

I quanta acustici di Gabor nelle tecnologie del suono e della musica

Agostino Di Scipio*

(Ricevuto il 10 novembre 2015. Versione rivista ricevuta il 2 dicembre 2015)

Sommario

In una serie di contributi scientifici della fine degli anni quaranta del Novecento, Dennis Gabor sviluppò un quadro concettuale e operativo di analisi del segnale sonoro che, innestandosi in una tradizione scientifica allora piuttosto recente, apriva orizzonti di ricerca e applicazione musicale al tempo del tutto inediti. L'articolo segue appunto il formarsi di tale quadro di riferimenti scientifici e delle relative ripercussioni pratiche – particolarmente a partire da due contributi di primaria importanza (“Theory of communication” del 1946, e “Acoustical quanta and the theory of hearing”, del 1947). Dopo alcune osservazioni preliminari, l'articolo approfondisce alcuni elementi di senso “genealogico” (teoria dei quanti, indeterminazione di Heisenberg, analisi delle sensazioni di Mach) e contestualizza poi la ricerca di Gabor rispetto ad interessi scientifici più o meno coevi ad esso e ad esso coerenti. Seguendo un percorso ibrido tra storia e critica della scienza e delle tecnologie, l'articolo descrive poi alcune delle sperimentazioni e dei dispositivi tecnologici, tra quelli più direttamente ricollegabili ai contributi di Gabor, che hanno avuto maggiori ripercussioni in ambito scientifico e, soprattutto, nell'ambito di nuovi percorsi di teoria della musica e degli sviluppi storici – certo pionieristici, ma in un certo senso fondativi – delle pratiche compositive legate alle tecnologie analogiche e digitali del suono.

1 Introduzione

In queste pagine riprendo un testo apparso ormai parecchi anni fa (Di Scipio 1998), apportandovi necessarie revisioni e aggiornamenti. Ho conservato l'impianto complessivo della versione iniziale, ma ho riscritto molti passaggi, inserito titoli di sezione e sottosezione, e aggiornato la bibliografia laddove opportuno. Ho infine aggiunto alcune interpolazioni utili a rendere più chiara l'esposizione e meno incompleta la trattazione dei temi toccati.

1.1 (S)composizione del suono e domini di rappresentazione del segnale

Uno degli elementi più caratteristici e trasversalmente condivisi nelle molteplici esperienze di musica elettroacustica e sperimentale, e nelle moderne tecnologie del suono in generale, è certamente l'idea di poter ‘comporre il suono’ facendone dimensione autonoma rispetto alla più usuale dimensione del ‘comporre con i suoni’, alla quale naturalmente si affianca e si interseca. Nel quadro della cultura musicale contemporanea, questa possibilità ha dischiuso un enorme potenziale linguistico-musicale e si è tradotta in una grande varietà di prassi estetiche.

*Conservatorio di Musica “A. Casella” – L'Aquila.

Ciò è avvenuto mediante la previa riduzione del *suono* a *segnale* implicitamente assunta nella grande maggioranza delle tecnologie disponibili (un ‘riduzionismo’ per nulla ovvio o aproblematico, benché accettato maggioritariamente nella cultura contemporanea del suono). Si pone quindi la questione dei modelli di *rappresentazione del segnale* sulla cui base è possibile sviluppare operazioni di analisi, sintesi ed elaborazione del suono. Da un certo punto di vista, le soluzioni tecnologiche praticate nel corso dei decenni possono essere ricondotte a due prospettive essenziali: da una parte, la possibilità di studiare e progettare lo spettro del suono, anche nella sua morfologia dinamica (si tratta quindi di operare sulla base di rappresentazioni del suono *nel dominio della frequenza*, lasciando implicita o derivata la determinazione del tempo); dall’altra, la possibilità di studiare e gestire direttamente le curve di oscillazione, ovvero l’andamento microtemporale del segnale (si tratta allora di operare *nel dominio del tempo*, lasciando implicita e derivata la determinazione della frequenza). Nei concreti modelli operativi costruiti a partire da queste due strade, le diverse possibilità di relazionarsi alla dimensione temporale implicano diverse conseguenze pratiche e concettuali, anche a livello di pensiero e di prassi musicale.

Si parla talvolta di ‘microcomposizione’ alludendo alla possibilità di scomporre e ricomporre il suono e più estese strutture musicali a partire da particelle di durata finita, a partire cioè da ‘atomi’ o ‘grani’ sonori. In campo musicale, il primo a muoversi in tale prospettiva è stato Iannis Xenakis¹, in brani davvero pionieristici realizzati alla fine degli anni cinquanta del Novecento presso il GRM di Parigi. Il suo tentativo di lavorare con *quanta sonori* (termine adoperato dal compositore stesso) inaugurava un’operatività piuttosto differente rispetto alle prospettive più comuni, nelle quali il suono è concepito come somma di oscillazioni sinusoidali periodiche o aperiodiche, alla stregua di quanto avveniva per l’acustica classica, ma anche nei primi esempi di *elektronische Musik* realizzati alla WDR di Colonia e nella progettazione di strumenti musicali elettronici inventati nel corso della prima metà del secolo, a partire dal *telharmonium* di Thaddeus Cahill (risalente agli ultimi anni del XIX secolo). La differenza tra una concezione ‘ondulatoria’ e una concezione ‘granulare’ – comunque non esclusiva della poetica di Xenakis, dato che esempi diversi se ne trovano anche in altre esperienze pionieristiche di musica elettronica (Di Scipio 1994) – non va certo intesa come una differenza di natura strettamente tecnica, musicalmente marginale, e riflette in realtà modi diversi di pensare il suono e dunque modi diversi di predisporre a comporlo, a farne musica.

Queste circostanze possono essere ricondotte a corrispondenti momenti della storia della scienza: da una parte abbiamo allora l’acustica classica, che vede nel fenomeno sonoro una meccanica ondulatoria e che trova nella ‘teoria analitica del calore’ di Jean-Baptiste Fourier (1822) adeguata rappresentazione matematica, perfettamente funzionale ai successivi contributi di George Ohm (1843) e di Hermann von Helmholtz (1885), a loro volta decisivi per lo studio dei fenomeni della percezione uditiva e per la teoria del suono musicale; dall’altra una visione di tipo ‘atomistico’ o ‘corpuscolare’, la quale – pur potendosi inscrivere in un’antica tradizione che annovera, a vario titolo, nomi di illustri scienziati del XVII secolo (come Gassendi e Beekman)² – trova adeguati mezzi di rappresentazione matematica solo nel corso del XX secolo, particolarmente nelle ricerche portate avanti negli anni quaranta da Dennis Gabor (1900-1979). In tempi moderni, questa dualità di prospettive non è posta come una netta divisione tra scuole di pensiero contrastanti: piuttosto, come osserveremo proprio a partire

¹Cfr. i primi capitoli del suo *Musiques Formelles* (1963), anche nella traduzione inglese (1992). Si veda anche Xenakis (1985, pp. 178 e sgg.).

²Si veda il breve riepilogo storico in Roads (2001a, pp. 50-55).

da Gabor, le due idealizzazioni alternative di segnale (variazione di ampiezza in funzione del tempo) e di spettro (analisi di Fourier) possono essere ricondotte all'interno di un formalismo unitario, diventando casi particolari ma diametralmente opposti dentro uno spazio di fenomeni omogeneo.

In sintonia con altri ricercatori, Gabor muove dalla constatazione dello statuto teorico, e astratto dal tempo, dell'analisi di Fourier, arrivando infine a proporre, sullo sfondo della fisica quantistica e della teoria dell'informazione della sua epoca, un quadro concettuale nuovo, ricco di implicazioni conoscitive e tecnologiche. Cercheremo di darne un profilo complessivo, mettendo in evidenza vari aspetti tecnici e teorici, e le principali implicazioni musicali. Sarà importante valutare bene come l'impianto formale del lavoro di Gabor si ponga sin dall'inizio in connessione diretta con lo studio della percezione uditiva. Già il titolo del suo articolo scientifico più noto, «Acoustical quanta and the theory of hearing» (Gabor 1947a), indica la volontà di affrontare simultaneamente due ambiti d'interesse solitamente ardui da trattare all'interno di una visione unitaria, quello dei fenomeni fisico-acustici e quello della percezione uditiva, entrambi visti da una certa angolazione scientifica con la sua specifica dimensione epistemologica. Più in generale, nel contesto della proposta di Gabor, «le due parole *teoria* e *pratica* si incontrano» permettendo, come vedremo, non solo che «matematici, fisici e ingegneri [possano] comunicare tra loro in vista di sviluppi fruttuosi» (Feichtinger e Strohmer 1998, p. 1), ma anche che compositori e musicisti possano trarne importanti conseguenze concettuali ed operative nel loro lavoro sul suono.

1.2 Dennis Gabor

Nato a Budapest nel 1900, Denés Gabor studiò nella città natale, iniziò poi a lavorare a Berlino dove rimase finché nel 1934 (con la definitiva conquista del potere da parte di Hitler) si trasferì in Gran Bretagna. Morì a Londra nel 1979. Attivo in numerosi campi di ricerca, egli si occupò di teoria dell'informazione, di microscopia elettronica, di oscillografia, e di molto altro ancora. Il suo nome è di solito associato allo sviluppo dell'olografia, al quale iniziò a dedicarsi verso la fine degli anni quaranta (per i suoi studi in questo campo, fu Premio Nobel per la fisica nel 1971)³.

Tra il 1944 e il 1945, Gabor è attivo presso i laboratori della British Thomson-Houston, a Rugby, e prepara una memoria di ricerca molto articolata, apparsa nel 1946 col titolo «Theory of communication» (Gabor 1946)⁴. All'interno di un ampio quadro di riferimenti a studi di teoria dell'informazione e della comunicazione, Gabor propone un modello di analisi che procede scomponendo il segnale in *quanta* di informazione. La proposta viene ripresa in modo più snello e diretto in «Acoustical quanta and the theory of hearing» (Gabor 1947a), dove se ne rimarcano le implicazioni per la rappresentazione di segnali sonori (vocali e musicali), anche in rapporto a certi aspetti particolari del funzionamento dell'apparato uditivo, ma tralasciando quasi del tutto gli aspetti più tecnologici presenti nel primo articolo⁵. Nel seguito,

³Si veda Gabor (1979). Il primo contributo nella direzione che porterà Gabor ai principi di olografia è in Gabor (1948a).

⁴Questo lungo scritto è diviso in tre parti (“The analysis of information”, “The analysis of hearing” e “Frequency compression and expansion”), ciascuna avente un proprio apparato di Appendici e di riferimenti bibliografici. Un riepilogo estremamente ridotto apparve l'anno successivo sulla stessa rivista, con lo stesso titolo (Gabor 1947c).

⁵Pur presentandosi come un testo unitario, privo di ripartizioni interne, «Acoustical quanta...» è chiaramente diviso in due parti, grosso modo corrispondenti alle prime due parti di «Theory of communication», di cui può essere considerato una sorta di versione agile, adeguata alle finalità di comunicazione e divulgazione scientifica della rivista che ne accoglieva la pubblicazione, *Nature*.

ci soffermeremo sui contenuti di questi due contributi, pur tenendo presente alcuni altri scritti di Gabor su questi temi apparsi negli anni subito successivi, come «New possibilities in speech transmission» (Gabor 1947b) e *Lectures on communication theory* (Gabor 1952)⁶. Vanno anche segnalati due articoli pubblicati in Francia, uno dei quali apparso in un volume collettivo curato dal celebre fisico Louis de Broglie nel contesto del dibattito fisico-matematico sul dualismo ‘onda-particella’ (Gabor 1951), l’altro apparso su *L’Onde électrique*, una rivista destinata a professionisti della radiofonia (Gabor 1948b)⁷.

2 Quanta acustici e teoria dell’informazione

2.1 Tempo e frequenza

Gabor (1947a, p. 591) pone una domanda molto diretta: «Che cosa udiamo?». L’interrogativo in realtà presenta una sua intrinseca duplicità semantica. In senso ‘fisicalista’ vuol dire: cosa desta in noi le sensazioni uditive? In senso ‘fenomenista’ può significare: cosa sono le sensazioni uditive stesse? Evidentemente i due punti di vista vanno collegati: la rappresentazione matematica del suono deve tener conto sin dall’inizio dell’esperienza uditiva, dove tempo e frequenza sono inevitabilmente compresenti e interrelati. All’udito, un suono si presenta come una configurazione energetica corrispondente a determinate componenti spettrali di data frequenza e ampiezza, ma anche dotata di un’evoluzione temporale che consiste proprio nel dinamico mutare dei rapporti di frequenza (e quindi di fase) tra le componenti. L’analisi di Fourier, «inattaccabile» [*beyond reproach*] sul piano matematico (Gabor 1946, p. 431), tuttavia conduce ad una descrizione atemporale in termini di onde esattamente periodiche, cioè di durata infinita. L’esperienza rivela invece un decorso temporale nel suono, una condizione di finitezza della durata e di aperiodicità delle oscillazioni. Gabor scrive:

il metodo basato sull’integrale di Fourier considera i fenomeni in un intervallo infinito, *sub specie aeternitatis*, quanto di più lontano dal punto di vista dell’esperienza di tutti i giorni. Se il termine ‘frequenza’ viene usato nel senso strettamente matematico che si applica solo a treni d’onda infiniti, una ‘frequenza mutevole’ [*changing frequency*] diventa una contraddizione in termini, perché sarebbe una definizione che riguarda sia il tempo che la frequenza (ibid., p. 431)⁸.

