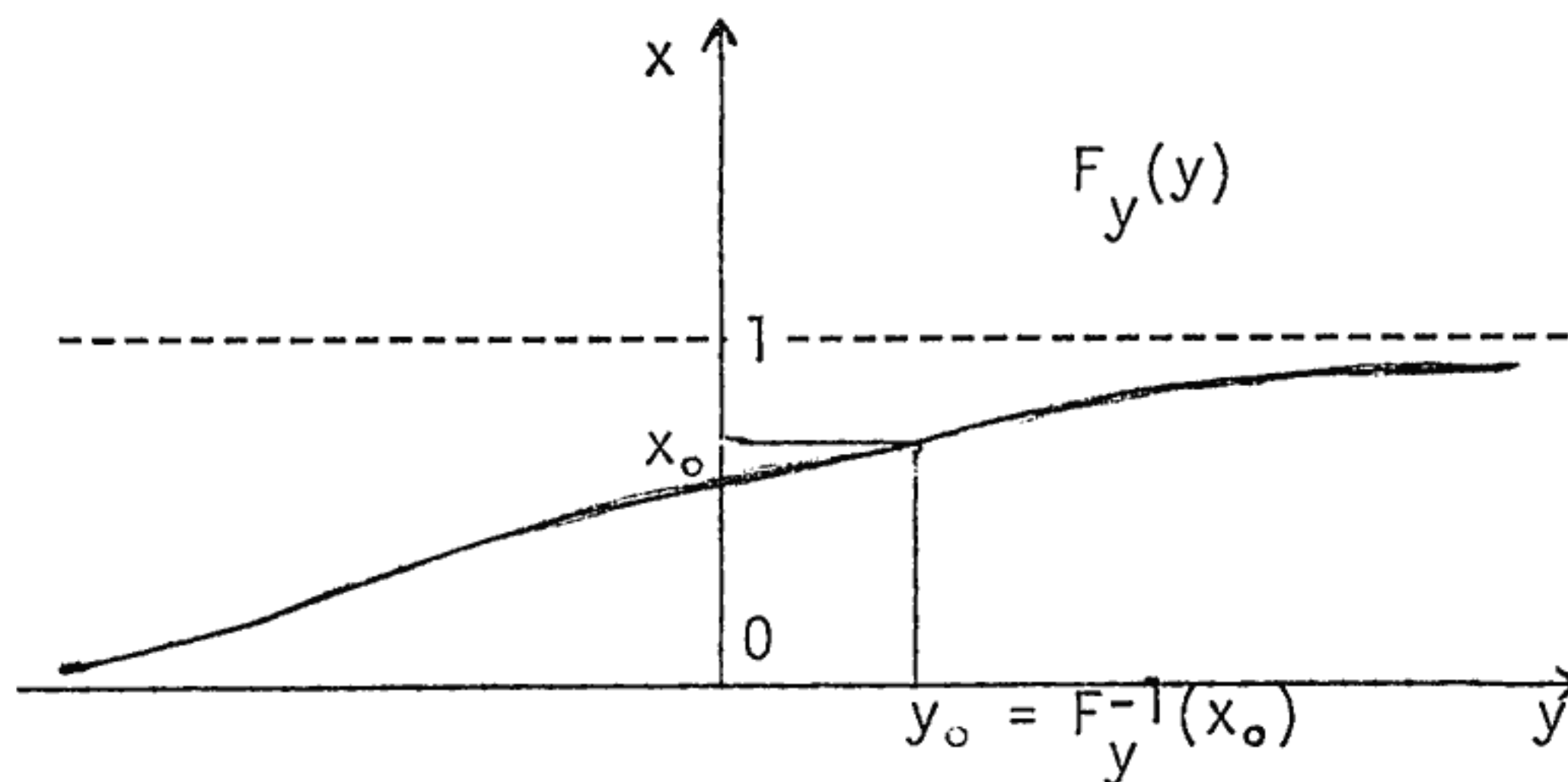


Fig. 6 - Generazione di una variabile aleatoria  $y$  di data distribuzione a partire dalla variabile aleatoria  $x$ , uniforme in  $(0,1)$

Si consideri ad esempio la distribuzione di Poisson di punti sull'asse reale, in base alla quale la probabilità di trovare  $k$  punti in un prefissato intervallo  $\overline{AB}$  di ampiezza  $T$  è:

$$\text{Prob}\{k \text{ punti in } \overline{AB}\} = e^{-\lambda T} \cdot \frac{(\lambda T)^k}{k!}$$

(essendo  $\lambda$  la densità di punti sulla retta). Si dimostra che la distanza  $y$  fra due punti successivi è una variabile aleatoria a densità di probabilità

$$f_y(y) = \lambda e^{-\lambda y} \quad (y \geq 0)$$

(cioè a distribuzione  $F_y(y) = 1 - e^{-\lambda y}$ ) e che viceversa una variabile aleatoria di tale densità può essere utilizzata per costruire (per salti successivi) una distribuzione di punti di Poisson.

