

# *La Sintesi del suono in Iannis Xenakis.*

## *Indagine di una ricerca compositiva*

Agostino Di Scipio

### *1. Introduzione*

La locuzione “sintesi del suono” di solito viene usata in riferimento a *mezzi e tecniche di generazione elettronica* del suono, talvolta in implicita contrapposizione con *mezzi e tecniche di elaborazione o trasformazione* del suono (per esempio del suono di strumenti o di altra sorgente). Qui ne parleremo anche in senso più esteso, come vero e proprio dominio creativo in cui esprimere una certa attitudine generale al sonoro, praticando una corrispondente fenomenologia della relazione tra suono e musica.

Come forse nessun altro compositore della sua generazione, Iannis Xenakis (1922-2001) ha ideato e messo a punto in prima persona le tecniche di sintesi del suono utilizzate per alcuni dei propri lavori. Qui proviamo a delineare il suo approccio alla sintesi appunto in quanto ambito di progettualità avente diretta pertinenza compositiva.

Ciò valga anche come omaggio a Xenakis, a cent’anni dalla nascita.

#### *1.1 Contesto di indagine*

Xenakis compose sedici lavori di musica elettroacustica, un numero esiguo nel totale della sua produzione ufficiale.<sup>1</sup> La gran parte di questi brani è stata analizzata e commentata da numerosi autori, secondo prospettive di studio diverse.<sup>2</sup> Si tratta per lo più di “musica su supporto” (nastro magnetico) e, in due casi, di “musica mista” (strumenti dal vivo e suoni su supporto). Alcuni brani sono a base di materiali “concreti” (quasi tutti i lavori composti al GRM di Parigi tra 1957 e 1962). Ben otto però presentano anche – o esclusivamente – sonorità ottenute con forme di sintesi del

<sup>1</sup> Prendo a riferimento il catalogo pubblicato da Éditions Salabert nel 2001, oggi online <https://www.durand-salabert-eschig.com/fr-FR/Composers/X/Xenakis-Iannis.aspx>. Si può consultare inoltre il catalogo disponibile al sito <https://www.iannis-xenakis.org/en/category/works/>.

<sup>2</sup> Senza poter essere esaustivi, si vedano specifici approfondimenti [Di Scipio 1995, Solomos & Hoffmann 1998, Hoffmann 2001, Harley 2002] e vari contributi raccolti in [Di Scipio 2004, Paland & Blumenroeder 2009, Solomos 2015, Weibel, Brümmer & Kanach 2020, Georgaki & Solomos 2022].

suono, in un arco temporale che va da *Analogique B* (1959) a *S.709* (1994). Nessun brano dopo *La Légend d'Eer* (1977) presenta sonorità d'origine concreta. Sei sono stati realizzati interamente con mezzi di sintesi, cinque dei quali interamente mediante computer. Un quadro del particolare repertorio è fornito in Tavola 1.

I processi di sintesi del suono ideati e messi a punto in tali esperienze riflettono specifiche condizioni operative e tecnologiche, ma anche elementi di conoscenza peculiari e caratteristici di una prassi creativa del tutto singolare. La nostra indagine seguirà un ordine cronologico, individuando alcuni aspetti particolarmente salienti ai fini di una valutazione complessiva del ruolo e del significato della sintesi del suono nell'opera di Xenakis.<sup>3</sup>

**Tavola 1**

sintesi granulare (mezzi analogici di generazione e tecniche magnetofoniche)	<i>Analogique B</i> (1959) - solo suoni di sintesi - lavoro poi assorbito in <i>Analogique A et B</i> (ensemble di strumenti a corde e nastro magnetico, 1958-59)
sintesi stocastica (sintesi diretta da computer, con funzioni stocastiche)	<i>Polytope de Cluny</i> (1972), parte dell'installazione omonima - probabili alcuni suoni di sintesi  <i>La Légend d'Eer</i> (1977), parte dell'installazione <i>Diatope</i> - alcuni suoni di sintesi
sintetizzatore analogico EMS	<i>La Légend d'Eer</i> (1977), parte dell'installazione <i>Diatope</i> - alcuni suoni di sintesi
sistema UPIC (sintesi diretta da computer, con input grafico)	<i>Mycènes Alpha</i> (1978), parte dell'installazione <i>Polytope de Mycènes</i> - solo suoni di sintesi digitale  <i>Pour la Paix</i> (1981) - due recitanti, coro e supporto stereo (varie opzioni di esecuzione), inizialmente destinato alla trasmissione radiofonica - tutti i suoni su supporto sono di sintesi digitale  <i>Tauriphanie</i> (1987) - solo suoni di sintesi digitale  <i>Voyage des Unari vers Andromede</i> (1989) - solo suoni di sintesi digitale
sintesi stocastica dinamica (sintesi diretta da computer, col programma GENDYN)	<i>Gendy301</i> (1991) titolo di una prima esecuzione non ufficiale (Montreal) <i>Gendy3</i> (1991) titolo della prima esecuzione ufficiale (Metz) - solo suoni di sintesi digitale  <i>S.709</i> (1994) - solo suoni di sintesi digitale

<sup>3</sup> Nelle pagine seguenti riprendo, aggiorno ed espando uno studio abbozzato anni fa nell'ambito del convegno internazionale *Iannis Xenakis: das elektroakustische Werk*, Università di Colonia, 2006.