Ma «tempo e frequenza sono complementari, piuttosto che mutualmente esclusivi» (ibid., p. 431), e dovrebbero quindi essere espressi in maniera esplicita in una rappresentazione del segnale che dia conto di entrambi, pur nei rispettivi ruoli «simmetrici» (ibid., p. 429). L’obiettivo di ricerca perseguito è appunto quello di dimostrare l’esistenza di «metodi matematici adeguati a questo scopo» (ibid., p. 431). Si tratterà di metodi che avranno necessariamente la «strana caratteristica» (ibid., p. 432) di non poter avere un grado molto elevato di precisione

⁶La datazione di questo testo, che riprende i contenuti di interventi fatti al MIT di Boston, talvolta è parsa incerta. Stando a Léon Brillouin, pioniere della teoria dell’informazione il cui lavoro viene citato da Gabor proprio in questo testo, la data sarebbe quella del 1951 (Brillouin 1956, pp. 98, 168). Stessa data si trova in un contributo del grande linguista Roman Jakobson (1966, p. 32). Sembra plausibile che Brillouin e Jakobson si riferissero in realtà all’anno in cui le *lectures* furono effettivamente tenute, non alla pubblicazione dei testi corrispondenti.

⁷Qualche anno dopo, questa rivista, pubblicata a Parigi dalla Société des Radioélectriciens, ospitò scritti di Jacques Poullin, primo collaboratore di Pierre Schaeffer al GRM di Parigi (Poullin 1954) e di Abraham Moles, ricercatore e collaboratore di Schaeffer sin dai primi anni cinquanta (Moles 1953a,b). La circostanza induce ad ipotizzare che Gabor (1948b) possa essere stato letto nell’ambiente del GRM.

⁸Qui e altrove si intenda ‘traduzione mia’.

simultaneamente per la determinazione del tempo e per la determinazione della frequenza – problematica non a caso affrontata con gli strumenti concettuali della meccanica quantistica e richiamandosi al ‘principio di indeterminazione’ che Werner Heisenberg aveva identificato due decenni prima (Heisenberg 1927).

Inoltre, mentre i metodi basati sul modello di Fourier implicano il *continuum* del tempo e della frequenza, Gabor considera che la capacità dell’apparato uditivo ha invece limiti di risoluzione o di ‘discriminazione’ tra valori contigui in entrambe le dimensioni, limiti che sono accertabili e che non possono essere disattesi. Come vedremo, per identificare le unità minime di informazione rilevanti per l’orecchio, il suo discorso rinvia a ricerche di psicofisiologia dell’udito condotte nei decenni precedenti a proposito delle soglie di discriminazione uditiva (particolarmente quelle relative al tempo).

2.2 Diagramma informazionale e segnali elementari

Gabor costruisce un diagramma informazionale [*diagram of information*], cioè una griglia o matrice bidimensionale, discretizzando sia il continuo temporale (asse orizzontale) sia quello frequenziale (asse verticale). Ciascuna delle celle di tale matrice è assimilabile alla risposta caratteristica di un risonatore acustico, secondo l’analogia meccanica classica che vede nell’analisi spettrale la risposta di molteplici risonatori intonati (corrispondenti ad un banco di filtri). Nel caso della matrice di Gabor, idealmente ciascun risonatore ha larghezza di banda finita (Δf) e risposta nel tempo finita assai breve (Δt). Ogni cella vale allora come *quantum* di informazione geometricamente definito da un passo differenziale di frequenza e di tempo. L’area dovrà essere pari almeno all’unità: $\Delta f \Delta t \geq 1$. «Questa è l’esatta formulazione della relazione di indeterminazione» (Gabor 1947a, p. 591; qui p. 10). Inizialmente, in Gabor (1946), l’area è messa in rapporto all’identità statistica $\Delta t \Delta f \approx 1$. Il senso è che ciascuna cella, prodotto di un’incertezza quantistica, è centrata su un valor medio di frequenza e su un valor medio di tempo: al crescere di Δt dovrà decrescere Δf e viceversa, rimanendo mediamente pari all’unità il loro prodotto⁹. Attraverso un’analisi matematica della questione, Gabor infine stabilisce nella disequaglianza $\Delta t \Delta f \geq 1/2$ la relazione di incertezza minima attribuibile ad ogni cella nel diagramma informazionale, che d’altra parte sta «alla radice del principio fondamentale delle comunicazioni» (ibid., p. 434)¹⁰.

Cosa contiene, in concreto, l’area $\Delta t \Delta f$ di ciascuna cella del diagramma informazionale? Essa va pensata come un ‘segnale elementare’ [*elementary signal*] che possa far sì che «la disequaglianza diventi uguaglianza» (Gabor 1947a, p. 591; qui p. 11) e che $\Delta t \Delta f$ assuma «il valore più piccolo possibile» (Gabor 1946, p. 435). Gabor dimostra che ciò si può ottenere con segnali che sono «il prodotto di modulazione di un’oscillazione armonica di qualsiasi frequenza con un impulso avente la forma di una funzione di probabilità» (ibid., p. 435). In altre parole, a ciascuna cella del diagramma va associato un segnale costituito da una parte reale di tipo seno o coseno, e da una parte immaginaria corrispondente ad una curva di tipo gaussiano (la quale garantisce minima dispersione spettrale, cioè minima deviazione rispetto alla relazione

⁹In un passaggio ulteriore (Gabor 1946, p. 442), leggiamo che «G. W. Stewart nel 1931 fu il primo a chiedersi se i limiti della sensazione uditiva [*aural sensation*] non seguano una relazione di incertezza, che egli scrisse come $\Delta t \Delta f = 1 \dots$ ». Possiamo forse considerare l’articolo di Stewart il primo esempio di un avvicinamento a problematiche di acustica in termini quantistici.

¹⁰Gabor non chiarisce l’osservazione. Va detto che nel suo modo di argomentare riecheggiano ripetutamente i principi del trasferimento di informazione che erano stati illustrati in contributi fondamentali di Harry Nyquist e di Ralph Hartley negli anni venti (riportati da Gabor in bibliografia), che poi trovarono proprio tra il 1948 e il 1949 nel teorema di Shannon e Weaver una formulazione efficace per l’ingegneria dell’informazione (Shannon e Weaver 1949).

tempo/frequenza)¹¹. A quel punto, determinando l'ampiezza del segnale elementare, ogni cella del diagramma informativo costituisce un quantum del segnale acustico, cioè individua *la quantità di energia dispersa all'interno dell'unità minima di frequenza durante l'unità minima di durata*. Gabor procede a dimostrare matematicamente che qualsiasi segnale può essere espanso in termini di queste unità elementari, per cui il diagramma informativo sarà la rappresentazione del segnale scomposto in *quanta acustici* trattabili come *quanta di informazione* (Gabor 1946, p. 435).

Abbiamo allora un modello di analisi del suono che «parla sia il 'linguaggio del tempo' sia il 'linguaggio della frequenza'...» (Gabor 1947a, p. 592; qui p. 12). Come anticipato sopra, tale modello presenta due casi particolari ed opposti: celle infinitamente estese nella direzione del tempo equivarranno ad oscillazioni sinusoidali periodiche (analisi di Fourier); celle infinitamente estese nella direzione della frequenza equivarranno a 'funzioni delta', cioè impulsi di Dirac (durata infinitesima). Insomma *spettro* (variazioni di ampiezza nel dominio della frequenza) e *segnale* (variazione di ampiezza nel dominio del tempo, discretizzato su campioni così prossimi tra loro da pervenire al continuo) «sono entrambi casi speciali del modello di Gabor» (Brillouin 1956, p. 99). In questo risultato riverbera un tema importante nel dibattito scientifico dell'epoca, e fondamentale per tutta la conoscenza contemporanea, quello della dualità tra particella e onda. Nel modello avanzato da Louis de Broglie una ventina di anni prima, le particelle di materia che si muovono a velocità identica rivelano, ad una certa scala di osservazione, le proprietà di un'onda, e possono allora essere ricondotte alle leggi della meccanica ondulatoria; le stesse particelle, guardate ad un'altra scala di osservazione, possono essere descritte nei rispettivi moti individuali, il che richiede un passaggio alla meccanica quantistica.

Il modello teorico di Gabor si presenta come la prima rappresentazione formale (in senso matematico) nella storia delle teorie corpuscolari del suono. Nella storia dell'acustica (Lindsay 1966), a partire dall'atomismo greco tramandatoci da Lucrezio, e passando per il corpuscolarismo seicentesco, si è spesso ritenuto che la concezione corpuscolare abbia prodotto poco più che semplici intuizioni meccanicistiche. Con Gabor si ha un vero modello teorico e analitico (che poi risulterà preliminare ad ulteriori modelli dello stesso tipo, ma più sofisticati). In tal senso, sul piano storico, il suo ruolo appare simile al ruolo svolto dal modello di Fourier un secolo prima rispetto a precedenti intuizioni circa la natura composita del moto oscillatorio, cioè rispetto all'idea per cui ogni movimento, quindi anche ogni moto oscillatorio complesso, è scomponibile in una serie di oscillazioni semplici con frequenze in rapporto armonico tra loro (intuizione che si trova già nel lavoro di Joseph Saveur, all'inizio del XVIII secolo, e comprovata sperimentalmente da Daniel Bernoulli e da Eulero intorno alla metà di quello stesso secolo). Entrambi i contributi danno spessore teorico ad un bagaglio di intuizioni e di osservazioni empiriche precedenti.

2.3 L'analogia meccanica e l'orecchio

Riprendiamo l'analogia meccanica posta inizialmente in relazione all'area unitaria del diagramma informativo. Ciascuna cella, si è detto, può essere pensata come risposta nel

¹¹In termini più consueti per la prassi musicale elettroacustica, ogni cella corrisponde ad un 'grano sonoro': la parte reale del segnale è la sua 'forma d'onda', la parte immaginaria è il suo 'involuppo'. In un passaggio successivo di Gabor (1946), viene valutata la possibilità di utilizzare come parte immaginaria (indicata ora come 'finestra' del segnale reale) forme triangolari o trapezoidali, che viene però scartata perché comporterebbe inutili complicazioni teorico-matematiche senza portare a «risultati differenti rispetto a finestre probabilistiche» (ibid., p. 449).

tempo (o «tempo di decadimento», come dice Gabor) di un risonatore tarato ad una certa frequenza. L'analogia permette di pensare tutta la problematica anche in relazione all'idea che descrive l'orecchio in termini di un sistema di risonatori.

La questione ha implicazioni importanti naturalmente in rapporto all'individuazione dell'area della cella, $\Delta t \Delta f$, essendo «praticamente accertato che i risonatori dell'orecchio sono ampiamente smorzati, con tempi di decadimento dell'ordine di 10 millisecondi o anche meno» (Gabor 1947a, p. 593; qui p. 14). Più precisamente, per Gabor lo studio delle soglie di discriminazione uditiva di tempo e di frequenza mostra che «l'orecchio possiede un'area di soglia di discriminazione di ordine unitario» (ibid., p. 592; qui p. 12), «almeno nell'ambito di frequenze sotto i 1000 Hz e per durate comprese tra 20 e 250 millisecondi» (Gabor 1946, p. 444). Pur con questi importanti limiti, Gabor può allora collegare il suo modello di analisi all'analisi delle sensazioni uditive, rivelandone il valore empirico. Il diagramma informazionale insomma agisce da schema concettuale del modello formale, ma allo stesso tempo vale come schema che lega il modello analitico all'esperienza uditiva.