Ebbene, per ottenere una siffatta variabile aleatoria  $y$  a partire da  $x$  uniforme in  $(0,1)$ , basta porre

$$y(x) = F_y^{-1}(x) = - \frac{\ln(1-x)}{\lambda}$$

La distribuzione di Poisson riveste un ruolo molto importante nelle esperienze di composizione musicale stocastica, per il suo carattere di "non-causalità". si può dimostrare infatti che in una successione temporale



di punti di Poisson, il numero di punti in un intervallo di tempo non influenza in alcun modo il numero di punti in qualsiasi intervallo successivo (purché gli intervalli siano disgiunti).

La distribuzione di Poisson è stata impiegata, fra gli altri, da I. Xenakis (2), da J. Myhill (13) ed è alla base del programma di composizione non deterministica POD, di B. Truax.

## 6. POD e PILE - un programma e un linguaggio di composizione non deterministica.

Alcune delle recenti ricerche sulla composizione musicale non deterministica tendono a creare programmi, o linguaggi, che offrano ai musicisti strumenti per risolvere di volta in volta i propri problemi compositivi.

Il POD, di Barry Truax (14), è un programma per la sintesi di strutture musicali monofoniche (in tempo reale) e polifoniche (in tempo differito), implementato su diversi mini-sistemi (PDP-15, PDP-11, HP-2116, NOVA-3) in Europa ed in America.

Il principio fondamentale del programma è quello per cui l'utente specifica soltanto i parametri macrostrutturali del brano (come la densità degli eventi sonori) lasciando ad un algoritmo di distribuzione (di Poisson) la collocazione dei singoli eventi sonori nello spazio tempo/frequenza/intensità. I vincoli imposti dall'utente sono ad esempio espressi in forma di 'maschera' (fig. 7), cioè regioni del piano frequenza/tempo all'interno delle