## 2. Suono granulare e micro-composizione

Nel corso del 1959 Xenakis lavora su *Analogique B*, pensandolo come brano autonomo di musica su nastro magnetico – anzi di «musique électromagnétique» fatta con «sons sinusoïdaux» [Xenakis 1963, p.125] e dedicata a Olivier Messiaen. La realizzazione ha luogo in parte all'Experimental Studio diretto da Hermann Scherchen, a Gravesano (Svizzera), in parte agli studi del Groupe de Recherche Musicale (GRM) di Parigi (che Xenakis frequenta da almeno un paio d'anni).<sup>4</sup> È il primo progetto musicale con suoni sintetici nel tempio della “musique concrète” (desta infatti le perplessità di Pierre Schaeffer). Dopo averci lavorato assiduamente, Xenakis scarta una parte del materiale e ne fa un secondo montaggio su nastro quattro piste, che integra all'esecuzione di *Analogique A* (nove strumenti ad arco, 1958). Nasce così *Analogique A et B* (1958-59), fra i primi esempi di musica mista.<sup>5</sup> Qui tratteremo solo di *Analogique B*.<sup>6</sup>

Xenakis persegue una propria intuizione, «un'ipotesi astratta fondamentale [circa] la costruzione corpuscolare di ogni suono possibile» [ibid, p.65]), secondo la quale un suono è «un'integrazione di grani, di particelle sonore elementari, di quanta sonori» [ibid, p.61]. Egli cerca dunque di procedere con «l'assemblaggio di un numero sufficiente di particelle elementari disposte nel tempo in modo adeguato» [ibid.].<sup>7</sup> Anni dopo lo si sarebbe detto un esempio antesignano di *sintesi granulare* – locuzione generica per indicare la sommatoria di funzioni parziali tempo-finite o «grani» o ancora «quanta sonori» (termini informalmente utilizzati dallo stesso Xenakis). Andrebbe peraltro considerato il primo e forse unico caso di implementazione analogica – anzi: magnetofonica, come vedremo oltre – di una forma di sintesi granulare.<sup>8</sup> Xenakis

<sup>4</sup> Xenakis porta a realizzazione il suo primo lavoro per solo nastro magnetico, *Diamorphoses*, nel 1957, quando il centro guidato da Pierre Schaeffer si chiama ancora Groupe de Recherche de Musique Concrète, GRMC (diventa Groupe de Recherche Musicale nel 1958).

<sup>5</sup> Per un'analisi di *Analogique A et B* cfr. [Di Scipio 2006].

<sup>6</sup> Di seguito ci basterà richiamare solo alcuni aspetti importanti di *Analogique B*. Per un quadro più ampio, cfr. [Orcalli 1993, pp.73-126]; per il procedimento compositivo e realizzativo, cfr. [Di Scipio 2006; 2015]; per alcuni esempi di modellazione e risintesi, cfr. [Hagan 2005, Arcella & Silvestri 2015].

<sup>7</sup> Per queste e tutte le successive citazioni, si sottintenda “traduzione mia”. Qui cito dal capitolo II di *Musiques Formelles* [Xenakis 1963, pp.46-117], la cui redazione originale francese risale al 1959, verosimilmente durante o appena finita la lavorazione di *Analogique B*. Una traduzione bilingue di quel capitolo – in inglese e tedesco – era stata intanto pubblicata nella rivista Gravesaner Blätter di Herman Scherchen [Xenakis 1960].

<sup>8</sup> Va comunque detto che, nel repertorio di musica su nastro magnetico di fine anni 1950, non pochi brani presentano sonorità texturali più o meno dense, esito del controllo empirico di grandi quantità di micro-segmenti sonori con elaborazioni magnetofoniche rudimentali, secondo procedure non certo concepite come modelli di sintesi o come istanze di rappresentazione scientifica del suono. Casi notevoli sono *Intersection for magnetic tape* di Mordon Feldman (New York, 1954) e certi passaggi di *Continuo* di Bruno Maderna (Milano, 1958). Pensiamo poi ai “grappoli sonori” di *Gesang der Jünglinge* di Karlheinz Stockhausen (Colonia, 1955-56), nonché a vari passaggi di *Artikulation* di György Ligeti (Colonia, 1957), *Anepigraphie* (Colonia, 1958) e *Klänge Unterwegs* (Monaco, 1961) di Herbert Brün, *Impulsen* di Jaap Spek (Delft, 1960) e di ancora altri lavori.

ovviamente non usa la locuzione “sintesi granulare”, proposta solo negli anni 1970 peraltro in diretta continuità col suo lavoro.<sup>9</sup> Egli parla invece di «micro-composizione», cioè letteralmente del “mettere insieme” grandi quantità di minuscole unità sonore. Non è fuori luogo evocare l’equivalenza tra il latino *compositio* (*cum-ponere*) e il greco σύνθεσις (*syn-thesis*). Qui però si tratta di composizione a scala “micro-temporale”, in un ordine di grandezza da specificare.

### 2.1 *Quanti acustici e funzioni stocastiche*

Durante il periodo di lavorazione, Xenakis viene a conoscenza della rappresentazione quantistica del suono formulata vari anni prima dall’anglo-ungherese Dennis Gabor, illustrata in diverse memorie di ricerca, di cui la più nota è *Acoustical Quanta and the Theory of Hearing* [Gabor 1947].<sup>10</sup> Probabilmente ne viene a conoscenza tramite Abraham Moles, presenza scientifica importante al GRM di quegli anni. Nei suoi scritti Xenakis però cita Gabor attraverso un libro allora appena dato alle stampe da Werner Meyer-Eppler, ricercatore all’Università di Bonn e fondatore dello Studio per la Musica Elettronica della WDR di Colonia [Meyer-Eppler 1959]. Xenakis tuttavia precisa che l’idea di una «integrazione di grani» è una propria intuizione personale, priva di pretese scientifiche e indipendente dalla ricerca di Gabor [Xenakis 1960, p.63 e p.86; Xenakis 1963, p.61]. Trent’anni dopo l’avrebbe ricollegata piuttosto a un’idea di Albert Einstein del 1916, ma senza dare chiarimenti in proposito [Xenakis 1992, p.xiii]. In ambiti di meccanica quantistica si parla effettivamente di *fononi* nel senso di “quanti” o “quasi-particelle” di suono (analoghe ai *fotoni* o “quanti di luce”), ma se ne attribuisce la formalizzazione a un premio Nobel sovietico, Igor Tamm [Frenkel *et al.* 1991].