C'è però un'altra osservazione importante a proposito della metafora meccanica qui richiamata: i risonatori tradizionalmente usati nell'analisi del suono¹² sono tarati su bande di frequenza fisse, con risposte nel tempo proporzionali, non liberamente determinabili. Le variazioni di periodicità e ampiezza nel corso della durata di un suono, importanti per la percezione uditiva, non sono rilevabili con lo stesso grado di precisione da meccanismi del genere. La consuetudine di pensare l'orecchio come un banco di risonatori rinvia implicitamente ad un'orecchio piuttosto astratto (in modo speculare al modello di Fourier, che rinvia ad uno spettro di frequenza, astraendo dal tempo). In base ad esperimenti attendibili, l'orecchio sembra invece avere un comportamento più sottile, capace peraltro di cogliere con progressiva sottigliezza l'altezza di un suono al crescere della durata. Il che suggerisce che, come sistema di risonatori, esso evidentemente agisce in modo dinamico. Gabor giunge a postulare l'esistenza, nel sistema uditivo, di una «seconda curva di risonanza» (ibid., p. 444), di un «secondo meccanismo nell'orecchio» (Gabor 1947a, p. 593; qui p. 14) di tipo non fisiologico ma (ipoteticamente) relativo alle fibre nervose dell'orecchio interno, capace di attivarsi durante lo stimolo uditivo permettendo in qualche modo ai «risonatori dell'orecchio» di assottigliare progressivamente la banda di frequenza per determinare con crescente precisione la periodicità dello stimolo sonoro (ciò almeno in un ambito di frequenze medio-basse, sotto i 1000 Hz). Come suggerisce Gabor, un simile comportamento dell'orecchio è effettivamente in gioco non tanto nell'ascolto del parlato, quanto nell'ascolto della musica, dove eventi sonori (quasi) periodici hanno mediamente durata maggiore dei suoni del parlato (Gabor 1946, p. 444).

2.4 Mach, empirismo, interdipendenza dei fenomeni

A monte di queste tematiche di psicofisiologia dell'udito, in Gabor (1947a) c'è un fugace ma significativo riferimento ad Ernst Mach (1838-1916). Già nel 1865 (a Graz, prima di stabilirsi a Praga dove diventò una delle massime autorità scientifiche del suo tempo), il grande fisico austriaco aveva condotto esperimenti di acustica e di ottica, alcuni dei quali centrati sulla percezione dell'altezza in rapporto alla durata delle oscillazioni e sulle soglie differenziali di percezione della durata (soglie che gli apparvero proporzionali all'estensione di durata considerata, ma in termini non esattamente logaritmici, devianti rispetto alla legge di Weber e Fechner). Tali ricerche si inquadravano in un più vasto interesse che Mach nutriva per il

¹²Come quelli descritti nella parte iniziale del trattato di Helmholtz (1863, pp. 66-68).

«senso del tempo» (*Zeitsinn*) di cui è capace l'udito umano (Mach 1865b)¹³. Pur di passaggio, Gabor si richiama a Mach in modo esplicito attribuendogli la verifica del fatto che «una breve oscillazione sinusoidale sarà percepita come un rumore, e solo oltre una certa durata minima diventa un tono di altezza accertabile» (Gabor 1946, p. 442). La soglia fissata da Mach era di 40 millisecondi. Al di sotto di essa non si avrebbe percezione della durata ma, com'è stato scritto recentemente, di «punti di tempo» (Pöppel, Bao e Zhou 2011, p. 776). Gabor segnala comunque che, in studi degli anni trenta, questa soglia risultava anche più bassa, assestandosi a circa 10 millisecondi almeno nell'ambito di frequenze tra 500 e 1000 Hz. Per intuire il valore di tali misure, si consideri che al giorno d'oggi le neuroscienze indicano in circa 50 millisecondi il tempo complessivo necessario all'elaborazione cerebrale di ciascuno degli stimoli uditivi in una sequenza di eventi impulsivi (Chouard 2001, p. 103), il che non a caso coincide col limite inferiore di udibilità in frequenza.

Nel contesto di una prospettiva di ricerca come quella perseguita da Gabor, il nome di Mach può avere un significato particolare. Il fisico era stato apertamente polemico nei confronti dell'atomismo del suo tempo, quale sviluppatosi a partire dalla chimica di vari decenni prima, cioè dell'inizio del XIX secolo. Nel suo empirismo radicale, egli considerava gli atomi della scienza moderna come un residuo neokantiano, una sorta di 'noumeno' inaccertabile sul piano dell'esperienza sensibile, la cui idealizzazione poteva essere tollerata solo come male utile e necessario ad ulteriori avanzamenti scientifici. In tal senso egli ebbe una posizione 'strumentalista' nei confronti dell'atomismo (Oldroyd 1989, pp. 233-234)¹⁴. Rievocare il nome di Ernst Mach, può voler dire insomma evocare una tradizione epistemologica per la quale la scienza non si limita a dare rappresentazioni formali, ma appunto si sforza di introdurre anche un legame sensibile tra rappresentazione ed esperienza, interpretando in senso intuitivo ed empirico le osservazioni e i dati raccolti.

In fondo, un atteggiamento del genere rispecchia lo spirito che condusse, proprio nel cuore della scienza quantistica, al principio di indeterminazione di Heisenberg, facendo del punto di vista dell'osservatore una variabile ineliminabile e decisiva delle possibilità di conoscenza. Ciò apriva quindi al pensiero di una certa relatività o almeno di una certa mutua relazione nei fenomeni osservati. Lo stesso Mach, ormai anziano, ebbe occasione di indicare come nelle ricerche condotte da giovane su durata e temporalità delle sensazioni uditive, si avesse una qualche evidenza di una più generale «interdipendenza dei fenomeni» (Mach 1893, pp. 541, 544), da cui derivare un modo di fare scienza orientato al «nesso tra il fatto osservato psicologicamente e il processo fisico (fisiologico) corrispondente» (Mach 1914, p. 59)¹⁵.

¹³Nel contesto di questi studi, Mach si interessò anche al «senso dello spazio» (*Raumsinn*) di cui è capace l'apparato uditivo (Mach 1886), ed intuì forme di adattamento dinamico nel funzionamento dell'apparato uditivo (Mach 1865a). Infine, qualche tempo dopo, egli identificò nel labirinto dell'orecchio medio l'organo 'stato-cinetico' che rende partecipe l'orecchio della «sensazione del movimento» (Mach 1875). Una ricostruzione complessiva di questi esperimenti di Mach si trova in Debru (2003).

¹⁴«Mach accetta la teoria atomistica come un male necessario fino a quando il processo scientifico non riuscirà a offrire una migliore sistemazione unitaria dei fenomeni naturali» (Sigismondi 2002, p. 11). Questa posizione critica finì in realtà col fare da stimolo per una generazione di scienziati più giovani, favorendo una trasformazione dell'atomismo e contribuendo dunque costruttivamente alle teorie quantistiche successive. Stando alla ricostruzione storica di Paul Feyerabend, alcuni dei primi lavori di Albert Einstein (nei primi anni del XX secolo), riprendono le obiezioni di Mach allo scopo di sollevarle in maniera produttiva: la fisica che ne emerse introduceva nell'indagine scientifica un punto di vista che Mach avrebbe reputato consono alla sua idea di 'scienza naturale'; cfr. il capitolo intitolato "Mach's theory of research and its relation to Einstein" in Feyerabend (1987).

¹⁵Per un approfondimento di questi temi nell'opera di Ernst Mach, si vedano Bozzi (1990) e D'Elia (1971). In D'Elia (1971) leggiamo: «Le ricerche intorno alle sensazioni di moto, a quelle della vista e dell'udito hanno portato Mach a questa conclusione: il dato immediato è un complesso di qualità sensibili» (p. 78), la cui sintesi va concepita

In questa prospettiva, si dovrà dire allora che il modello di Gabor si astiene dal giudizio circa l'oggettività delle proprietà che descrive nel fenomeno esaminato. Muovendo dalle limitazioni della teoria di Fourier (come d'altronde altri importanti scienziati suoi contemporanei¹⁶), Gabor perviene ad una rappresentazione del segnale esplicitamente comprensiva della determinazione temporale: in questo quadro formale, ogni cambiamento di scala (temporale) di osservazione potenzialmente conduce ad evidenziare proprietà diverse nel segnale sottoposto ad osservazione, all'interno di uno spazio di soluzioni piuttosto ampio i cui estremi vanno appunto dall'oscillazione armonica (funzione sinusoidale) alla discontinuità dell'impulso (funzione delta). Certo, in Gabor la nozione di 'scala temporale di osservazione' è del tutto implicita: renderla esplicita toccherà ad alcuni suoi continuatori, tra cui Jean Morlet (1931-2007), che arriveranno a formulare metodi di analisi in cui la determinazione della frequenza è addirittura sospesa e considerata derivativa. Come accenneremo più avanti, si parlerà allora di 'rappresentazioni tempo/scala', per esempio nell'analisi di segnali mediante *wavelet* (Kronland-Martinet e Grossmann 1991; Kronland-Martinet, Guillemin e Ystad 1997).

Probabilmente una certa propensione a stabilire un legame tra modello analitico ed esperienza uditiva spiega anche come mai Gabor utilizzi metafore esplicitamente musicali – quali «nota» o «trillo», usati in Gabor (1947c) in rapporto ovviamente a fenomeni di modulazione di frequenza. Peraltro, nel contesto della fisica dei primi anni del XX secolo, non era raro ricorrere a metafore musicali proprio in rapporto alla centralità del fluire del tempo nel vivo dell'esperienza sensibile. Mach stesso aveva accompagnato la sua 'analisi delle sensazioni uditive', oltre che con esempi relativi al parlato, con veri e propri esempi musicali¹⁷. Il padre fondatore della cibernetica, Norbert Wiener, in una conferenza tenuta a Gottinga nel 1925 aveva affermato che «la frequenza di una nota e la sua durata interagiscono in maniera molto complicata», e che la precisione nella determinazione dell'una va a svantaggio della precisione nella determinazione dell'altra (Werner Heisenberg era tra gli ascoltatori di quella conferenza)¹⁸. È da segnalare che il matematico francese Jean Ville (1910-1989) nel 1947 arrivò a delineare una propria forma di analisi quantistica del segnale introducendo come argomento cruciale i risultati paradossali ai quali porta l'applicazione dell'analisi di Fourier a interi passaggi musicali (Ville 1948, p. 64). Gabor sapeva che il suo metodo di scomposizione del segnale era «piuttosto sconveniente» nel senso che i segnali elementari in esso utilizzati in definitiva sono «funzioni [che] non formano un insieme ortogonale» (Gabor 1947a, p. 592; qui p. 12). Il punto venne approfondito successivamente da vari ricercatori e gruppi di ricerca, tuttavia – dopo un primo tentativo a metà degli anni sessanta (Helstrom 1966) – solo negli anni settanta e ottanta questa non-ortogonalità è stata descritta rigorosamente, insieme ad alternative adeguate (Balian 1981; Bastiaans 1980; Morlet, Kronland-Martinet e Grossmann 1987). In particolare, Jean Morlet (inizialmente attivo in ambito geofisico) sostituì i segnali elementari di Gabor con altri segnali pure tempo-finiti ma di durata inversamente proporzionale alla banda di frequenza o scala di osservazione, dando così avvio a metodi di rappresentazioni basati su pacchetti d'onda, o *wavelet* (Meyer 1993; Young 1993)¹⁹.

come «una attività del sistema nervoso» (p. 50). A tal proposito, vorrei segnalare come questi aspetti del lavoro di Mach siano stati visti come una forma antesignana di «costruttivismo fenomenologico» (Glaserfeld 1975; Riegler 2012).

¹⁶Come suggerisce Yves Meyer, intorno al 1945 anche personaggi quali Léon Brillouin, Claude Shannon e altri avevano chiare le limitazioni dei metodi basati sul modello analitico di Fourier (Meyer 2008).

¹⁷Si vedano i capitoli "The sensation of time" e "The sensation of tone" in Mach (1914, pp. 245-261, 262-309).

¹⁸Si veda Wiener (1964, pp. 105-107), la cui redazione iniziale è della metà degli anni cinquanta. E si veda la ricostruzione data in Conway e Siegelman (2005, pp. 84-86).

¹⁹Nello sviluppo dell'analisi *wavelet* va segnalato il lavoro portato avanti dal gruppo di lavoro dell'Università di Marsiglia (Morlet, Kronland-Martinet, Grossmann e altri) anche per i risvolti diretti sull'elaborazione di segnali

3 Dispositivi

Sarà utile ora segnalare una serie di circostanze tecnologico-musicali all'interno delle quali il modello teorico dei quanta acustici di Gabor ha avuto ripercussioni più o meno dirette.