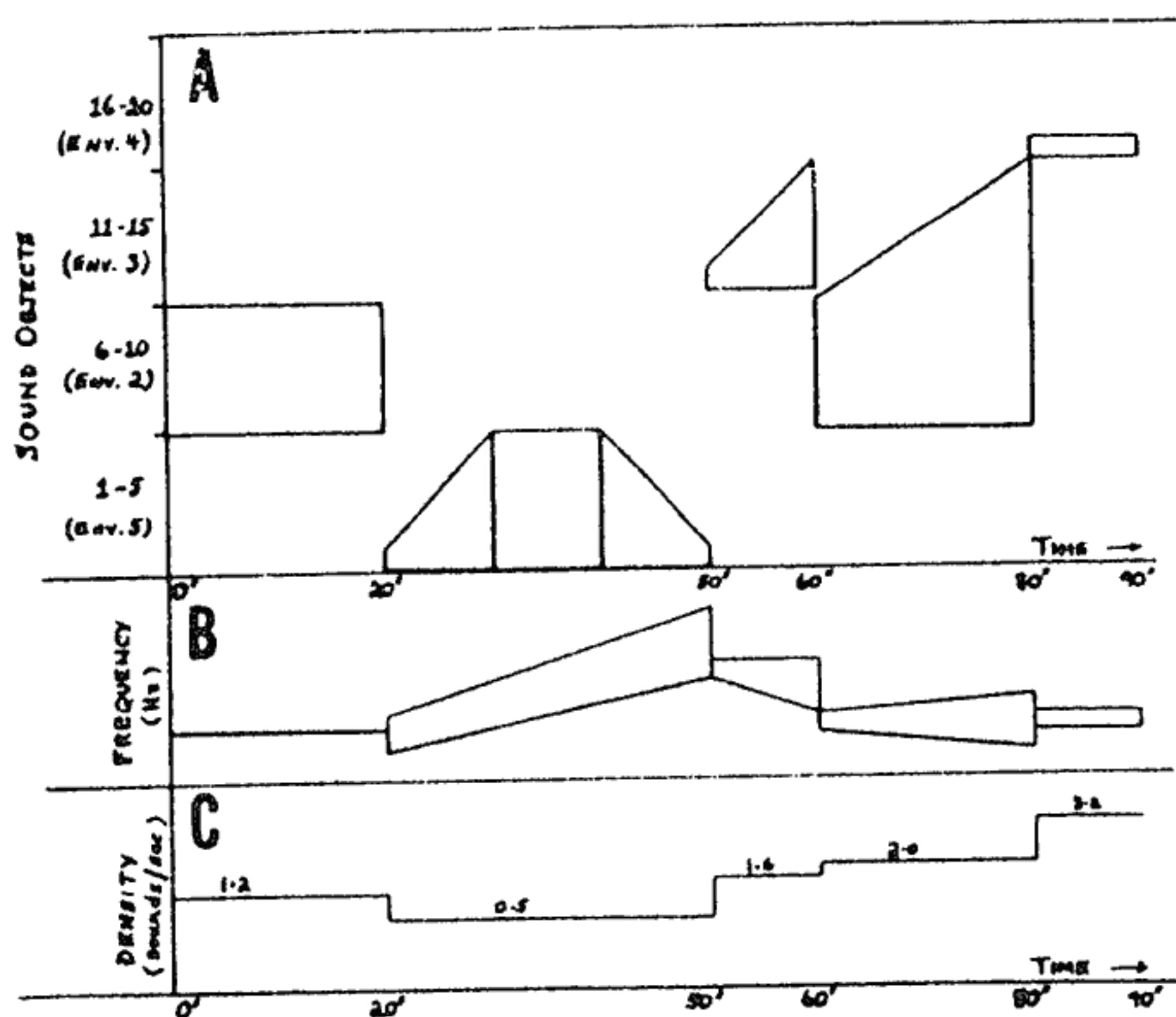


Fig. 7 - L'uso delle maschere timbriche (A) e di frequenza (B) nel programma POD

quali l'algoritmo di distribuzione sceglie gli eventi sonori. Le maschere possono anche venire impiegate per indirizzare la associazione non-deterministica dei timbri ('sound objects') in fig. 7 agli eventi sonori.

Una interessante possibilità offerta da questo e da altri programmi è quella di generare varianti statisticamente equivalenti di una unica struttura, come accade utilizzando lo stesso insieme di maschere ma variando il seme di inizializzazione della sorgente di numeri casuali.

In questo senso viene recuperata ed estesa la prerogativa della musica strumentale tradizionale di poter offrire, attraverso diverse esecuzioni ed interpretazioni, varianti di una stessa struttura (la partitura), che era stata perduta con la musica elettronica su nastro magnetico.

Questa possibilità è offerta anche dal linguaggio PILE, scritto da P.BERG<sup>(15)</sup> e residente sul PDP-L5 dell'Istituto di Sonologia di Utrecht. Il linguaggio è particolarmente adatto alla esplorazione di nuovi metodi non-deterministici di sintesi del suono in tempo reale.

L'esecuzione di un programma scritto in PILE (e compilato) coincide con l'esecuzione musicale, e si può dire che la vera partitura del brano è proprio rappresentata dal programma. Fig. 8 mostra un programma-partitura in PILE. Come si vede, la prima istruzione assegna valore 7 al seme di inizializzazione

```

SEED
  7;
STORE
  SAVE;
START  INIT
  REF:1
  NEW3:-1
  NEW2:-1
  NEW1:-1;
CHANGE CHECK
  NEW2
  NCNT,-
  NEW3
  MSEL,-;
SEL N
  B:12-15
  ST:NEW3;
CAL
  REF:REF*2
  MASK3:REF-1
  COMP:4096-REF;
ZERO?
  Y:END;
MSEL  SEL
  M:MASK3
  ST:MASK2;
SEL N
  B:12-17
  ST:NEW2;
NCNT  SEL N
  B:MASK2
  ST:CNT;
CHECK
  NEW1
  NINC,-;
SEL
  B:8-17
  ST:MASK1;
SEL N
  B:15-17
  ST:NEW1;
NINC  SEL
  M:MASK1
  ST:INCR;
TURN  CAL
  A:A+INCR
  MAX:4095-A;
      NEGATIVE?
      MAX
      -,GOON;
          INIT
          A:4095
          INCR:-INCR;
              BRANCH
              TO:GOON2;
GOON  NEG?
      A
      -,GOON2;
          INIT
          A:0
          INCR:-INCR;
GOON2 CONVERT
  SEND:A
  CHANNEL:0;
CHECK
  CNT
  TURN,CHANGE;
END  FINISH?
  EXT:SAVE;
  DECLARE
  NEW1,NEW2,MASK2,CNT,MASK1,INCR,A,MAX,REF,COMP,SAVE,
  NEW3,MASK3;

```

Fig. 8 - Un programma-partitura in linguaggio PILE



del generatore (hardware, in questo caso) di numeri casuali. Cambiando questo valore si ottiene un'altra versione del brano, statisticamente equivalente.

## 7. Musica 1/f e musica autosimile

L'idea di applicare sequenze numeriche casuali a quattro di potenze 1/f (rumore rosa) anziché a spettro costante (rumore bianco) per la generazione di melodie è dovuta a due ricercatori statunitensi, J. Clarke e R.F. Voss. In un recente articolo (<sup>16</sup>) essi hanno messo in luce come le fluttuazioni di due grandezze fisiche associate a brani musicali di svariati stili (potenza e frequenza istantanea del segnale audio) mostrino spettri di potenza  $P(f)$  ad andamento iperbolico (1/f) su intervalli che si estendono, inferiormente, fino a frequenze  $(f)$  di  $10^{-3}$  Hz, corrispondenti a periodi dell'ordine di alcuni minuti. In altri termini, l'analisi di Clarke e Voss ha mostrato come l'evoluzione temporale 'lenta', cioè delle strutture macroscopiche a lungo periodo, dei brani analizzati sia modellata correttamente dalla casualità del rumore 1/f e non da quella del rumore bianco. (Si osservi che si sta parlando della macrostruttura musicale, e non della microstruttura: i rumori bianco e rosa intesi come caratteristici effetti timbrici non hanno nulla a che vedere con tutto ciò).