Per assemblare le «nuvole di grani» di *Analogique B* [Xenakis 1963, p.65], il compositore predispose un intricato piano di lavorazione, basato sul paziente taglia-e-incolla di numerosi spezzoni di nastro magnetico della lunghezza di vari secondi, su cui ha preventivamente registrato segnali pseudo-sinusoidali di durata molto ridotta (ca. 40 msec). Mixando un certo numero di tali spezzoni [Xenakis 1963, p.72; 1992, p.54], egli ottiene trame sonore con gradi diversi di densità granulare (“densità” qui significa “quantità media di eventi nell’unità di tempo”). Benché intricato, il piano di lavorazione messo a punto dal compositore snellisce enormemente le operazioni in studio, peraltro condotte con limitata disponibilità di tempo e coi limitati mezzi all’epoca disponibili, scarsamente adeguati allo scopo. Le difficoltà più importanti sorgono dalla volontà di tenere le tre variabili – registri di frequenza, intensità e densità media dei grani – sotto il controllo di un unico processo formalizzato, del tipo “catena di Markov”, cioè di un processo stocastico nel quale la probabilità di occorrenza di un

<sup>9</sup> Il termine viene proposto da Curtis Roads nel contesto di proprie sperimentazioni al computer, iniziate dopo aver seguito un corso di Xenakis nel 1972 all’Università di Bloomington (Indiana), e avendo proprio *Analogique B* come esempio [Roads 1978, 2006, 2015].

<sup>10</sup> Una traduzione italiana è apparsa nel numero 10 di *Musica / Tecnologia*, insieme a una contestualizzazione storico-scientifica e tecnologico-musicale [Di Scipio 2016].

certo valore di una certa variabile dipende dal valore precedente di quella stessa (e delle altre due) variabili. Xenakis inoltre fa in modo che ciascuna variabile sia statisticamente correlata alle altre due: sebbene probabilistica, questa correlazione tra variabili si rivela musicalmente valida, poiché introduce ridondanza a livello della struttura fine della trama sonora e – cosa comunque importante – riduce drasticamente la quantità delle combinazioni da trattare, semplificando un poco il lavoro. In ogni caso, il tutto impone una ferrea disciplina nella lavorazione: il compositore procede “a mano” (carta, matita e calcolatrice da tavolo) alla redazione di tabelle di dati e ad esse si conforma passo dopo passo nella sequenza delle operazioni in studio.<sup>11</sup>

Non senza difficoltà e compromessi, Xenakis riesce infine a produrre varie texture granulari, a registri di frequenza diversi, con densità mutevoli in un range da poche unità ad alcune centinaia di grani sonori al secondo.<sup>12</sup> Ne risulta una «musica stocastica markoviana» [Xenakis 1963, pp.61-117] in cui l'apparente disordine di una materia sonora pulsante e sgranata è controbilanciato dall'emergenza di singolarità locali e da interdipendenze sottili ma ricorrenti.

## 2.2 Sonorità “di secondo ordine”

L'obiettivo di Xenakis è quello di ottenere sonorità micro-articolate ma percettivamente omogenee, le cui proprietà di gruppo siano irriducibili a quelle degli elementi-base. Si tratta cioè di conseguire «sonorità di secondo ordine» [ibid., p.122]: i grani elementari, di proprietà sonore “primarie”, si fondono in un amalgama avente sue proprietà “secondarie”. Si può riformulare l'idea nei termini delle “proprietà emergenti” che si determinano nella dinamica interazionale di un sistema complesso – o meglio, in questo caso, in un reticolo di interazioni probabilistiche fra micro-eventi sonori.

Xenakis immagina inoltre un'organizzazione ricorsiva, a livelli diversi, dove le proprietà del materiale esperibili a una certa scala di tempo sono “elementari” rispetto al livello di organizzazione di scala superiore. «In questo modo, si potrebbero creare sonorità non solo di secondo ordine ma anche di terzo ordine, e così via» [Xenakis 1963, p.65]. Quest'idea resta senza applicazioni nel contesto di produzione di *Analogique B*. Va però sottolineato come Xenakis la consideri un modo nuovo e potenzialmente fertile di pensare il timbro e di farne dimensione di elaborazione musicale [ibid.].<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Nell'occasione Xenakis auspicò l'eventuale ricorso al «cervello elettronico» ovvero al computer [Xenakis 1960, p.99; 1963, p.72], che però al tempo non rientrava nelle priorità di Pierre Schaeffer per il GRM. Posso comunque segnalare che, come ho illustrato altrove [Di Scipio 2006; 2015], le operazioni di lavorazione di *Analogique B* sono state meno vessatorie e cervelotiche di quanto suggeriscano i tecnicismi e formalismi a cui il compositore ricorre nell'espone i presupposti teorici e tecnici di questo lavoro [Xenakis 1963, pp.97-131].

<sup>12</sup> Nei calcoli di Xenakis, alcune trame avrebbero dovuto presentare fino a circa 900 grani al secondo. In realtà, non si andò oltre circa 300, e solo in poche circostanze.

<sup>13</sup> In effetti la nozione di “sonorità di secondo ordine” può essere riferita a fenomeni di “emergenza sonologica” [Di Scipio 1994; 1997] e può allora collegarsi a criteri di composizione del timbro e di orchestrazione.

Ma torniamo alla metodologia di sintesi. Vi sono evidentemente due fasi distinte: da un lato, vanno descritte e rese disponibili le unità elementari, i singoli grani sonori; dall'altro, vanno attivate configurazioni di gestione dinamica dello spazio dei parametri (ambiti di frequenza, intensità e densità).<sup>14</sup> I grani di *Analogique B* sono segnali quasi-sinusoidali molto brevi, sostanzialmente privi di involuppo – per cui, in realtà, si tratta di brevi impulsi, cioè di suoni a spettro limitato ma comunque più ampio di una singola componente sinusoidale. Quel che conta poi è, appunto, il procedimento che ne organizza la sequenza e la sovrapposizione, facendone una trama complessiva irriducibile agli elementi-base [Xenakis 1963, p.68].