3.1 Meyer-Eppler, il *visible speech process*, e il *vocoder*

Nell'agosto 1950 si tenne a Darmstadt una serie di incontri dal titolo *Die Klangwelt der elektronischen Musik*. Ne furono protagonisti Werner Meyer-Eppler (1913-1960) e Robert Beyer (1901-1989), che nell'occasione incontrarono il compositore Herbert Eimert (1897-1972) insieme al quale poco più tardi fondarono lo Studio für Elektronische Musik, alla stazione radio WDR di Colonia (Beyer 1953)²⁰. Nel corso degli incontri (seguiti tra gli altri dall'anziano Edgard Varèse e da un giovanissimo Karlheinz Stockhausen), Meyer-Eppler tenne un intervento nel quale si soffermò sulla matrice di Gabor (Ungeheuer 1992, p. 104). Fu quasi certamente la prima volta che il lavoro di Gabor venne esposto a musicisti e musicologi.

Non possiamo accertare quando Meyer-Eppler abbia conosciuto il modello di Gabor. In ogni caso, in quanto assistente all'Istituto di Fonetica e Scienze della Comunicazione dell'Università di Bonn, egli aveva certamente accesso a molte delle pubblicazioni dell'epoca in ambito di teoria dell'informazione, oltre che di fonetica (ambito più specifico della sua ricerca). Era proprio all'incrocio di teoria dell'informazione e fonetica che gli scritti di Gabor venivano collocati, in quella fase. In un libro apparso qualche anno dopo, Meyer-Eppler illustra il diagramma informativo di Gabor (Meyer-Eppler 1959, pp. 25-27) e cita vari articoli del collega anglo-ungherese, tra cui «Theory of communication» (p. 14) e «New possibilities in speech transmission» (pp. 26 e passim). Ma già nel 1955, in un articolo sul primo numero della rivista *Die Rehie* (diretta da Eimert e Stockhausen), egli aveva abbozzato un approccio al suono in termini informativi, soprattutto al fine di dar conto di aspetti aleatori del suono che ne fanno un fenomeno essenzialmente aperiodico, quindi relativamente consono ad essere affrontato nei termini della teoria di Fourier (Meyer-Eppler 1955). Dall'articolo si deduce anche che Meyer-Eppler conosceva alcuni degli esperimenti di psicofisica citati da Gabor, e anche la precedente intuizione di Stewart (1931) circa la relazione di incertezza $\Delta t \Delta f$ richiamata in Gabor (1946), di cui abbiamo fatto cenno²¹.

All'Istituto di Fonetica di Bonn, Meyer-Eppler poteva utilizzare uno strumento di recentissima disponibilità chiamato *visible speech process* che permetteva di realizzare rappresentazioni sonografiche (fu usato anche per preparare il sonogramma apparso nel 1955 in apertura del primo numero di *Die Rehie*, illustrante un passaggio del brano elettronico *Glockenspiel* composto da Eimert due anni prima). Tale dispositivo nasceva dal lavoro condotto a partire dal 1941 da Ralph Potter e altri presso i laboratori Bell Telephone, negli Stati Uniti. Gabor (ibid., p. 432) stesso ne fa menzione, citando anche le pubblicazioni in cui Potter ne illustrò i criteri (Gabor 1947a, p. 594; qui p. 12)²². Gabor cita anche, e anche più in particolare, un altro ricercatore dei laboratori Bell Telephone, Homer Dudley, che anni prima aveva progettato il

musicali. Si veda la ricostruzione storico-scientifica in Farge et al. (2012), e si vedano i contributi di Daniel Arfib, Jean-Claude Risset, Alex Grossman e Richard Kronland-Martinet in De Poli, Piccialli e Roads (1991).

²⁰ Si veda anche la ricostruzione storica in Morawska-Büngeler (1988, pp. 9 e sgg.).

²¹ Si veda nota 9.

²² Riferendosi a questo tipo di apparecchiature, Gabor parla di «sound spectrograph» (Gabor 1946, p. 432). A partire da (Gabor 1952), egli sostituisce l'espressione col termine «sonogram», più adatto ad evitare confusioni altrimenti possibili, e d'altra parte in uso ancora oggi.

vocoder (Dudley 1936, 1939) definito da Gabor una «ingegnosa macchina di analisi e sintesi della voce parlata» (Gabor 1946, p. 442)²³.

Quel che interessa maggiormente Gabor, in dispositivi del genere, è l'analogia formale con la sua matrice di quanta di informazione: anche tali dispositivi infatti implicavano una forma di discretizzazione dei domini di rappresentazione. Riferendosi al vocoder, Gabor in particolare pone la questione in termini della massima «compressione» d'informazione possibile capace di preservare l'intelligibilità del parlato (ibid., p. 445). È questa ricerca dell'unità minima d'informazione che ai suoi occhi rende il vocoder di grande interesse, indipendentemente dalla qualità del suono che esso poteva generare, che in effetti gli appare piuttosto innaturale e «machine-made» (Gabor 1952, p. 40), e che Gabor giudica comunque migliorabile aumentando i canali del processo di analisi e sintesi della macchina di Dudley. La terza parte di Gabor (1946) è appunto dedicata ad un metodo per «comprimere» ed «espandere» il suono.

Vi torneremo più avanti. Per ora notiamo che, declinata in questo modo, la problematica posta da Gabor è quella della riduzione dei dati, e naturalmente si inserisce in un quadro assai generale degli sviluppi delle tecniche di comunicazione; per quel che riguarda i temi che ci interessano più da vicino, essa viene intesa da Gabor come 'riduzione dei dati in base a criteri percettivi', e come tale riaffiorerà decenni dopo, prima tangenzialmente alla ricerca sulla sintesi digitale del suono – almeno in una fase in cui, in quel settore, le indicazioni della psicoacustica sono apparse decisive (Risset e Wessel 1982a) – e poi soprattutto nello sviluppo di algoritmi di compressione per la trasmissione di segnali audio (e non solo) lungo le reti telematiche (Brandenburg 1999).

3.2 Sintesi ed elaborazione granulare del suono

Ci stiamo dunque avvicinando agli aspetti di carattere più tecnologico e ingegneristico del lavoro di Gabor sui quanta acustici. In appendice alla prima parte di Gabor (1946), viene descritto un dispositivo per la generazione del suono utile a verificare aspetti del modello teorico proposto. Il dispositivo sfrutta mezzi ottici elettromeccanici, in parte basati su precedenti studi sulla riverberazione artificiale del suono (Goldmark e Hendricks 1939). Lo si può pensare come il primo strumento mai ideato per la sintesi granulare del suono (Roads 2001a, p. 302). Va precisato però che, per Gabor (1946, p. 440), non si tratta tanto di un «metodo praticabile» ma di un momento di verifica sperimentale di certi effetti di modulazione (*sidebands*) insiti, in linea di principio, in qualsiasi realizzazione concreta del modello teorico, e simili comunque a fenomeni già noti in ambito di teoria delle comunicazioni.

Dire che Gabor «aveva preconizzato una sintesi dei suoni» a base granulare (Xenakis in Restagno 1988, p. 30) rappresenta, da un certo punto di vista, una leggera forzatura. Se non altro, all'epoca di Gabor il concetto di sintesi del suono non ha un suo statuto definito: da una parte, appare del tutto implicito nella costruzione di strumenti musicali elettronici; dall'altra, vale come strumento di verifica della coerenza di un modello teorico – come appunto nel caso del generatore di suono descritto alla fine della prima parte di Gabor (1946). Come segnala

²³Gabor si trattiene più a lungo sul vocoder di Dudley in Gabor (ibid., pp. 40-41). Per un quadro generale sullo sviluppo del vocoder e le sue ripercussioni anche musicali, si veda Zavagna (2013).

Yves Meyer, l'idea di sintesi del suono era stata in qualche modo preavvertita da Jean Ville (negli stessi anni delle pubblicazioni di Gabor che abbiamo preso in esame) appunto in quanto momento sperimentale complementare alla descrizione di una qualsiasi forma di analisi del segnale. Più in particolare, l'insieme degli atomi tempo/frequenza del modello di Gabor

... costituisce una collezione di segnali elementari che è fin troppo ampia per fornire una rappresentazione univoca [e] ciò porta a dover scegliere quella che risponde meglio rispetto a un certo criterio. Il criterio potrebbe essere quello suggerito da [Jean] Ville: l'analisi o decomposizione di un segnale in atomi tempo/frequenza dovrà essere messa in relazione ad una sintesi (Meyer 1993, p. 64).

Al di fuori dei centri di ricerca scientifica e dei laboratori dei costruttori di strumenti elettronici, l'idea di 'sintesi del suono' come formalismo coerente passibile di implementazioni diverse, a fini musicali o di altro tipo, si delinea solo qualche anno dopo le proposte di Gabor. Da una parte come schema concettuale che guida l'implementazione di processi di generazione del suono nel contesto degli sviluppi della musica elettronica analogica e specialmente informatica. Dall'altra, in campo più strettamente scientifico, come esito di una sempre maggiore specializzazione, e anche di una scissione sempre più netta tra esigenze sperimentali e sviluppi teorici.

In tema di implicazioni pratiche, ciò che preoccupa Gabor (1946, pp. 437-438) molto più della possibilità di una sintesi del suono è la velocità di trasmissione necessaria per trasportare i quanta di informazione attraverso un canale – tema ovviamente cruciale e decisivo nell'ambito della teoria delle comunicazioni. Ragionando su questo punto, Gabor perviene a calcolare valori che, non a caso, implicano una velocità di trasmissione inversamente proporzionale al doppio della larghezza di banda²⁴. Date le limitazioni caratteristiche dei mezzi di comunicazione dell'epoca (ivi comprese le trasmissioni radiofoniche e televisive, ancora soggette a fattori troppo aleatori), Gabor suggerisce che l'unica alternativa per pervenire presto a condizioni operative efficienti consiste nel ridurre al minimo l'informazione da trasmettere, escogitando «metodi di compressione-espansione» del segnale (ibid., p. 438) e cioè «condensando il contenuto di informazione ad un minimo» (ibid., p. 445).

Il suo obiettivo diventa allora quello di verificare l'utilità del modello teorico al fine di codificare («condensare») il segnale ad un capo di una catena di trasmissione, per poi decodificarlo («espanderlo») all'altro capo (ibid., p. 445). A tal fine, Gabor propone il progetto di un dispositivo che chiama «convertitore di frequenza», per indicare il fatto che esso può modificare («convertire») la frequenza e allo stesso tempo «non cambiare il ritmo, ovvero l'articolazione temporale, di segnali sonori del parlato o musicali» (ibid., p. 452). L'idea viene così riassunta:

il segnale [da elaborare], registrato su un supporto in modo permanente o in modo temporaneo, passa accanto ad una finestra fissa, dal contorno opportunamente graduato [involuppo di ampiezza] e viene, durante il tempo di esposizione in questa finestra, letto più volte da rilevatori [*pick-ups*] che si susseguono a velocità differente dalla velocità di scorrimento del supporto di registrazione (ibid., p. 453)²⁵.

²⁴Ciò andrebbe ricollegato al teorema del campionamento di Shannon, che d'altra parte derivava dal lavoro di Hartley e Nyquist più volte citato da Gabor.

²⁵Si noti, in questo passaggio, il termine «finestra» [*window*], che più tardi sarà integrato al vocabolario dell'elaborazione numerica e dell'analisi tempo/frequenza, e che equivale alla durata di esposizione – e quindi all'involuppo di ampiezza (o 'funzione finestra') – di un certo segmento minimo di segnale.

Per costruire un dispositivo del genere, una volta esclusi supporti facilmente danneggiabili come «dischi grammofonici e relative puntine di lettura», bisogna considerare le «possibilità promettenti» (ibid., p. 453) offerte da tecnologie elettromeccaniche messe a punto qualche anno prima, e ancora ampiamente in corso di perfezionamento nel momento in cui Gabor scrive. Un primo metodo, o «metodo cinematografico», si baserà su un proiettore per pellicole cinematografiche da 16 mm (dotate di ‘colonna sonora’) opportunamente modificato mediante un tamburo rotante che provvede a molteplici letture di una medesima ‘finestra’ di esposizione del segnale impresso sulla pellicola. Una descrizione più approfondita di questo primo metodo sarà fornita da Gabor insieme alla richiesta di brevetto nel 1944 (Gabor 1949). Un secondo metodo sfrutta invece i principii della magnetizzazione e può ricorrere cioè alla registrazione magnetica su cavo (*wire recorders*) o su nastro (*tape recorders*).