E' interessante notare come lo spettro 1/f, che compare anche in numerosi fenomeni fisici, sia associato in generale alla presenza contemporanea di fluttuazioni su più scale temporali anziché su una unica scala. Sulla base di questa considerazione lo stesso Voss ha proposto un metodo per la generazione di sequenze numeriche a spettro approssimativamente 1/f (<sup>17</sup>) che impiega un unico processo stocastico elementare (il lancio di un dado) riportato contemporaneamente su più scale temporali in progressione geometrica.

D'altra parte, molte strutture musicali di svariati stili presentano una evidente organizzazione gerarchica (movimenti, frasi, sottofrasi, incisi,...), e ogni sequenza temporale organizzata gerarchicamente in sottosequenze incorpora per l'appunto più scale temporali in progressione ( approssimativamente) geometrica. In questo senso si può forse concludere che la presenza di fluttuazioni a spettro 1/f in vari generi musicali non è così sorprendente.

Le figure che seguono illustrano alcune melodie stocastiche generate dall'algoritmo di Voss e da una sua variante; i grafici rappresentano le fluttuazioni nel tempo del parametro acustico frequenza (la gamma utilizzata comprende 85 frequenze a distanza di semitono, ed è un sottoinsieme della gamma del terminale audio TAU2 impiegato per questi esperimenti). La melodia di fig. 9a è generata dall'algoritmo originale di Voss; in figg. 9b e 9c l'algoritmo è stato generalizzato per ottenere varianti della prima linea melodica (utilizzando lo stesso seme) nelle quali apparisse più evidente la suddivisione gerarchica in frasi e sottofrasi.

Sono stati scritti programmi per la generazione di musica a più voci; è stata sperimentata la possibilità di controllare con sequenze numeriche  $1/f$  anche le durate delle note e di stabilire una interdipendenza fra le fluttuazioni delle voci (o dei parametri acustici di una voce). Due esempi sonori generati dai programmi di questa serie sono contenuti in un disco dimostrativo (18)