L'adozione di un processo markoviano segue direttamente la strada battuta da Xenakis, nel comporre *Analogique A*. L'adozione di unità sonore elementari molto più piccole delle note degli strumenti serve appunto a conseguire, in *Analogique B*, ciò che in *Analogique A* non era possibile: grande densità di micro-eventi ed emergenza di sonorità di secondo ordine, almeno per segmenti di alcuni secondi o di alcune decine di secondi. Fatti salvi gli opportuni adattamenti, la metodologia di sintesi equivale in tutto al processo compositivo di *Analogique A*. Si tratta di “musica formalizzata” e potenzialmente di composizione “automatica” (ma realizzata a mano). Si tratta cioè di un processo di “composizione algoritmica” ma effettuato a scala micro-temporale: in *Analogique B* Xenakis punta a comporre suono e musica in un solo gesto, a fondere o confondere processi di sintesi del suono e di composizione [Di Scipio 1997; 2001].

Attenzione, non s'intende dire che Xenakis volesse vedere il brano completo sorgere dal procedimento attuato (come potrebbe dedursi dalle sue parole sulla completa formalizzazione dei processi di composizione), ma che auspicasse il determinarsi di segmenti sonori articolati e timbricamente ben connotati, tali da potersi considerare *unità costruttive musicali di rilievo formale* (non semplici materiali sonori) da giustapporre e sovrapporre per costruire la forma musicale. Ciò si riflette nella strutturazione “a blocchi” che connota sia *Analogique A* sia *Analogique B* – e che naturalmente connota anche *Analogique A et B* [Di Scipio 2006].

### 2.3 Interrogativi

Alcuni dei segmenti sonori di *Analogique B* si presentano davvero come trame omogenee: i singoli grani non sono distinguibili e si fondono in una texture sonora unitaria benché internamente animata, micro-articolata. In quel caso si può parlare

<sup>14</sup> Tale bipartizione operativa è esplicita allorché Xenakis immagina di far ricorso al computer, prevenendo due distinti programmi: uno per definire la forma d'onda dei grani (magari «suivant Gabor» [Xenakis 1963, p.72]), l'altro per articolare nel tempo la trama granulare, secondo funzioni probabilistiche [ibid.]. Una logica simile è stata seguita da Curtis Roads nelle prime implementazioni di sintesi granulare al computer in tempo differito [Roads 1978] e da Barry Truax nelle prime implementazioni in tempo reale [Truax 1988]. Lo studioso canadese Albert Bregman, nelle sue ricerche sui meccanismi della percezione uditiva, ha affrontato la modellazione di texture sonore con analoga bipartizione concettuale [Bregman 1990, p.118]: da un lato l'unità minima della texture (o *texton*, nei termini dello psicologo della percezione visiva Bela Julesz, attivo ai Bell Telephone Labs negli anni 1950 e 1960 [Julesz 1981]), dall'altro l'organizzazione d'insieme decisiva dei fenomeni di “raggruppamento percettivo” (*perceptual grouping*).

di “sonorità di secondo ordine”, nel senso descritto. In altri segmenti, però, la densità media è troppo bassa, mentre al contrario il range statistico delle variabili in gioco muta troppo frequentemente (secondo una logica nascosta di opposizioni binarie, illustrata in [Di Scipio 2006; 2015]). Possiamo individuare due ostacoli: da un lato, va riconosciuto ovviamente che i mezzi tecnici disponibili sono molto limitati e limitanti, a dispetto del piano di lavoro escogitato per trascenderli; dall’altro, è ragionevole ritenere che la procedura markoviana non sia del tutto conveniente a determinare una micro-organizzazione dinamica avente proprietà di gruppo percettivamente cogenti [Di Scipio 1997].

Xenakis dunque prende atto dell’esito poco convincente e decide di sovrapporre *Analogique B* e *Analogique A* presumibilmente per non sprecare il lavoro fatto e per conseguire comunque un risultato musicalmente più vario. Come avrebbe egli stesso suggerito [Xenakis 1971, p.31], la decisione sembra fruttuosa soprattutto perché sollecita l’ascoltatore a confrontare gli esiti di una medesima coerenza logico-costruttiva in dimensioni fenomenologiche diverse – nella micro-temporalità del suono (sintesi) e nell’articolazione di gesti musicali di scala temporale più grande (archi).

Xenakis non ha mai più ripreso metodi di sintesi granulare, nemmeno quando mezzi e tecniche più adeguate gli avrebbero davvero permesso di verificarne le premesse teoriche e il potenziale musicale.<sup>15</sup> Sarebbe errato dedurne che le sue esperienze successive con la sintesi del suono riflettano prospettive di tipo del tutto differente. Anzi, vedremo che – con diverse risorse tecniche e con rinnovata consapevolezza – Xenakis tornò su alcune delle principali intuizioni messe in gioco proprio con *Analogique B*.

### 3. Sintesi digitale diretta, con funzioni stocastiche

Nei primi anni 1970 Xenakis può finalmente sperimentare la sintesi del suono mediante computer, prima all’Università di Bloomington, nell’Indiana (dove insegna tra 1967 e 1972), poi nel quadro delle prime attività del CEMAMu, a Parigi.<sup>16</sup> Come si evince ascoltando le registrazioni conservate all’Archivio Xenakis (presso la Bibliothèque Nationale de France), i suoni sintetizzati sui computer *mainframe* di Bloomington sono per lo più fasce sonore statiche di spettro piuttosto ampio, ottenute da vari processi stocastici, forse poco interessanti musicalmente ma vive testimonianze di una ricerca *in fieri*. Xenakis ripete tali esperimenti al CEMAMu, e ne utilizza i materiali ottenuti in *Polytope de Cluny* (nastro sette piste, 1972), ma dando loro un ruolo

<sup>15</sup> Sembra però che, almeno in un’occasione – qualche anno più tardi, nel quadro delle attività del CEMAMu (cfr. nota seguente) – Xenakis abbia provato a realizzare al computer una forma di sintesi basata sulla teoria dei quanti acustici di Gabor, insieme al suo collaboratore Bruce Rogers [Turner 2014, p.97]. Non se ne conoscono gli esiti.