Sarà proprio modificando il funzionamento di un magnetofono a nastro che l’idea di Gabor prenderà piede. Si tratta di sostituire il normale blocco di lettura del magnetofono (la ‘testina’ nel cui campo magnetico passa il nastro) con un blocco dotato di una o più testine di lettura e capace di girare su sé stesso a velocità diversa (superiore o inferiore) rispetto alla velocità di scorrimento del nastro, e di registrare il segnale rilevato da questo blocco rotante su un secondo magnetofono. Il segnale risultante presenterà allora un numero proporzionale di quanta di informazione dal contenuto in frequenza identico a quello dell’originale: lo si potrà allora riprodurre alla medesima velocità di registrazione, ottenendo un suono di durata diversa (per esempio più lungo, in proporzione al numero di testine sul blocco di lettura e alla velocità di rotazione del blocco stesso) senza alterazioni (o almeno senza deformazioni troppo evidenti) del contenuto in frequenza; oppure lo si potrà riprodurre a velocità diversa dalla velocità di registrazione, regolata in modo da ottenere un suono di durata identica all’originale ma con conseguente alterazione del contenuto in frequenza.

Si tratta della prima forma di trattamento del segnale in cui tempo e frequenza siano modificabili in modo virtualmente indipendente l’uno dall’altro. Pur con tutte le differenze tecnologiche, si tratta dello stesso processo effettuato, vari decenni dopo, da certi algoritmi di *time-stretching* (o di *frequency-stretching*, se si vuole richiamare l’espressione «frequency converter» di Gabor) di segnali audio digitali (Arfib 1991; Jones e Parks 1988). Va infine segnalata l’osservazione di Gabor secondo la quale, in linea di principio, l’operazione del suo «convertitore di frequenza» andrebbe effettuata non sull’intero spettro del segnale iniziale ma su «almeno due porzioni dello spettro, diciamo tra 25 e 500 Hz, e tra 500 e 7500 Hz» (Gabor 1946, p. 454). L’osservazione rimase probabilmente senza seguito, tuttavia oggi, nell’ambito delle tecniche di analisi-sintesi del suono e in quello parallelo della compressione di dati audio, è normale procedere con metodi di codifica applicati indipendentemente su (molte più di due) porzioni dello spettro, ottimizzandone il funzionamento in rapporto alle corrispondenti grandezze di tempo e frequenza.

3.3 Moles, il *phonogène*, il *time-compressor*, il *tempophon*

Nel 1958 Abraham Moles (1920-1992) parla del fenomeno musicale nei termini di una «atomizzazione dell’oggetto sonoro, proposta dalla teoria dell’informazione, in elementi di durata percettiva» (Moles 1969, p. 173). È con tale orientamento che qualche anno prima, ancora molto giovane, egli si era accostato allo studio degli allora nuovissimi mezzi di produzione musicale elettroacustici per giungere infine a delineare una sua ‘teoria della musica sperimentale’ (Moles 1961a). Verso la fine degli anni quaranta, Moles aveva iniziato una

collaborazione importante con Pierre Schaeffer al GRM di Parigi²⁶. Nei suoi scritti degli anni successivi, troviamo citati sia i metodi sonografici di Potter sia il lavoro di Meyer-Eppler, oltre ad altre fonti che ben si sovrappongono ai riferimenti bibliografici di Gabor. Moles non cita Gabor, pur essendo piuttosto verosimile che ne conoscesse la ricerca, se non attraverso gli scritti appunto di Meyer-Eppler, almeno a partire dall'articolo dello stesso Gabor (1948b) apparso in francese su *L'Onde électrique*, cui abbiamo accennato sopra²⁷.

L'idea di Moles consiste nel quantizzare i 'diagrammi di uguale intensità sonora' di Fletcher-Munson, cioè le mappe psicoacustiche fondamentali del campo di sensibilità del sistema uditivo umano, per ottenerne dei «quanti di percezione» (Moles 1969, pp. 167-172). L'idea appare già nei diagrammi pubblicati da Moles in Schaeffer (1952) e può essere assimilata effettivamente ad una ripresa del diagramma informativo gaboriano riformulato in termini psicoacustici. Nei primi mesi del 1950²⁸ il tecnico del GRM, Jacques Poullin (1920-2014), costruisce per Moles e per Schaeffer il *phonogène*, apparecchiatura che poteva trasformare il suono registrato su nastro magnetico secondo diverse possibilità, in modi virtualmente simili a quelli del «convertitore di frequenza» di Gabor, e ottenendo delle «trasposizioni totali» (Schaeffer 1966, p. 407), in cui spettro e durata sono gestiti indipendentemente. Nel descriverne le possibilità, Poullin (1954) assimila le 'trasposizioni di durata' al *ralenti* del cinema. Il dispositivo, che utilizzava un blocco rotante di quattro testine di lettura (Moles 1961a, pp. 71-76) e che già nel 1952 Moles (1969, p. 310) accostò al vocoder, fu brevettato da Schaeffer e fu oggetto di qualche tentativo di commercializzazione.

Possibilità simili, e per certi versi più direttamente correlate al funzionamento del «convertitore di frequenza» di Gabor, erano quelle del *tempophon* (o *zeitregler*), costruito e commercializzato nel corso della prima metà degli anni cinquanta da Anton Springer, inizialmente illustrato in pubblico nello studio di Hermann Scherchen a Gravesano, in Svizzera (Springer 1955), e quelle del *time-compressor* sviluppato da Grant Fairbanks all'Università di Illinois (Fairbanks, Everitt e Jaeger 1954). Quest'ultimo, ripreso e perfezionato in ambito statunitense nel corso degli anni sessanta, ebbe una qualche notorietà tra gli esperti e gli appassionati di registrazione magnetica, e fu ampiamente adoperato nel contesto della ricerca sulla comprensione del parlato (Foulke 1971)²⁹.

Il *tempophon* di Springer andava semplicemente collegato per via puramente meccanica ad un normale magnetofono, come una protesi, il che ne facilitava l'uso e la diffusione tra tecnici e musicisti. Non a caso fu presto disponibile allo Studio di Fonologia Musicale della RAI di Milano. Nel 1956, il fisico e fondatore dello studio milanese, Alfredo Lietti (1919-1998), ne dava questa succinta illustrazione³⁰:

Questo dispositivo usato con un magnetofono normale consente di variare la durata del tempo della registrazione senza alterare l'altezza dei suoni registrati [...]. Il principio di

²⁶Il capitolo finale in Schaeffer (1952), intitolato "Esquisse d'un solfège concret", fu scritto in collaborazione con Moles. Secondo la ricostruzione di Mathien (2007), Moles conobbe Schaeffer nel 1945, dunque ancor prima delle circostanze che nel 1948 portarono Schaeffer alla ricerca della 'musica concreta'.

²⁷Si veda nota 7.

²⁸Desumiamo questa datazione da Schaeffer (1952, p. 97).

²⁹Qualche anno più tardi, il lavoro di Fairbanks costituì anche la base di alcuni primi tentativi di compressione e dilatazione temporale del parlato realizzati mediante computer (Cramer e Talambiras 1971; Huggins 1974). È significativo inoltre come nel contesto di queste ricerche, e particolarmente in Cramer e Talambiras (1971), venga richiamato il lavoro di Gabor e di Springer.

³⁰Prendo la citazione dalla copia personale di un documento interno dello Studio di Fonologia privo di numerazione di pagina. Il documento nel 1956 venne riprodotto quasi alla lettera in un numero della rivista *Elettronica*. Più recentemente è stato ripubblicato in Lietti (1998).

funzionamento dell'apparecchio è il seguente: il nastro viene riprodotto, anziché da una testina fissa, da un gruppo di quattro testine montate a 90° tra loro su un disco rotante. Sia V_a la velocità di scorrimento del nastro e V_k la velocità tangenziale del [blocco] porta-testine [...] Si fa in modo che $V_a + V_k = V_r$, dove V_r è la velocità nominale della registrazione [15 o 30 pollici al secondo]. Su un tempo T la lunghezza l di nastro utilizzata [per registrare un suono] è $l = TV_a$. Agli effetti della corretta riproduzione [...] senza l'alterazione delle frequenze è necessario che il nastro sia riprodotto alla velocità relativa V_r , che corrisponde come si è visto a quella normale.

Pertanto, riproducendo il nastro lungo l alla velocità V_r si ha una durata di riproduzione diversa dalla durata originale, ovvero di $T' = l/V_r = 1/(V_a + V_k) \neq T$. In particolare:

$$V_k = 0 \rightarrow T' = T$$

$$V_k > 0 \rightarrow T' < T$$

$$V_k < 0 \rightarrow T' > T$$

Queste relazioni indicano la modifica di durata senza alterazione di frequenza. Ovviamente è possibile anche ottenere il risultato inverso, cioè modificare la frequenza senza alterare la durata.

Il *tempophon* fu utilizzato in produzioni musicali importanti, per esempio a Milano nel 1958, nella realizzazione di materiali sonori utilizzati in *Thema (Omaggio a Joyce)* di Luciano Berio (Di Scipio 2000; Zavagna 1992). A Colonia, tra il 1960 e il 1962, Herbert Eimert ne esplorò le potenzialità nella realizzazione di *Epitaph für Aikichi Kuboyama*, in modo peraltro alquanto singolare, 'frantumando' e rendendo deliberatamente irricognoscibili i suoni di una voce preregistrata, e cioè puntando tutto sugli artefatti di modulazione dei processi di dilatazione in tempo e frequenza – artefatti d'altra parte non trascurabili in condizioni tecniche men che ideali. In tempi recenti, anche le corrispondenti forme di *time-stretching* in ambito di elaborazione numerica di segnali musicali sono state adoperate non solo con finalità per così dire 'corrette' (cioè per modifiche della durata e/o della frequenza prive di artefatti udibili, per esempio per scopi professionali di *sound design*), ma spesso anche con finalità più creative e del tutto arbitrarie, cioè miranti a non mascherare (o anche ad esibire) gli effetti residuali del processo tecnico, particolarmente evidenti con dilatazioni estreme della durata. Con ciò ritorniamo, in un certo senso, agli esperimenti di Gabor: i quali, come si è visto, miravano certo a verificare la coerenza teorica del modello di analisi, ma anche a studiare appunto gli effetti di modulazione risultanti dall'applicazione pratica del modello teorico.

È vero comunque che, al di là delle particolari finalità perseguite, dispositivi quali il *tempophon* e il *phonogène* possono essere considerate «macchine analitiche», per usare un'espressione di Moles (1957), cioè dispositivi operanti in base a rigorosi principi di analisi e rappresentazione tempo/frequenza del segnale. Nel caso in questione, erano proprio quei principi ad essere del tutto nuovi: le implicazioni pratiche ed artistiche nel potenziale tecnico che si dischiudeva con strumenti quali il «convertitore di frequenza» di Gabor, inizialmente non potevano che rimanere ampiamente imprevedibili.

4 Analogie musicali

4.1 Xenakis, sintesi granulare, «nuvole di suono»

Tra il 1958 e il 1960, Iannis Xenakis (1922-2001) traccia le premesse teoriche ed operative della composizione di ‘musica stocastica’, ma contestualmente avanza anche una sua ‘ipotesi granulare’ circa la natura stessa del suono:

Ogni suono è un’integrazione di grani, di particelle sonore elementari, di quanta sonori. Ciascuno di questi grani elementari ha una tripla natura: durata, frequenza e intensità. Ogni suono, ogni variazione sonora [...] è un assemblaggio di grani elementari sufficientemente numerosi e adeguatamente disposti nel tempo (Xenakis 1963, p. 61) e (Xenakis 1992, p. 43).

L’ipotesi viene avanzata nel quadro dei preparativi che portano il compositore a scrivere *Analogique A et B* (per nove archi e nastro magnetico, 1958-1959), e precisamente nel quadro della lavorazione in studio (al GRM di Parigi) della parte su nastro magnetico, inizialmente pensata come brano a sé stante, intitolato appunto *Analogique B*. L’ipotesi granulare di Xenakis rappresenta

... una prima approssimazione delle considerazioni introdotte in teoria dell’informazione da Gabor. Nella cosiddetta matrice di Gabor, un evento sonoro si risolve in segnali elementari acustici di durata effettiva molto corta, e di ampiezza suddivisa in quanti, nel senso della teoria dell’informazione. Questi segnali elementari costituiscono funzioni sinusoidali aventi un inviluppo ‘a campana’, ovvero di tipo gaussiano, ma possono essere rappresentati abbastanza bene anche con onde sinusoidali di durata ridotta aventi inviluppo rettangolare (ibid., p. 373).

Nel 1959, Xenakis dunque intende comporre il suono a partire da «grani sonori del tipo di Gabor» (Xenakis 1963, p. 122) e (Xenakis 1992, p. 103), creando trame sonore in evoluzione che egli assimila a «nuvole di suono»³¹. Nel 1967, quando quella fase di sperimentazione appare ormai superata e Xenakis è immerso in progetti molto diversi, egli insiste tuttavia nel concepire suono e musica «come una nuvola gigantesca di corpuscoli sonori, di granelli sonori» (Xenakis 1982, p. 30). Il concetto viene ribadito in occasioni successive, almeno fino all’inizio degli anni novanta, quando Xenakis realizza i suoi due ultimi brani elettroacustici, interamente computerizzati, *Gendy3* (1991) e *S.709* (1994): pur con tecniche di generazione del suono diverse (e tuttavia operanti esclusivamente nel dominio del tempo), essi confermano che il legame fra procedure stocastiche di composizione e tecnologie di generazione del suono va ritenuto indissolubile e sistematico nella concezione musicale di Xenakis (Di Scipio 2015).