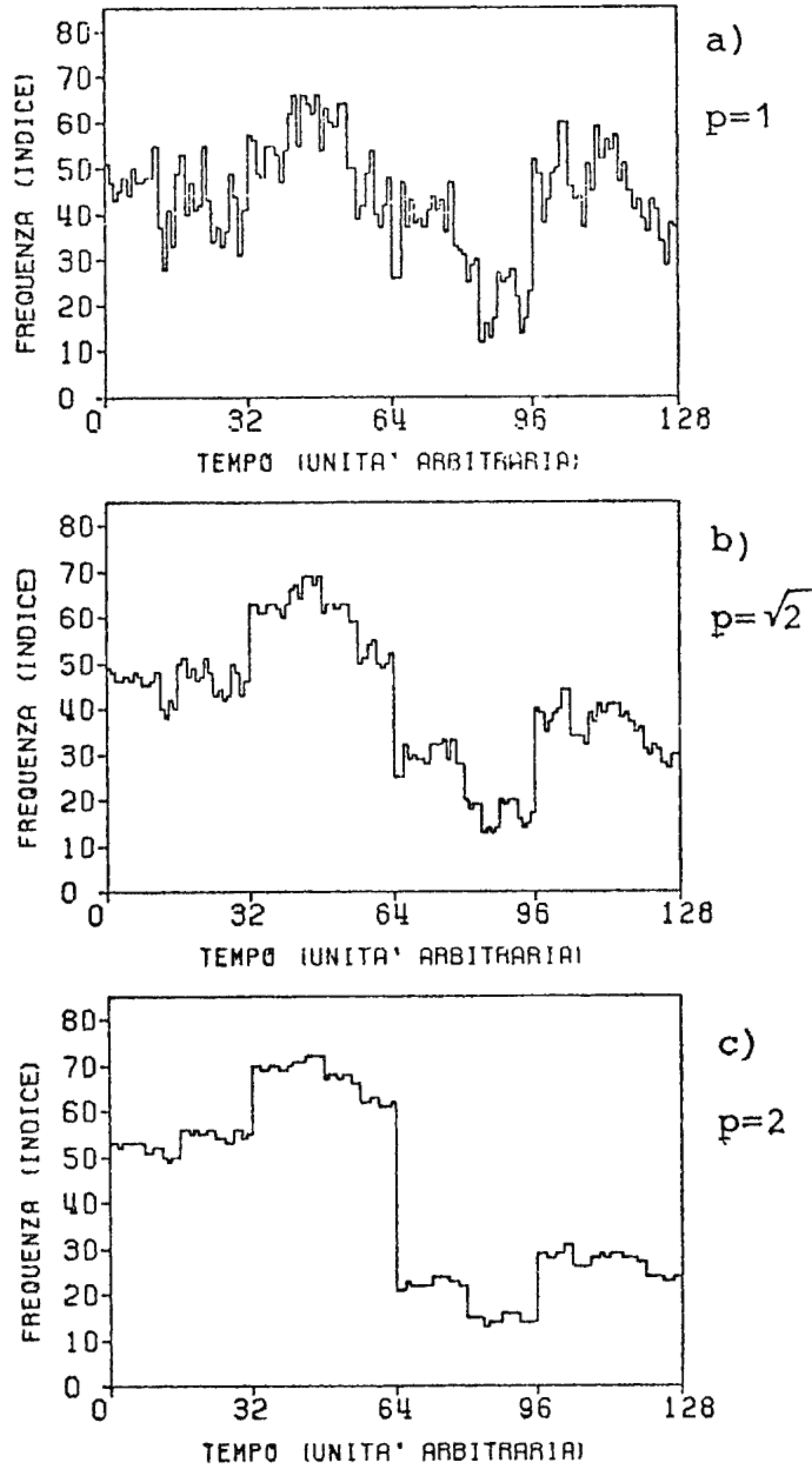


Fig.9 - Tre melodie stocastiche ottenute con l'algoritmo dei dadi.



Una figura geometrica è detta 'autosimile' quando è scomponibile in parti simili all'intera figura. Fig. 10 è autosimile.

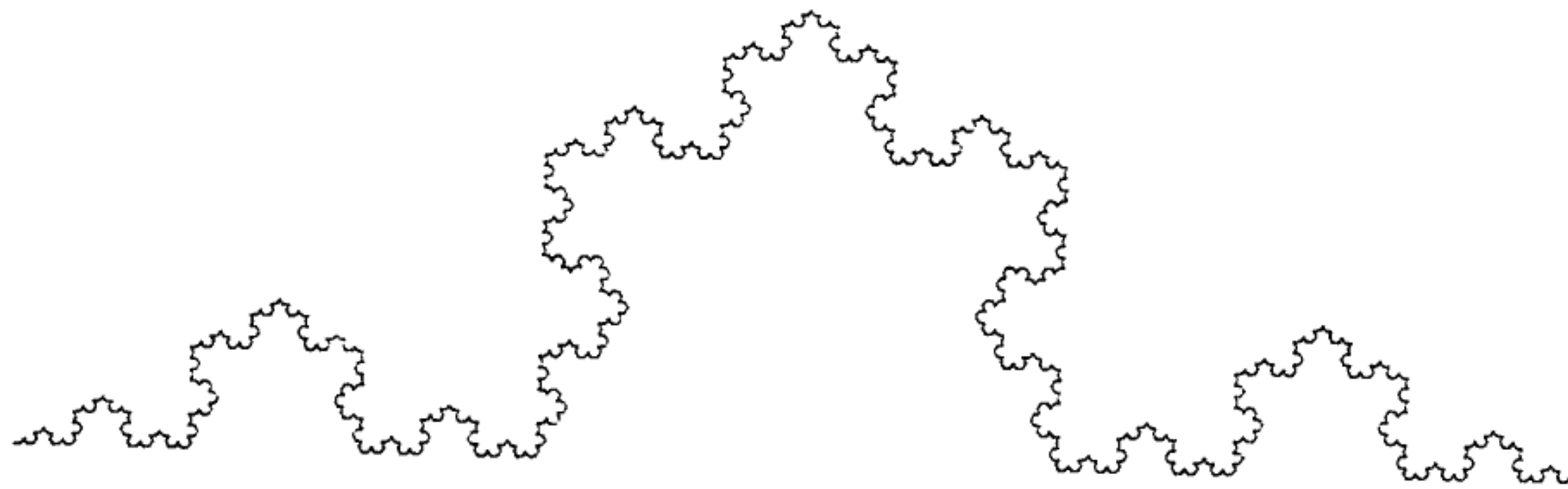


Fig. 10 - Una figura autosimile (curva di Koch)

L'autosimilitudine può valere anche in senso statistico. Fig. 9c è statisticamente autosimile; la prima metà del grafico, ad esempio, se ingrandita di un fattore 2, riflette lo stesso comportamento statistico dell'intero grafico.