<sup>16</sup> Nel 1966, insieme a un gruppo di ricercatori universitari dell’area parigina, Xenakis fonda l’Équipe de Mathématique et d’Automatique Musicale (EMAMu). Nel 1972 il gruppo diventa Centre de Mathématique et d’Automatique Musicale (CEMAMu), che può contare su sistemi di conversione digitale-analogico (DAC) resi disponibili dal Centre National d’Études des Télécommunications (CNET) di Parigi, necessari per procedere alla sintesi digitale in tempo differito.

del tutto marginale.<sup>17</sup> Successivi esperimenti forniscono esiti più interessanti, messi a frutto in *La Légend d'Eer* (nastro magnetico a sette piste, 1977) [Xenakis 1978], dove si manifestano come strane sonorità ronzanti soprattutto in passaggi molto avanzati del brano: infatti, a partire da 25'00" (pista 2) e 25'34" (pista 1), questi materiali si moltiplicano gradualmente su tutte e sette le piste, assumendo così un ruolo importante nell'arcata formale complessiva [Solomos 2006].

In questi esperimenti Xenakis segue un generico approccio di *sintesi digitale diretta* – dove “diretta” significa “effettuata da un programma che calcola direttamente una successione numerica che vale come sequenza di campioni audio”. In altre parole, un programma codificato dal compositore calcola uno dopo l'altro i campioni del segnale, inscrivendoli direttamente sul piano cartesiano dei valori discreti di tempo e ampiezza, senza procedure intermedie e conformandosi solo alle prerogative generali del “teorema di campionamento” – il quadro teorico-informazionale generale dei segnali audio-numeric [Shannon & Weaver 1949]. Nel 1971, in uno scritto intitolato *Nouvelles propositions sur la microstructure des sons*, il compositore chiarisce di avere come scopo di creare «direttamente variazioni stocastiche di pressione sonora» [Xenakis 1992, p.46; 2003, p.56], variazioni simili a «una particella che si muove in maniera imprevedibile intorno al proprio punto di equilibrio» [ibid.]. Poiché la quantità di calcoli richiesta è tipicamente nell'ordine di molte migliaia (50000 campioni al secondo, nel caso di Xenakis) e i mezzi di calcolo elettronico dell'epoca sono mediamente ancora molto limitati, un simile processo di sintesi non poteva che svolgersi “in tempo differito”, senza possibilità di controlli interattivi.

Ora, a ben vedere, anche qui vi sono unità elementari (i campioni audio, molto più piccoli dei grani sonori) e procedimenti formalizzati (programmi) destinati a gestire quantità elevate di unità elementari (stavolta solo sequenzialmente, laddove i grani di *Analogique B* potevano ovviamente sovrapporsi). Xenakis sperimenta sette diverse procedure di calcolo corrispondenti ad altrettante formalizzazioni discrete del moto browniano e di altre funzioni probabilistiche. Per implementare tali formalismi, Xenakis in realtà adopera un programma scritto in Fortran IV (da alcuni dei collaboratori conosciuti a Bloomington) il quale a sua volta ricalca un programma precedente, che egli stesso aveva scritto in Fortran II sui computer *mainframe* della IBM di Parigi, nel 1962, e dal quale aveva derivato *ST/04* (per quartetto d'archi, 1962) e altre pagine per ensemble da camera e per orchestra.<sup>18</sup> Va pertanto sottolineata la circostanza rara e

<sup>17</sup> La circostanza è da riferirsi alla seconda versione (oggi la sola disponibile) del nastro di *Polytope de Cluny*, realizzata verso la fine del 1973. Nella sua interezza, quel lavoro è fatto di dense trame di materiali d'origine concreta (in parte riprese da *Bohor*, nastro otto piste, 1962): all'ascolto delle sette piste originali è impossibile identificare suoni ottenuti da mezzi di sintesi. Secondo inediti approfondimenti recenti (dovuti a Makis Solomos, Pierre Carré e al sottoscritto) deve trattarsi di materiali presenti su una delle sette piste, all'inizio della registrazione, ma non presenti nella riduzione stereo pubblicata (compact disc Mode Records 203). Il compositore probabilmente li inserì nel montaggio del 1973 più per non negarsi la possibilità di farlo che per necessità musicale. Si sarebbe vantato così di essere stato «il primo, in Francia, a sintetizzare suoni mediante computer» [Harley 2002, p.48; Fleuret 1988].

<sup>18</sup> Un frammento del codice Fortran 1962 è in *Musiques Formelles* [Xenakis 1963, p.175 e p.177]. La versione americana del programma è in *Formalised Music* [Xenakis 1992, pp.145-163]. Secondo le

assolutamente emblematica di un programma concepito a scopi di composizione algoritmica che viene però utilizzato per generare sequenze di campioni audio-digitali, cioè per la sintesi del suono! D'altronde va anche ricordato che tali procedure probabilistiche realizzate al computer sono sostanzialmente le stesse che Xenakis aveva eseguito “a mano” per le sue prime composizioni di «musica stocastica libera», come *Pithoprakta* (per orchestra, 1955-56) e *Achorripsis* (per orchestra, 1956-57).<sup>19</sup>

La sintesi stocastica dei primi anni 1970 dunque proietta a livello del segnale digitale procedure verificate tempo prima a scopi e con mezzi diversi. Si tratta di cambiare scala temporale di applicazione e di adeguare, naturalmente, la gestione delle variabili in gioco.

### 3.1 Critica dell'analisi di Fourier

Per spiegare il ricorso a funzioni probabilistiche e processi stocastici, Xenakis chiama in causa quelli che considera i limiti delle tecniche di sintesi più comuni, che egli vede radicati nel modello dell'analisi armonica di Fourier.