Dobbiamo aggiungere che Xenakis coglie in Gabor soprattutto la critica del modello di Fourier, nella sua dimensione atemporale e astratta rispetto alla dinamicità dei fenomeni acustici, inclusi quelli di interesse musicale. Di questa visione problematica rispetto all’acustica musicale tradizionale (e alle sue ripercussioni sulla teoria musicale), egli farà un tratto ricorrente in tutto il suo lavoro successivo, in particolare nel contesto di composizioni realizzate con mezzi elettroacustici e informatici – si vedano vari spunti in proposito in Xenakis (2003). Secondo Angelo Orcalli (1993, p. 87), «l’adesione di Xenakis alla concezione atomistica del suono riflette l’attenzione del compositore verso le tendenze più analitiche della speculazione

³¹Riguardo a questa metafora per così dire ‘atmosferica’, e riguardo ad *Analogique A et B* nel suo insieme, mi permetto di rinviare a Di Scipio (2003, 2006b).

scientifico [del XX secolo]» e manifesta «un'istanza teoretica che sta a fondamento di tutta la sua produzione musicale». Si potrà notare, però, che se Gabor giunge «fino ai confini tra teoria dei segnali e psicoacustica» collegando «le dimensioni logiche del segnale con le capacità del ricevitore umano» (ibid., pp. 85, 86), ciò risulta particolarmente conforme alla poetica di Xenakis, col suo tentativo estetico di fondere una certa immediatezza o anche ruvidezza dell'esperienza sensibile del suono, e una dimensione di astrazione logico-costruttiva.

In alcune occasioni Xenakis ha rifiutato una diretta associazione tra la sua ipotesi granulare e il modello di Gabor, quasi che l'accostamento potesse in qualche modo sminuire l'originalità del suo lavoro. Per esempio, nel 1992 egli parla dei quanta sonori come di una ricerca del tutto personale, «erroneamente attribuita a Gabor» (Xenakis 1992, p. xiii), e dichiara di non essere stato a conoscenza del modello di Gabor al momento di iniziare la lavorazione di *Analogique B*. La sua ipotesi granulare andrebbe invece collegata con studi svolti da Albert Einstein «fra il 1917 e il 1918» (Xenakis in Restagno 1988, p. 30), nel contesto dei quali sarebbe stato coniato il termine 'fonone' (in parallelo con 'fotone', cioè quanto di luce)³². In ogni caso, dobbiamo dedurre che soltanto dopo o durante la lavorazione di *Analogique B* Xenakis venne a conoscenza della proposta scientifica di Gabor, forse attraverso Meyer-Eppler (1959), e che la vide come un'autorevole conferma della sua personale ipotesi (Orcalli 1993, p. 81). Personalmente direi che l'ipotesi di Xenakis possa anche derivare dalle importanti indicazioni che egli ricavava dalla conoscenza e dallo scambio personale con Abraham Moles (Xenakis 1962)³³.

Sicuramente anche alcuni dei compositori attivi allo studio di musica elettronica di Colonia furono a conoscenza del modello di Gabor, dato il ruolo decisivo che svolgeva Meyer-Eppler nello studio. Va segnalata peraltro la circostanza che un brano paradigmatico come *Kontakte* di Stockhausen (per pianoforte, percussioni, e nastro magnetico, 1960) – l'opera musicale che più ha introdotto nell'estetica di Colonia l'uso di tessiture sonore complesse e di processi di microframmentazione sonora – fu realizzato proprio mentre veniva preparata la pubblicazione di Meyer-Eppler (1959), dove, come si è detto, compare anche una descrizione della matrice di Gabor. Ciononostante, accostare la 'modulazione di impulsi' e altre soluzioni tecniche impiegate da Stockhausen al modello analitico di Gabor significa effettivamente suggerire un'associazione troppo generica e forzosa. In ogni caso, pur nel suo grandissimo rilievo musicale, *Kontakte* non aprì ad approfondimenti in tal senso.

In retrospettiva, il processo di costruzione del suono attuato per la realizzazione di *Analogique B* è stato assimilato ad una forma particolare di 'sintesi granulare', a partire da Roads (1978). Tuttavia, come vedremo subito, esso presentava approssimazioni anche molto importanti rispetto al modello di Gabor. Ciò è del tutto ragionevole, visto che, nell'insieme, il valore del contributo di Gabor si fonda naturalmente sulla coerenza formale nel render conto di qualsiasi segnale mediante una costruzione teorica rigorosa, laddove il principio che guida Xenakis è di ordine sintetico, cioè generativo, non analitico, e vale solo per la sua capacità di dar luogo a costruzioni sonore di cui soltanto la musicalità del compositore stabilisce la coerenza. L'ipotesi granulare di Xenakis, pur 'teorica'³⁴, va considerata essenzialmente come

³²Xenakis non offre alcuna indicazione bibliografica che chiarisca questo suo riferimento ad Einstein.

³³Tra coloro che operavano nel contesto del GRM nella seconda metà degli anni cinquanta, Moles fu certamente tra i pochi che ebbero forte sintonia con Xenakis. Anni più tardi, Moles divenne prezioso riferimento anche per Jean-Claude Risset, che spinse a trasferirsi nel 1964 negli Stati Uniti per approfondire insieme a Max Mathews, presso i laboratori Bell Telephone, i fondamenti della sintesi numerica del suono (uno snodo importante per l'evoluzione successiva dell'informatica musicale e della composizione al computer).

³⁴Si veda l'articolo di Solomos in questo numero di «Musica/Tecnologia».

procedura operativa, come idea che orienta un procedimento tecnico e creativo di composizione del suono (o meglio di ‘microcomposizione’ in questo caso), secondo motivazioni tutt’altro che analitiche (va tenuto presente che, anche per formazione, l’attitudine di Xenakis fu complessivamente più ingegneristica che scientifica, più pratica che teoretica).

Il procedimento di costruzione del suono attuato per *Analogique B* fu piuttosto rudimentale e faticoso, non solo per la relativa praticità dei mezzi elettroacustici allora utilizzabili³⁵, naturalmente, ma in fondo anche per le stesse regole che il compositore volle tematicamente seguire, di tipo probabilistico, le quali difficilmente si sarebbero potute rivelare utili nel far emergere, dalla trama discreta di grani, le sonorità fuse e continue che Xenakis invece sperava di conseguire (Di Scipio 1997). Xenakis approssimò i segnali elementari di Gabor con onde sinusoidali di circa 40 millisecondi, aventi involuppo praticamente rettangolare anziché gaussiano (dettaglio non marginale sia in termini di coerenza analitica sia in termini di pregnanza dei risultati di sintesi). Un’altra differenza non trascurabile sta nel fatto che, mentre il modello di Gabor implica una successione ordinata di quanta acustici, ovvero una disposizione coerente alla sequenzialità temporale del segnale analizzato, Xenakis invece ordina i suoi granelli sonori conformandosi da una parte alle comprensibili costrizioni pratiche, e dall’altra ai criteri di distribuzione probabilistici che si era assegnato: la linearità della successione, che in Gabor è ovvia condizione di coerenza, viene del tutto sospesa e disarticolata dal compositore.

Con una terminologia affermatasi successivamente, la procedura di Xenakis va considerata come una forma di sintesi granulare asincrona. Solo una forma di sintesi granulare sincrona potrebbe, a rigore, essere ricondotta al modello di Gabor. Non a caso, quasi tutte le tecniche granulari di concreto interesse musicale sono state di tipo asincrono, mentre quelle di tipo sincrono sono state più spesso utilizzate per più specifici interessi di ricerca (Cavaliere e Piccialli 1997; De Poli e Piccialli 1991) e possono anche riallacciarsi a certe tecniche di analisi e sintesi della voce, come per esempio nelle procedure di sintesi con funzioni d’onda formantiche, FOF (Rodet 1984).

4.2 Computer music e oltre

Dopo aver seguito un seminario di Xenakis alla Indiana University, nel 1972, Curtis Roads per primo si pose il compito di implementare la sintesi granulare al computer (Roads 1978)³⁶. I suoi esperimenti riprendono quindi certi aspetti della sperimentazione di Xenakis, ma muovono anche da una maggiore consapevolezza del modello di Gabor. Roads realizza grani della durata fissa di 40 millisecondi, ma con involuppi di forma gaussiana, e segue regole statistiche per la distribuzione di grani nel tempo e nella frequenza (Roads 2001a, p. 302), ma di più semplice gestione rispetto a quelle di Xenakis. Procedendo con lunghe liste di istruzioni per il sistema di programmazione MUSIC V di Max Mathews, Roads realizza nel 1974 un primo studio musicale della durata di poche decine di secondi, *Klang-1*. Quel che Roads coglie in Gabor sin dall’inizio è la mescolanza di «approfondimento teorico [...] e pratica sperimentale» (Roads 1991, p. 45). Ciò lo porta, diversamente da Xenakis, a valutare attentamente il «convertitore di frequenza» di Gabor. Allo stesso tempo, tuttavia, Roads prende spunto dal modello teorico gaboriano per dedurne, ai suoi fini musicali, tutta una

³⁵Il laborioso procedimento di realizzazione in studio di *Analogique B* è ricostruito, fin dove possibile, nel documento inedito (Di Scipio 2006a).

³⁶Sembra comunque che Xenakis, al tempo di *Analogique B*, abbia non solo ipotizzato l’utilizzo di sistemi di calcolo (Xenakis 1963, p. 72), ma anche fatto un concreto ma vano tentativo a quel fine (Leprince-Ringuet 1981).

serie di variazioni circa la struttura degli atomi sonori, optando talvolta per soluzioni che si risolvono in complesse forme di modulazione di impulsi (Roads 2001b), dunque in sostanza più prossime all'operatività di Stockhausen in *Kontakte*, che non a Xenakis in *Analogique B*. In ogni caso, nel corso degli anni il suo lavoro ha contribuito come nessun altro a far conoscere nel mondo della musica sia l'ipotesi granulare di Xenakis sia gli elementi essenziali della teoria di Gabor. Il momento culminante di quest'opera di divulgazione è stato certamente la pubblicazione del volume *Microsound* (Roads 2001a).

Un altro compositore nordamericano, il canadese Barry Truax, a partire dalla metà degli anni ottanta ha lavorato intensamente con la sintesi e l'elaborazione granulare al computer. Sua è stata la prima implementazione di sintesi granulare in tempo reale (Truax 1988b), dove i criteri statistici ripresi da Xenakis e da Roads, riconcettualizzati in termini di 'maschere di tendenza' (orientamenti statistici entro margini controllati), sono sottoposti a possibili controlli direttamente da terminale. Il primo risultato importante è stato *Riverrun* (1988), un esteso brano di soli suoni generati al computer (in parte anche montati e mixati mediante nastro magnetico quadrifonico), con numerose texture granulari di densità variabile, tra loro sovrapposte. Si tratta forse dell'unico lavoro musicale in cui Truax abbia usato davvero la *sintesi* granulare, dato che tutti i suoi lavori successivi sfruttano piuttosto una varietà di tecniche di *elaborazione* granulare del segnale in tempo reale, alle quali spesso il compositore sottopone registrazioni prese in contesti ambientali diversi (Truax 1988a, 1990).

Dagli anni ottanta in poi, molti altri compositori e ricercatori hanno esplorato forme più o meno personali di sintesi ed elaborazione granulare, con o senza riferimento a modelli analitici sottostanti. Tra gli altri, spicca il lavoro del compositore franco-argentino Horacio Vaggione, i cui lavori acusmatici sono quasi sempre basati su sofisticate tecniche di micro-montaggio di suoni prodotti da tradizionali strumenti musicali. In Italia, a parte alcuni esiti iniziali che ho personalmente conseguito con controlli digitali di oscillatori analogici (*Punti di tempo*, 1987) e con la granulazione di sorgenti sonore strumentali (*Plex*, 1991, per contrabbasso e supporto quadrifonico), si segnalano le tecniche approntate da Eugenio Giordani nella forma di complesse modulazioni di ampiezza (*Solaria*, 1988) e varie forme di elaborazione in tempo reale indagate da Michelangelo Lupone (*Varianti di un grano*, 1993).