Come si vede facilmente, l'autosimilitudine è un caso particolare di strutturazione gerarchica e, come tale, può essere interessante applicarla alla composizione automatica di sequenze musicali. A questo scopo è stata scritta una serie di programmi per la implementazione di un particolare processo stocastico, il volo di Lévy, e per il suo impiego in senso compositivo. (I programmi, scritti in Fortran, generano sequenze musicali immediatamente eseguibili al terminale audio TAU2).

Un punto mobile  $L$  compie un volo di Lévy quando si muove in uno spazio  $n$ -dimensionale per salti successivi che siano:

- statisticamente indipendenti
- isotropi
- distribuiti con probabilità

$$\text{Prob} (r > x) = \begin{cases} x^{-D} & \text{per } x \geq 1 \\ 1 & \text{per } x < 1 \end{cases} \quad (D > 0, \text{ reale})$$

per quanto riguarda il modulo  $r$  (si parlerà allora, più precisamente, di volo di Lévy ad esponente  $D$ ).

Mandelbrot<sup>(19)</sup> ha mostrato come l'insieme infinito dei punti occupati dal

punto mobile  $L$  (i vertici della poligonale che rappresenta la traiettoria del volo) sia statisticamente (ed asintoticamente) autosimile e presenti una organizzazione gerarchica tale da consentirne l'uso come modello della distribuzione delle stelle nell'universo, con galassie aggregate in ammassi di galassie, a loro volte aggregati in ammassi di ordine superiore, e così via. Inoltre la diminuzione dell'esponente  $D$  provoca un aumento delle distanze relative tra le galassie (in rapporto alle loro dimensioni), ad ogni livello gerarchico, o, da un differente punto di vista, un aumento del loro grado di aggregazione (la contraddizione è solo apparente), e pone in maggior evidenza la struttura gerarchica: il fenomeno è del tutto analogo a quanto si osserva in fig. 9, dove nel passare dal caso a) al caso c) aumenta la distinguibilità fra sottofrasi continue.

Fig. 11 mostra degli aggregati di galassie simulati da Mandelbrot mediante voli di Lévy. Il valore di  $D$  decresce (inizialmente  $D = 2$ ) accentuando la