Come noto, l'elegante modello generale elaborato nei primi anni del XIX secolo da Jean-Baptiste Fourier (un matematico allora al seguito dell'esercito di Napoleone nella campagna d'Egitto) scompone l'andamento curvilineo di qualsiasi movimento ondulatorio (per esempio le variazioni di pressione in un motore a vapore o le vibrazioni di un corpo sonoro) in una serie di funzioni elementari (“serie” qui vale come insieme ordinato di elementi la cui relazione è espressa da operatori matematici noti). Gli elementi parziali della serie di Fourier sono funzioni circolari (seno e coseno) in determinati rapporti di fase, frequenza e ampiezza, il cui andamento si ripete con perfetta periodicità (“moto armonico”). Una tecnica di sintesi che voglia approssimare tale modello è, in termini generici, una forma di “sintesi additiva”, cioè richiede di sovrapporre o aggiungere un numero teoricamente infinito di «elementi finiti giustapposti» [Xenakis 1992, p.244 e p.245]. La critica di Xenakis è rivolta in particolare all'idea di calcolare, con Fourier, il profilo di un singolo periodo di oscillazione per poi “clonarlo” e ripeterlo per la durata desiderata.<sup>20</sup> Xenakis collega tale approccio anche

testimonianze raccolte in [Turner 2014], la versione americana del programma fu scritta da alcuni studenti e assistenti del compositore, Wilson Allen, Cornelia Colyer e Bruce Rogers (gli ultimi due seguirono Xenakis a Parigi e furono parte del team che realizzò *Polytope de Cluny*). Nell'ambito della collaborazione a Bloomington, il programma veniva denominato STOCHOS [Turner 2014, p.84 e *passim*].

<sup>19</sup> Su «musica stocastica libera», cfr. [Xenakis 1963, cap. I]. In questo contesto, un processo stocastico è “libero” nel senso che non ha memoria, cioè nel senso che la probabilità di occorrenza di un evento non dipende da eventi precedenti, ed è “markoviano” (come in *Analogique B*) se invece dipende da uno o più eventi precedenti.

<sup>20</sup> In verità, si tratta qui di una forma piuttosto semplificata di “sintesi additiva”, in cui le parziali dello spettro non sono indipendentemente gestite. Al tempo in cui Xenakis articola la sua critica, Jean-Claude Risset e altri protagonisti della computer music internazionale praticavano già forme di sintesi additiva più elaborate e produttive, che sul piano teorico rappresentavano esternalizzazioni o estensioni del modello di Fourier. Peraltro, già nei laboratori elettroacustici degli anni 1950 erano state conseguite forme di

a un'arbitraria quantizzazione del continuum delle frequenze. Egli insomma considera il modello di Fourier inadatto alla complessità di una classe di fenomeni sonori di interesse musicale ma irriducibili a un modello deterministico.

L'argomento poggia anche su una constatazione empirica: i suoni naturali e quelli degli strumenti musicali presentano «minuscole variazioni delle linee spettrali, sia in frequenza, sia in ampiezza», sia «durante lo stato stazionario del suono [sia] nelle fasi transienti...», aventi grande importanza anche perché riguardano «il riconoscimento del timbro» [ibid., p.244; Xenakis 2003, p.54]. L'argomento è confortato da alcuni contributi – recenti, in quel momento – di contesto informatico-musicale.<sup>21</sup> Xenakis insiste in particolare sul fatto che tali variazioni aleatorie non possano essere modellate a partire da Fourier. Pur non volendo simulare suoni strumentali, né altre sonorità familiari, per lui è preferibile adottare metodi capaci di determinare micro-modulazioni continue e minuscole irregolarità, come appunto i metodi stocastici.

In punta di ragionamento, la critica sembra avere questa logica: al riconoscimento del problema (insufficienza del modello di Fourier) segue ipotesi di soluzione (funzioni stocastiche). È però lecito supporre che Xenakis seguisse un ragionamento orientato inversamente: il desiderio di giustificare strade inusuali e personali (sintesi con funzioni stocastiche) spinge a evidenziare i limiti del modello più diffuso (Fourier).

Ora, Xenakis in fondo s'era allontanato dal modello di Fourier già al tempo di *Analogique B*, una quindicina di anni prima, per ragioni sostanzialmente simili. Adottare una visione corpuscolare, ispirata a modelli quantistici, era servito a perseguire irregolarità e micro-variazioni statistiche, importanti per l'orecchio [Xenakis 1963, p.70] ma inarrivabili nel quadro teorico tradizionale. In quel caso, come abbiamo visto, era confortato dalle ricerche di Werner Meyer-Eppler.<sup>22</sup> L'eventuale costanza o «fissità di grani» (l'assenza di deviazioni casuali di micro-livello) per lui costituiva un caso particolare, «il caso generale essendo la mobilità, la ripartizione statistica di grani intorno a una posizione di equilibrio» [Xenakis 1963, p.71].

Ciò appare in sintonia con quanto il compositore scrive nei primi anni 1970 sulla sintesi stocastica diretta, equiparando – come abbiamo visto – il segnale sonoro al movimento di «una particella che si muove in maniera imprevedibile intorno al proprio

sintesi additiva con controllo dinamico sulle parziali dello spettro (per esempio in alcuni lavori di musica elettronica di Herbert Eimert e Gottfried M. Koenig).

<sup>21</sup> Nei suoi scritti Xenakis cita l'antologia [von Foerster & Beauchamp 1969], avendo presumibilmente in mente alcuni specifici contributi ivi raccolti, come quello dello stesso Beauchamp ("A computer system for time-variant harmonic analysis and synthesis of musical tones") e dei compositori James Randall ("Operations on wave forms") e Gerald Strang ("The problem of imperfection in computer music"). L'antologia conteneva anche uno scritto di Herbert Brün, altro compositore che sperimentò creativamente forme di sintesi digitale del suono assolutamente peculiari.

<sup>22</sup> Non si può dire se Xenakis conoscesse gli studi pubblicati da Meyer-Eppler già nel 1955 (in inglese nel 1958) su «modulazioni aleatorie» e altri «aspetti statistici del suono [che] ci conducono direttamente nel mondo dei fenomeni un tempo descritti come rumori» [Meyer-Eppler 1958, pp.55-61]. Sappiamo che ne avrebbe avuto conoscenza attraverso il libro [Meyer-Eppler 1959], che torna a citare nel 1971 introducendo i suoi esperimenti con la sintesi stocastica [Xenakis 2003, p.53]. Segnaliamo che, proprio nel suo lontano contributo del 1955, Meyer-Eppler aveva indicato nei processi markoviani una possibile strada per ricostruire le variazioni aleatorie interne al suono [Meyer-Eppler 1958, p.57].

punto di equilibrio» [Xenakis 1992, p.246; 2003, p.56]. Xenakis insiste sull'«impasse», sull'«ovvio fallimento» [Xenakis 1992, p.243; 2003, pp.54-54] delle tecniche della prima *elektronische Musik* e delle prime proposte di musica sintetizzata mediante computer.<sup>23</sup> Nonostante il contesto tecnico del tutto diverso, le motivazioni che portano alla sintesi stocastica nei primi anni 1970 appaiono pertanto sovrapponibili con quelle che, tra 1958 e 1959, avevano condotto verso una concezione quantistica del suono e verso la “sintesi granulare”.