Nel corso degli anni novanta, innumerevoli sono stati i musicisti che hanno trovato in una dimensione più generale di 'granularità' del suono mezzi ed idee consoni alla propria sensibilità, anche nel contesto di tendenze estetiche descritte come *microsound* o *glitch*, accomunate da un certo 'residualismo tecnologico' (Cascone 2000; Di Scipio 2001; Thomson 2004). In generale, la quantità di esperienze di microcomposizione, talvolta legate anche ad una recuperata condizione esecutiva e performativa dell'elettronica, anche di tipo improvvisativo, è ormai pari solo all'incredibile varietà di metodi analitici praticabili sulla base di rappresentazioni tempo/frequenza o tempo/scala, e di interesse applicativo ben oltre l'ambito dell'elaborazione di segnali musicali – si veda la rassegna in Meyer (1993), con esempi presi da settori di interesse e di studio assai diversi tra loro, dalla sismologia all'elaborazione numerica delle immagini, e tanti altri.

5 Conclusione

Sotto il profilo tecnico-compositivo, qualsiasi forma di sintesi o di elaborazione granulare è definita in fondo da scelte di progettazione compiute in rapporto a due momenti distinti e determinanti: (1) nell'individuare le *proprietà del grano* e stabilirne i tratti da assogettare

a controlli musicalmente significativi; e (2) nell'escogitare adeguate *strutture di controllo* – ovvero un *front end processor* (Roads 1991, p. 152) – per la distribuzione dei grani nel tempo e per la determinazione dei parametri in ciascun grano. Va sottolineato che è proprio la struttura dei controlli (più ancora delle proprietà dell'unità sonora minima) a distinguere una particolare forma di sintesi granulare da un'altra. Il che è di grande importanza teorico-musicale e compositiva, perché significa che allora il potenziale espressivo prende forma già nello svolgersi dei processi di sintesi del suono, appunto nel micro-tempo (Di Scipio 1994), a partire da condizioni percettive, relative alla 'stratificazione' o alla 'densità' (MacKay 1984), costitutive di una nuova sintassi. In un certo senso, parlare di sintesi granulare può apparire riduttivo o inadeguato, se con questo termine si vuole indicare uno specifico metodo di sintesi tra gli altri. Non a caso sono stati suggeriti termini più generici, come 'microcomposizione' (o come 'micro-time sonic design' e 'microsound') che, pur relativamente diffusi, a loro modo appaiono rilevanti nella misura in cui rinviano più direttamente ad una condizione operativa dove 'comporre il suono' significa mettere insieme gli elementi minimi della struttura temporale della materia sonora, facendo emergere articolazione e forma dall'interno del suono, piuttosto che imporla dall'esterno.

Per Albert Bregman, studioso della percezione uditiva, la distinzione tra quei due momenti – individuazione delle proprietà delle unità minime e criteri per la loro distribuzione nel tempo – è di rilievo anche per lo studio della percezione di eventi sonori naturali dal carattere articolato e texturale (le foglie mosse dal vento, il battere della pioggia, il rotolare di pietre, il frangersi di masse d'acqua, il frantumarsi di corpi solidi, ecc.) (Bregman 1990, pp. 118-119). In proposito, Bregman menziona le proposte di Gabor, ma prende spunto soprattutto dalle modifiche arbitrarie che ne sono state date in contesti di sperimentazione musicale (egli si riferisce in particolare a Curtis Roads). Ed è notevole che certe ricerche che egli descrive, volte a studiare la percezione uditiva di eventi complessi e articolati – per esempio vetri che si rompono o certi eventi sonori naturali (Schumacher e Gilden 1993; Warren e Verbrugge 1984) – spingano i ricercatori a seguire una prassi di modellizzazione empirica del suono che somiglia molto al *bricolage* elettroacustico-musicale.

Considerando i molteplici sviluppi che abbiamo cercato di seguire, almeno nelle loro linee principali, dobbiamo concludere che le idee avanzate da Gabor tra il 1946 e il 1947 hanno una grande profondità di implicazioni, mentre allo stesso tempo si ricollegano al portato culturale e conoscitivo di alcune delle rivoluzioni scientifiche più importanti della storia moderna e contemporanea, come si è visto nella prima parte del nostro percorso. Gabor introduce nell'analisi del suono due condizioni di rilievo da un punto di vista epistemologico, tra loro separabili in un'ottica strettamente riduzionistica: la considerazione della finitezza temporale a livello delle rappresentazioni fisiche – e ciò evoca anche quella che poi è stata, in tempi più recenti, una profonda riconsiderazione della temporalità e dell'irreversibilità nella fisica dei sistemi dinamici lontani dall'equilibrio, nella teoria del caos, etc. (Prigogine e Stengers 1999) – e un riposizionamento del punto di osservazione sul piano concreto dell'esperienza. Una proposta simile non poteva non insinuarsi e ripercuotersi sul pensiero musicale, finendo allora per articolare un intreccio di scienza fondamentale, di tecnologia e di potenziale espressivo-musicale che si è dipanato nel corso dei decenni. Nel contesto della teoria musicale contemporanea forse i quanta acustici di Gabor sono ancora una sponda lontana e poco praticabile per molti: in un certo senso, non potrebbe essere altrimenti, dato che costituiscono un'eredità impegnativa, e che richiedono un rinnovamento nel modo di pensare il suono e di farne musica. Abbiamo cercato di evidenziare come da tempo tale eredità sia fertile e vitale per il pensiero e la prassi della ricerca scientifica e della sperimentazione musicale del nostro tempo.

Bibliografia

- Arfib, Daniel (1991). «Analysis, transformation and resynthesis of musical sounds with the help of a time-frequency representation». In: *Representations of musical signals*. A cura di Giovanni De Poli, Aldo Piccialli e Curtis Roads. Cambridge Mass.: MIT Press, pp. 87–118.
- Balian, Roger (1981). «Un principe d'incertitude fort en théorie du signal ou en mécanique quantique». In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 292, pp. 1357–1362.
- Bastiaans, Martin (1980). «Gabor's expansion of a signal into Gaussian elementary signals». In: *Proceedings of the IEEE*. 68, pp. 538–539.
- Beyer, Robert (1953). «Zur Geschichte der elektronischen Musik». In: *Melos* 10, pp. 278–280.
- Bozzi, Paolo (1990). «Mach e i fatti». In: *Nuova civiltà delle macchine* 8.1, pp. 49–54.
- Brandenburg, Karlheinz (1999). «MP3 and AAC explained». In: *Proceedings of the AES 17th International Conference on High-Quality Audio Coding*.
- Bregman, Albert (1990). *Auditory Scene Analysis*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Brillouin, Léon (1956). *Science and Information Theory*. New York: Academic Press.
- Cascone, Kim (2000). «The Aesthetics of Failure: Post-Digital Tendencies in Contemporary Computer Music». In: *Computer Music Journal* 24.4, pp. 12–18.
- Cavaliere, Sergio e Aldo Piccialli (1997). «Granular synthesis of musical signals». In: *Musical signal processing*. A cura di Curtis Roads et al. London: Routledge, pp. 155–186.
- Chouard, Claude-Henri (2001). *L'oreille musicienne. Les chemins de la musique de l'oreille au cerveau*. Paris: Gallimard.
- Conway, Flo e Jim Siegelman (2005). *L'eroe oscuro dell'informazione. Alla ricerca di Norbert Wiener, il padre della cibernetica*. Torino: Codice Edizioni.
- Cramer, Leslie e Robert Talambiras (1971). «The Braided-Speech Method of time compressing speech». In: *Proceedings of the Second Louisville Conference on Rate and/or Frequency-controlled Speech, 1969*. [Ripreso in *Transactions of the Institute of Radio Engineers (Professional Group on Audio-2)*, pp. 7-12], pp. 206–224.
- De Poli, Giovanni e Aldo Piccialli (1991). «Pitch-synchronous granular synthesis». In: *Representations of musical signals*. A cura di Giovanni De Poli, Aldo Piccialli e Curtis Roads. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp. 391–412.
- De Poli, Giovanni, Aldo Piccialli e Curtis Roads, cur. (1991). *Representations of musical signals*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Debru, Claude (2003). «Ernst Mach et la psychophysiologie du temps». In: *Philosophia Scientiæ* 7.2, pp. 59–91. URL: http://archive.numdam.org/ARCHIVE/PHSC/PHSC_2003__7_2/PHSC_2003__7_2_59_0/PHSC_2003__7_2_59_0.pdf (visitato il 26/11/2015).
- D'Elia, Alfonsina (1971). *Ernst Mach*. Firenze: La Nuova Italia.
- Di Scipio, Agostino (1994). «Micro-time sonic design and the formation of timbre». In: *Contemporary Music Review* 10.2, pp. 135–148.
- (1997). «The problem of 2nd-order sonorities in Xenakis' electroacoustic music». In: *Organised Sound* 2/3, pp. 165–178.
- (1998). «Scienza e musica dei quanti acustici: l'eredità di Gabor». In: *Il Monocordo* 6, pp. 71–76.
- (2000). «Da un'esperienza in ascolto tra *phoné* e *logos*. Testo, suono e musica in *Thema (Omaggio a Joyce)* di Berio». In: *Il saggiatore musicale* 7.2, pp. 325–359.
- Di Scipio, Agostino (2001). «Uno scenario post-digitale? Riflessioni ambivalenti sul suono in Internet». In: *Musica/Realtà* 65, pp. 121–156.

- (2003). «Métaphore, formalisation et intuition dans *Analogique A et B* de Xenakis». In: *Iannis Xenakis, Gérard Grisey. La métaphore lumineuse*. A cura di M. Solomos. Paris: L'Harmattan, pp. 181–192.
- (2006a). «Analysis of *Analogique B*». Inedito.
- (2006b). «Le nubi di suono ed i loro meccanismi. Uno studio di *Analogique A et B*». In: *Iannis Xenakis. Musicista scienziato architetto*. A cura di Alessandro Melchiorre. Quaderni di Ricerca IRMus 2. Numero speciale. Milano: Edizioni Scuole Civiche di Milano, pp. 129–160.
- (2015). «Stochastics and granular sound in Xenakis' electroacoustic music». In: *Proceedings of the Conference Iannis Xenakis. La musique électroacoustique - 2012*. A cura di M. Solomos. Paris: L'Harmattan, pp. 277–296.
- Dudley, Homer (1936). «Synthesizing Speech». In: *Bell Laboratories Record* 15, pp. 159–177.
- (1939). «Remaking Speech». In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 11.2, pp. 169–177.
- Fairbanks, G., W. L. Everitt e R. P. Jaeger (1954). «Method for time or frequency compression-expansion of speech». In: *Convention Record of the Institute of Radio Engineers (part 8: Information Theory)*. [Ripreso in *Transactions of the Institute of Radio Engineers (Professional Group on Audio-2)*], pp. 7-12], pp. 120–124.
- Farge, Marie et al. (2012). «Les ondelettes et le CIRM». In: *Gazette des Mathématiciens* 131, pp. 47–57. URL: <http://wavelets.ens.fr/PUBLICATIONS/ARTICLES/PDF/319.pdf> (visitato il 30/11/2015).
- Feichtinger, Hans e Thomas Strohmer (1998). *Gabor Analysis and Algorithms*. Boston: Birkhäuser.
- Feyerabend, Paul (1987). *Farewell to reason*. London: Verso.
- Foulke, Emerson, cur. (1971). *Proceedings of the Second Louisville Conference on Rate and/or Frequency controlled Speech* (October 22-24, 1969). Louisville, Kentucky.
- Gabor, Dennis (1946). «Theory of communication». In: *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 93.26. Part III: Radio and Communication Engineering, pp. 429–457.
- (1947a). «Acoustical quanta and the theory of hearing». In: *Nature* 159.4044, pp. 591–594.
- (1947b). «New possibilities in speech transmission». In: *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 94.32, pp. 369–387.
- (1947c). «Theory of communication». In: *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 94.73, p. 58.
- (1948a). «A New Microscopic Principles». In: *Nature* 161.4098, pp. 777–778.
- (1948b). «Recherches sur quelques problèmes de télécommunication et d'acoustique». In: *L'Onde électrique* 257, pp. 433–439.
- (1949). «Improvements in and relating to transmission, recording and reproduction of sound». British Patent 616,156 (London). January 18, 1949. URL: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=GB&NR=616156> (visitato il 05/12/2015).
- (1951). «La théorie des communications et la physique». In: *La cybernétique. Théorie du signal et de l'information*. A cura di Louis de Broglie. Paris: Éditions de la Revue d'Optique, pp. 115–149.
- (1952). *Lectures on communication theory*. Technical Report 238. Cambridge, Mass.: MIT Research Laboratory of Electronics.
- (1979). *Olografia*. In: *Enciclopedia del Novecento*. Vol. 4. Roma: Istituto Enciclopedico Italiano Treccani.