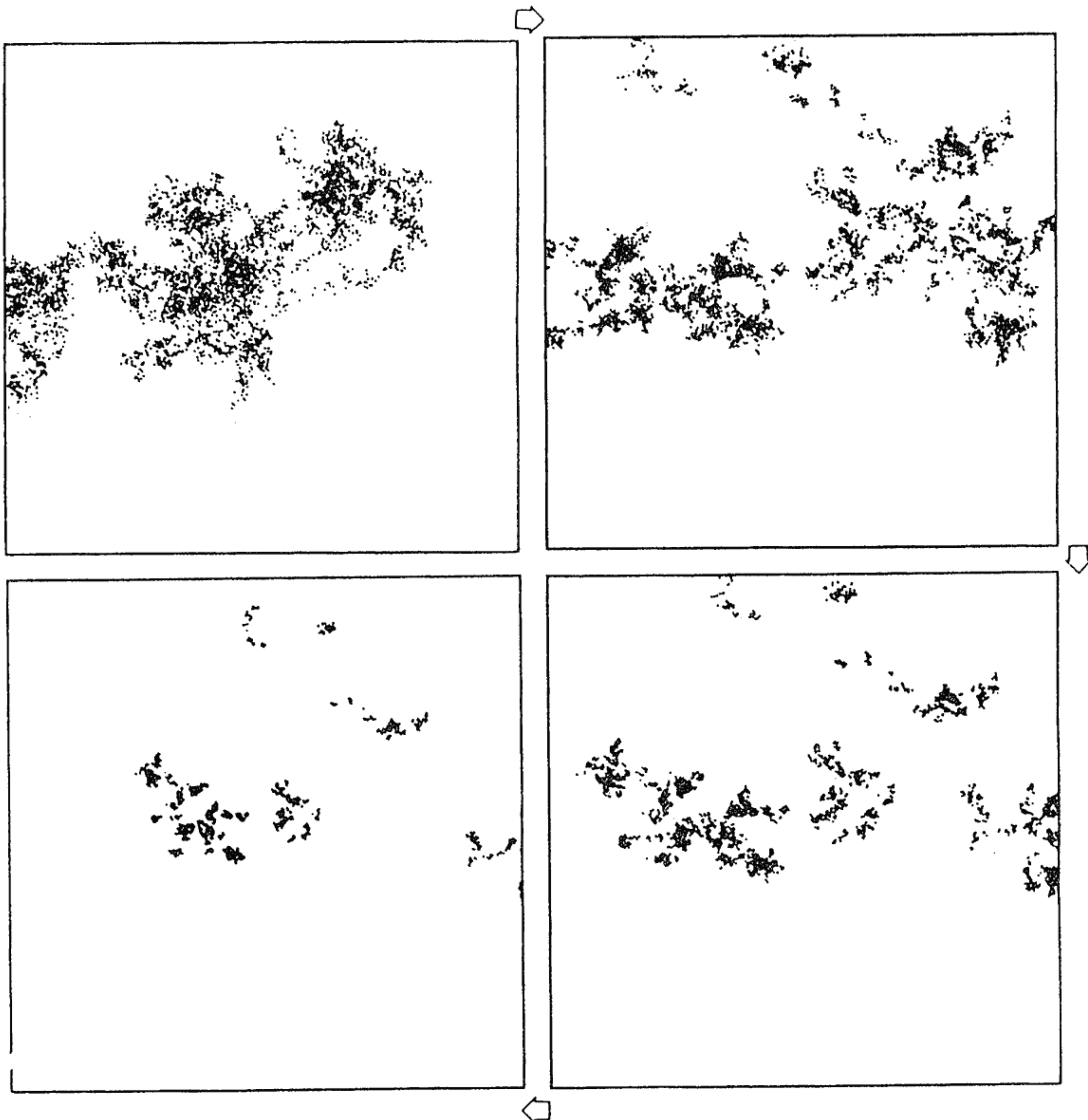


Fig. 11 - Galassie di Mandelbrot con diversi gradi di aggregazione



separazione fra le galassie. Essendo stato utilizzato lo stesso seme (per inizializzare il processo di generazione dei numeri casuali) per tutti gli esempi, questi appaiono come varianti di una unica configurazione.

E' possibile ottenere musica stocastica autosimile (dunque dotata di struttura gerarchica) ambientando un volo di Lévy in uno spazio  $n$ -dimensionale nel quale ogni asse sia stato associato ad un parametro acustico (frequenza, durata, intensità). Ogni salto del punto mobile  $L$  porta ad un nuovo vertice del volo le cui  $n$  coordinate rappresentano altrettanti nuovi valori dei parametri acustici, cioè un nuovo evento sonoro (20).

Fig. 12 illustra un esempio di sequenza polifonica a 4 voci generata da un volo di Lévy in uno spazio quadridimensionale nel quale tutti e quattro gli assi sono stati associati al parametro frequenza (per semplicità si può pensare di mantenere fissi timbri, intensità e durate delle note). Fig. 12a mostra una delle quattro voci; in fig. 12b le voci sono confrontate a due a due. E' evidente la mutua dipendenza delle linee melodiche per la quale spesso (ma non sempre) grandi intervalli di frequenza nelle voci risultano sincronizzati.

In virtù della metrica assegnata allo spazio, l'autosimilarità è presente anche nelle proiezioni dei vertici del volo sugli assi dello spazio, cioè nelle fluttuazioni melodiche.