### 3.2 Paradigmi in questione

Soffermiamoci brevemente su questo punto. La critica alla teoria di Fourier ha uno statuto affatto singolare e significativo: a ben pensarci, è la prima volta che un musicista mette in questione quel che, nell'orizzonte epistemico della modernità scientifica, si è posto come vero *paradigma* nello studio dei fenomeni acustici (almeno a partire da Georg Ohm e Hermann von Helmholtz).<sup>24</sup> Forse è perfino la prima volta che un musicista ritiene che un modello di conoscenza scientifica influenzi o comunque condizioni la propria libertà creativa – e che perciò occorran visioni alternative.

Quando un metodo di sintesi segue un approccio privo di basi tecno-scientifiche note e condivise, si può parlare di sintesi *non-standard*. L'attributo, attestato informalmente nella ricerca compositiva e nella letteratura tecnica informatico-musicale (cfr. per esempio [Döbereiner 2011, Ikeshiro 2014]) vale grosso modo come “non fondato su modelli scientifici né su schemi ingegneristici noti”. Altri compositori della generazione di Xenakis hanno perseguito strategie del genere, spesso con esiti sonori peculiari, deliberatamente “macchinici” e antinaturalistici.<sup>25</sup> Nell'insieme, questo genere di proposte può essere visto come uno degli esiti più radicali ed emblematici nella storia delle pratiche creative elettroacustiche e informatico-musicali [Di Scipio 2021, p.285 e pp.380-382].

A suo modo, la sintesi diretta con funzioni stocastiche può essere considerata appunto un caso di sintesi non-standard: è una strategia generativa non del tutto arbitraria ma motivata principalmente da esigenze compositive, aliena da stringenti criteri scientifici, con risultati sonori spesso imprevedibili.

<sup>23</sup> Ricordiamo che la critica al modello di Fourier segue di qualche anno il famoso articolo *La crisi della musica seriale*, del 1955 (Xenakis 2003, pp.27-30). Presi insieme, quei due spunti critici costituiscono un nucleo teorico e poetico decisivo nel posizionare Xenakis nel contesto delle avanguardie musicali del suo tempo.

<sup>24</sup> Scrivo “paradigma” per dire ovviamente “episteme” storicamente determinata e condivisa, cioè nel senso generale di “paradigma scientifico” (Kuhn 1962).

<sup>25</sup> Si pensi a Gottfried Michael Koenig, nei suoi lavori intitolati *Funktionen* (nastro magnetico, 1967-69), con tecnologie analogiche. In ambito informatico musicale, si pensi ad alcuni lavori di Herbert Brün (*Infraudibles*, nastro magnetico, 1968) oppure al suo software SAWDUST (1976). Tralasciamo per brevità le esperienze di compositori di una o due generazioni successive.

### 3.3 Dal livello dei grani sonori a quello dei campioni audio digitali

Passare da una concezione di tipo quantistico (à la Gabor) allo spazio discretizzato tempo-ampiezza (à la Shannon) implica un cambio nelle unità elementari prese in considerazione e della relativa temporalità: da pochi centisecondi (grani) a pochi decimillesimi (campioni). Le differenti implicazioni teoriche e tecnologiche non devono oscurare una più fondamentale concezione unitaria, evidenziata già da uno dei pionieri della teoria dell'informazione [Brillouin 1959]: *il campionamento di segnali costituisce un caso particolare all'interno della cornice teorica di Gabor*.

Benché sia improbabile che Xenakis conoscesse il lavoro scientifico di Leon Brillouin, può essere utile chiarire questo punto ai fini del nostro discorso. Il quadro teorico di Gabor ammette varie “espansioni in serie”, ciascuna corrispondente a un diverso compromesso tra indeterminazione nel dominio del tempo e in quello della frequenza. Decisiva è l'assunzione esplicita del posizionamento temporale di funzioni finite, quindi anche della relazione inversa tra precisione di misura nel tempo e precisione di misura in frequenza – una relazione che richiama il fondamentale “principio d'indeterminazione” di Heisenberg: a livello quantistico, un fenomeno energetico può rivelarsi sia come “particella” sia come “onda”, dipende dalla scala d'osservazione praticata dall'osservatore. Gabor individua una specifica condizione per la quale tempo e frequenza sono misurati *con uguale indeterminazione*, ovvero con la medesima (mancanza di) precisione. Tutti gli altri casi implicano un compromesso a vantaggio dell'uno o dell'altro.

Passando da “grani” a “campioni”, il quanto di rappresentazione si contrae e tende a diventare impulso di durata indefinitamente breve (“funzione di Dirac” o “funzione delta”), lasciando del tutto indeterminata la frequenza. All'opposto, considerare unità elementari di durata indefinitamente estesa porta a misure di frequenza idealmente perfette, tornando così al modello di Fourier. Quindi, espansione di Fourier e campionamento di Shannon sono casi-limite diametralmente opposti dentro il quadro di rappresentazione del suono di Gabor [Brillouin 1959, p.99]. Ogni caso intermedio implica una diversa “granularità”, cioè funzioni-base di una certa durata aventi una certa posizione nel tempo (e una corrispondente incertezza in frequenza).

La sintesi del suono è “micro-composizione” nella misura in cui decide di relazioni micro-temporali *esplicite*, tali da gestire condizioni sistemiche di ordine e disordine nel decorso del suono. Nel 1959, l'esperienza di *Analogique B* aveva costituito un primo allontanamento dal modello di Fourier, cioè un primo avvicinamento alla micro-composizione; nel 1971, passando a livello dei campioni, si giunge a un'individuazione temporale ancora più fine. Si apre un vasto ambito di fenomeni altrimenti fuori portata. Si sollevano però anche nuovi interrogativi.