- Glaserfeld, Ernst von (1975). «Piaget and the Radical Constructivist Epistemology». In: *Epistemology and Education*. A cura di C. D. Smock e E. von Glaserfeld. Athens Ga.: Follow Through Publications, pp. 1–24.
- Goldmark, Peter e P. S. Hendricks (1939). «Synthetic Reverberation». In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. Vol. 27. 12, pp. 747–752.
- Heisenberg, Werner (1927). «Über den anschaulichen Inhalt der quantumtheoretische Kinematik und Mechanik». In: *Zeitschriften für Physik* 43. Trad. it. in (Heisenberg 1991), pp. 172–198.
- (1991). *Indeterminazione e realtà*. Napoli.
- Helmholtz, Hermann L. F. (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn. Google Books: [V09AAAAcAAJ](https://books.google.it/books?id=V09AAAAcAAJ).
- Helstrom, Carl (1966). «An expansion of a signal in Gaussian elementary signals». In: *IEEE Transactions in Information Theory* 12, pp. 81–82.
- Huggins, A. W. F. (1974). *More Temporally Segmented Speech: Is Duration or Speech Content the Critical Variable in Its Loss of Intelligibility?* Quarterly Progress Report 114. Cambridge, Mass.: MIT Research Laboratory of Electronics, pp. 185–193.
- Jakobson, Roman (1963). *Essais de linguistique générale*. Paris: Minuit.
- (1966). «Linguistica e teoria dell'informazione». In: *Saggi di linguistica generale*. Ed. or. in (Jakobson 1963). Milano, pp. 65–76.
- Jones, Douglas e Thomas Parks (1988). «Generation and Combination of Grains for Music Synthesis». In: *Computer Music Journal* 12.2, pp. 27–34.
- Kronland-Martinet, Richard e Alex Grossmann (1991). «Application of time-frequency and time-scale methods – wavelet transforms – to the analysis, synthesis and transformation of natural sounds». In: *Representations of musical signals*. A cura di Giovanni De Poli, Aldo Piccialli e Curtis Roads. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp. 45–85.
- Kronland-Martinet, Richard, Philippe Guillemain e Sølvi Ystad (1997). «Modelling of natural sounds by time-frequency and wavelet representations». In: *Organised Sound* 2.3, pp. 179–191.
- Leprince-Ringuet, Louis (1981). «Sur Iannis Xenakis». In: *Regards sur Iannis Xenakis*. A cura di M. Fleuret. Paris: Stock, pp. 52–54.
- Lietti, Alfredo (1956). «Gli impianti tecnici dello Studio di Fonologia Musicale di Radio Milano». In: *Elettronica* V.3, pp. 116–121.
- (1998). «Gli impianti tecnici dello Studio di Fonologia Musicale di Radio Milano». In: *Elettronica e comunicazioni* 2/3. Ed. or. (Lietti 1956), pp. 71–78. URL: <http://www.crit.rai.it/eletel/Important/Anni1990/1998-2e3.pdf> (visitato il 30/11/2015).
- Lindsay, Robert (1966). «The Story of Acoustics». In: *Journal of the Acoustical Society of America* 39.4, 629644.
- Mach, Ernst (1865a). «Bemerkungen über die Accomodation des Ohres». In: *Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften: Mathematisch-Naturwissenschaftliche* 51, pp. 343–346.
- (1865b). «Untersuchungen über den Zeitsinn des Ohres». In: *Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften: Mathematisch-Naturwissenschaftliche* 51, pp. 133–150.
- (1875). *Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen*. Lipsia.
- Mach, Ernst (1886). *Beitraege zur Analyse der Empfindungen*. Jena: Verlag von Gustav Fischer. URL: <http://www.archive.org/details/beitrgezuranaly00machgoog>.

- (1893). *Science of Mechanics. A Critical and historical account of its development*. London: Open Court Pub Co.
- (1914). *Analysis of Sensations*. Ed. or. (Mach 1886). London: Open Court Pub Co.
- MacKay, John (1984). «On the Perception of Density and Stratification in Granular Sonic Textures: An Exploratory Study». In: *Interface - Journal of New Music Research* 13.4, pp. 171–186.
- Mathien, Michel (2007). «Abraham Moles: affronter scientifiquement la quotidienneté de la communication humaine». In: *Hermès* 48, pp. 101–108. URL: <http://www.cairn.info/revue-hermes-la-revue-2007-2-page-101.htm> (visitato il 04/12/2015).
- Meyer, Yves (1993). *Wavelets. Algorithms and applications*. Philadelphia: SIAM (Society for Industrial e Applied Mathematics).
- (2008). *Tribute to Jean Morlet*. Testo di un intervento presentato alla conferenza «Continuous Wavelet Transform and Morlet's wavelet: International conference in honor of Jean Morlet». URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=EA924BFB86A8499B4231EDF8E37F3EBA?doi=10.1.1.397.6175&rep=rep1&type=pdf> (visitato il 30/11/2015).
- Meyer-Eppler, Werner (1955). «Statistische und psychologische Klangprobleme». In: *die Reihe* 1, pp. 22–28.
- (1959). *Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie*. Kommunikation und Kybernetik in Einzeldarstellungen 1. Berlin: Springer-Verlag.
- Moles, Abraham (1953a). «Sur la coloration des bruits blancs en acoustique musicale». In: *L'Onde Électrique*, pp. 285–286.
- (1953b). «Théorie de l'information, électronique et cybernétique». In: *L'Onde Électrique*, pp. 637–651.
- (1957). «Machines à musique: l'apport des machines électroniques et électroacoustiques à la nouvelle sensibilité musicale». In: *La Revue Musicale* 236. Il testo era stato presentato col titolo *Machines à musique: du Phonogène au Vocoder*, nel contesto della "Décade de musique expérimentale", Parigi, 1952, pp. 115–127.
- (1961a). *Les Musiques expérimentales*. Trad. da D. Charles. Zurigo: Cercle d'art contemporain.
- (1961b). *Théorie de l'information et perception esthétique*. Paris: Flammarion.
- (1969). *Teoria dell'informazione e percezione estetica*. Ed. or. (Moles 1961b). Roma: Lerici Editore.
- Morawska-Büngeler, Marietta (1988). *Schwingende Elektronen: eine Dokumentation über das Studio für Elektronische Musik des Westdeutschen Rundfunks in Köln*. Köln: Tonger Verlag.
- Morlet, Jean, Richard Kronland-Martinet e Alex Grossmann (1987). «Analysis of sound pattern through wavelet transforms». In: *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 1.2, pp. 273–301.
- Oldroyd, David (1989). *Storia della filosofia della scienza*. Milano: Il Saggiatore.
- Orcalli, Angelo (1993). *Fenomenologia della musica sperimentale*. Potenza: Sonus Edizioni Musicali.
- Poullin, Jacques (1954). «L'apport des techniques d'enregistrement dans la fabrication de matières et formes musicales nouvelles. Applications à la musique concrète». In: *L'Onde Électrique* 324, pp. 282–291.

- Pöppel, Ernst, Yan Bao e Biz Zhou (2011). «Temporal Windows as Logistical Basis for Cognitive Processing». In: *Advances in Psychological Science* 19.6, pp. 775–793.
- Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers (1999). *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*. Torino: Einaudi.
- Restagno, Enzo (1988). «Un'autobiografia dell'autore raccontata da Enzo Restagno». In: *Xenakis*. A cura di Enzo Restagno. Torino: EDT/Musica, pp. 3–70.
- Riegler, Alexander (2012). «Constructivism». In: *Paradigms in Theory Construction*. A cura di L. L'Abate. Springer, pp. 235–255.
- Risset, Jean-Claude e David Wessel (1982a). «Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis». In: *Psychology of Music*. A cura di Diana Deutsch. Riedizione 1999, pp. 113–169. Trad. it. (Risset e Wessel 1982b). San Diego, California: Academic Press, pp. 25–58.
- (1982b). «Indagine sul timbro mediante analisi e sintesi». In: *Bollettino del Laboratorio di Informatica Musicale della Biennale di Venezia*. 2. Ed. or. (Risset e Wessel 1982a). Venezia: La Biennale, pp. 12–35.
- Roads, Curtis (1978). «Automated granular synthesis of sound». In: *Computer Music Journal* 2.2, pp. 61–62.
- (1991). «Asynchronous granular synthesis». In: *Representations of musical signals*. A cura di Giovanni De Poli, Aldo Piccialli e Curtis Roads. Cambridge, Mass.: MIT Press, pp. 143–185.
- (2001a). *Microsound*. Cambridge, London: The MIT Press.
- (2001b). «Sound composition with pulsars». In: *Journal of the Audio Engineering Society* 49.3, pp. 134–147.
- Rodet, Xavier (1984). «Time-domain Formant Wave Function Synthesis». In: *Computer Music Journal* 8.3, pp. 9–14.
- Schaeffer, Pierre (1952). *A la recherche d'une musique concrète*. Paris: Éditions du Seuil.
- (1966). *Traité des objets musicaux. Essai interdisciplines*. Paris: Éditions du Seuil.
- Schumacher, Mark e David Gilden (1993). «Auditory Perception of Fractal Contours». In: *Journal of Experimental Psychology* 19.3, pp. 641–660.
- Shannon, Claude e Warren Weaver (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Trad. it. (Shannon e Weaver 1971). Urbana-Champaign: University of Illinois.
- (1971). *La teoria matematica delle comunicazioni*. Milano: Etas Kompass.
- Sigismondi, Renato (2002). *La teoria della conoscenza di Ernst Mach*. Chieti: Tabula Fati Editore.
- Springer, Anton (1955). «Ein akustischer Zeitregler». In: *Gravesaner Blätter* 1, pp. 32–37.
- Stewart, George Walter (1931). «Problems suggested by an uncertainty principle in acoustics». In: *Journal of the Acoustical Society of America* 2, pp. 325–329.
- Thomson, Phil (2004). «Atoms and errors: towards a history and aesthetics of microsound». In: *Organised Sound* 9.2, pp. 207–218.
- Truax, Barry (1988a). «Discovering inner complexity: Time-shifting and transposition with a real-time granulation technique». In: *Computer Music Journal* 18.2, pp. 38–48.
- (1988b). «Real-time granular synthesis with a digital signal processor». In: *Computer Music Journal* 12.2, pp. 14–26.
- (1990). «Composing with Real-Time Granular Sound». In: *Perspectives of New Music* 28.2, pp. 120–134. JSTOR: 833014.
- Ungeheuer, Elena (1992). *Wie die elektronische Musik »erfunden« wurde...* Mainz: Schott.

- Ville, Jean (1948). «Théorie et applications de la notion de signal analytique». In: *Cables et Transmissions* 2.1, pp. 61–74. URL: <https://archive.org/details/VilleSigAnalytiqueCablesEtTrans1948Fr> (visitato il 30/11/2015).
- Warren, William e Robert Verbrugge (1984). «Auditory perception of breaking and bouncing events. A case in ecological acoustics». In: *Journal of Experimental Psychology* 10.3, pp. 704–712.
- Wiener, Norbert (1964). *I Am a Mathematician: The Later life of a Prodigy*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Xenakis, Iannis (1962). «Stochastic Music». In: *Gravesaner Blätter* 23-24, pp. 169–184.
- (1963). *Musiques formelles*. Revue Musicale 253-254. Numero monografico. Paris.
- (1971). *Formalized Music*. Trad. da C. Butchers, G.H. Hopkins e J. Challifour. Bloomington: University Press.
- (1976). *Musique. Architecture*. Tournai: Casterman.
- (1982). *Musica. Architettura*. Ed. or. (Xenakis 1976). Milano: Spirali.
- (1985). «Music composition treks». In: *Composers and the computer*. A cura di Curtis Roads. Los Altos CA: Kaufmann, pp. 184–185.
- (1992). *Formalized Music*. A cura di Sharon Kanach. Versione rivista e ampliata di (Xenakis 1971). Stuyvesant (New York): Pendragon Press.
- (2003). *Universi del suono. Scritti e interventi 1955-1994*. A cura di Agostino Di Scipio. Lucca/Milano: LIM/Le Sfere.
- Young, Randy (1993). *Wavelet theory and its application*. Norwell Mass.: Kluwer Academic.
- Zavagna, Paolo (1992). «Thema (Omaggio a Joyce) di Luciano Berio: un'analisi». In: *I quaderni della Civica Scuola di Musica* 21-22, pp. 58–64.
- (2013). «La voce senz'anima: origine e storia del Vocoder». In: *Musica/Tecnologia* 7, pp. 27–63. URL: <http://www.fupress.net/index.php/mt/article/view/13206>.