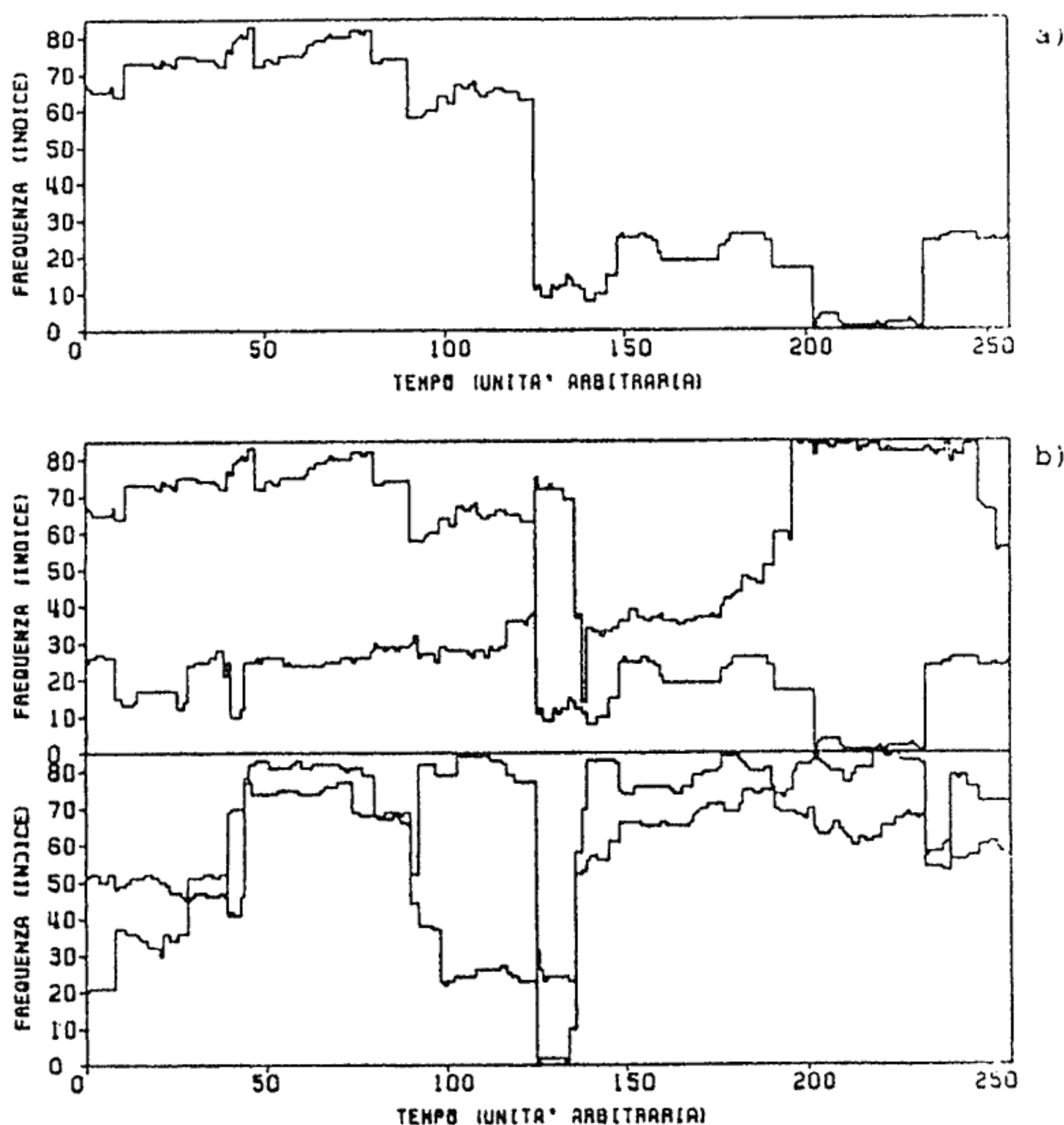


Fig.12 - Una sequenza polifonica a 4 voci generata da un volo di Lévy ( $D=1$ ) in uno spazio acustico a 4 dimensioni (tutti e 4 gli assi sono stati associati al parametro frequenza).

BIBLIOGRAFIA

- 1) F.K.Prieberg "*Musica ex machina*", Einaudi (Torino) 1963
- 2) I.Xenakis "*Formalized music*", Indiana Univ. Press - 1970
- 3) H.Brün "*From Musical Ideas to Computers and Back*", su *The Computer and Music* (ed.Harry B. Lincoln) Cornell Univ. Press.1970
- 4) J.E.Youngblood "*Style as Information*", *J.of Music Theory*, Vol.2,n°1-1958
- 5) R.C.Pinkerton "*Information Theory and Melody*", *Sci.Am.*,Vol.194,2,pag.77-1956
- 6) H.F.Olson,H.Belar "*Aid to Music Composition Employing a Random Probability System*", *J.of the Acoust. Soc.Am.*Vol.33,pag.1163-1961
- 7) F.P.Brooks et Al. "*An Experiment in Musical Composition*", *IRE Trans.on Electronic Computers EC - 6*, pag.175 - 1957
- 8) L.A.Hiller,L.M.Isaacson "*Experimental Music*", McGraw-Hill NY. - 1959
- 9) L.A.Hiller "*Computer Music*", *Sci.Am.*Vol.201,n°6 - 1959
- 10) S.Gill "*A Technique for the Composition of Music in a Computer*", *The Computer Journ.*Vol.6, pag. 129-1963.
- 11) D.Lidov,J.Gabura "*A Melody Writing Algorithm Using a Formal Language Model*", *Comp.Stud.Hum.and Verbal Behaviour*, Vol.4 n° 3-4,pag.138-1973
- 12) S.R.Holtzman "*An Automated Sound Synthesis Instrument*", *Computer Music Jour.*,Vol.3,n°3 - 1979
- 13) J.Myhill "*Controlled Indeterminacy - A first Step Towards a Semi-Stochastic Music Language*", *Computer Music Jour.*,Vol.3 n° 3 - 1979
- 14) B.Truax "*A Communicational Approach to Computer Sound Program*", *J.of Music Theory*, Vol. 20, n° 2, pag. 227 - 1976 (Versione ridotta su *Computer Music J.*, Vol. I, n° 3 - 1977).
- 15) P.Berg "*PILE - A Language for Sound Synthesis*", *Computer Music J.*, Vol. 3, n° 1 - 1979
- 16) R.F.Voss,J.Charke "*1/f noise' in Music: Music from 1/f noise*",*J.Acoust.Soc. Am.*,Vol.63,n°1 - 1978
- 17) M.Gardner "*Musica bianca, musica scura, curve fratte e fluttuazioni uno-su-effe*", *Le Scienze*, Agosto 1978
- 18) P.Grossi et Al. "*Computer Music*", disco dimostrativo, CNUCE-C.N.R.,1979
- 19) B.B.Mandelbrot "*Fractals, Form, Chance and Dimension*", Freeman & Co - 1978
- 20) T.Bolognesi "*Composizione automatica: dalla musica 1/f alla musica autosimile*", pubbl. CNUCE n° 163 - 1979