### 3.4 Nuovi interrogativi

Nel passaggio da “grani” a “campioni” si perde qualcosa: Xenakis deve ora limitarsi a produrre solo “oggetti sonori”, entità sonore brevi e separate, non trame prolunga-

te di materia internamente articolata (quali sono idealmente le “nuvole sonore” di *Analogique B*). In *La Légend d'Eer* i suoni sintetizzati da computer rappresentano una delle varie categorie di materiale messe in gioco [Solomos 2010]: la sintesi sembra qui avere la funzione, più consueta, di produrre oggetti sonori separati che poi vanno messi insieme secondo un piano che trascende le dinamiche della sintesi stessa. Perché non osare oltre, come Xenakis aveva provato a fare per *Analogique B*? Certo, nei primi anni 1970 Xenakis è impegnato su vari fronti con progetti molto impegnativi. Certo, i fondi di ricerca al CEMAMu non consentono sforzi e risorse ulteriori. Però la mancanza di tempo e mezzi forse non dice tutto.

Dar luogo a processi stocastici per determinare i più minuti dettagli del segnale nel dominio del tempo fornisce, come s'è detto, esiti spesso indeterminati nel loro contenuto spettrale, nel dominio della frequenza – e ciò, in definitiva, proprio per l'indeterminazione quantistica inerente. Lo spettro di suoni così generati andrebbe grosso modo assimilato allo spettro campionato (alla “trasformata discreta di Fourier”) della particolare funzione stocastica adoperata, cioè alla corrispondente distribuzione di probabilità. Come dato concreto di esperienza, però, esso può solo manifestarsi *post-facto* come epifenomeno di un processo non orientabile nelle sue dinamiche di cambiamento, né locali (dettagli del segnale) né globali (gesto sonoro complessivo). In altre parole, agendo nel micro-tempo con processi stocastici, ciò che riguarda la frequenza è, almeno in una fase iniziale, un residuo, l'effetto collaterale del sequenziamento probabilistico di campioni audio. Questo aspetto residuale riguarda direttamente proprietà di rilevanza percettiva, *in primis* l'altezza naturalmente, ma anche l'intensità, la curva d'inviluppo, ecc.

Nel 1959 Xenakis aveva ragionato sulla differenza fra “proprietà elementari” e proprietà di livello superiore o “di secondo ordine”, cercando di integrare masse di grani sonori in forme sonore omogenee dalle qualità irriducibili ai grani stessi. E aveva intuitivamente mirato a trame o texture sonore di una certa durata, pensate come segmenti di valenza formale all'interno di una costruzione musicale. Nel 1971, con la sintesi stocastica mediante computer, la temporalità dei processi generativi è molto più ridotta, al punto che le proprietà sonore emergenti restano alquanto generiche, poco differenziate perché troppo rapidamente mutevoli, con incessanti e imprevedibili modulazioni di frequenza e/o ampiezza. Col suo programma in linguaggio Fortran, Xenakis ottiene *un* suono alla volta, un singolo evento dal profilo dinamico di pochi secondi al massimo. Non vi sono codifiche del tipo “lista di eventi” (o “partitura informatica”), come invece in molte altre esperienze di musica sintetizzata via computer.

Xenakis si rende conto che sono necessari ulteriori sforzi, e infatti scrive che «le molecole sonore prodotte con questi metodi [di sintesi stocastica] potrebbero essere manipolate da «un processo markoviano, a macro-livello» [Xenakis 1992, p.249], magari inserendole nel programma ST [...] per formare la macrostruttura» [ibid.].<sup>26</sup> Risputa qui l'idea di struttura ricorsiva: i processi di sintesi stocastica andrebbero

<sup>26</sup> Il programma ST (come si è detto in un passaggio precedente) era stato scritto da Xenakis nel 1962 ed era stato usato per i suoi primi lavori di composizione strumentale algoritmica, come *ST/10* (per ensemble di 10 strumenti, 1962) e *ST/4* (per quartetto d'archi, 1962). Cfr. [Xenakis 1992, pp.131-154].

incapsulati in procedure stocastiche di portata “superiore”, a scala temporale più ampia rispetto alla micro-temporalità dei campioni – un’ipotesi che si era inizialmente manifestata, come s’è visto, nel contesto di *Analogique B*. L’idea rimane irrealizzata in quella fase, ma implica una tacita presa d’atto: la sintesi diretta con funzioni stocastiche è priva di una formatività emergente, può produrre solo materiali sonori da gestire poi appunto con altri mezzi (mediante montaggio in studio, come in *La Légend d’Eer*).

### 3.5 Addendum

Per completezza va rilevato che in *La Légend d’Eer* vi sono anche suoni ottenuti dai sintetizzatori analogici EMS disponibili allo Studio per la Musica Elettronica dalla WDR di Colonia, dove quel lavoro venne realizzato.<sup>27</sup> Fu questa, verosimilmente, la sola circostanza in cui Xenakis abbia fatto ricorso a mezzi di sintesi altri da quelli di propria ideazione. Questi materiali – in primo piano nella parte iniziale dell’esteso pannello musicale di quel brano – sono descritti da Xenakis in modo esplicitamente naturalistico, equiparati a «piccole barrette metalliche» oppure a «stelle filanti sonore» [Solomos 2006]. Sparsi in registri sovracuti, in sequenze prima molto rarefatte poi gradualmente più continue e dense, questi suoni appaiono meno aspri e innaturali di quelli ottenuti con la sintesi stocastica.

## 4. Il sistema UPIC

Nel 1974 Xenakis invita Patrick Saint-Jean, un giovane ingegnere ammiratore della sua musica, a lavorare al CEMAMu. Saint-Jean s’interessa di nuovi sistemi di calcolo, i “micro-computer” (“micro” in rapporto alla dimensione gigantesca dei mainframe, ma non ancora “personal”), e nel 1976 utilizza un computer Solar 16-40 per progettare insieme a Xenakis un sistema a controllo grafico che presto diventerà l’Unité Polyagogique Informatique du CEMAMu (UPIC) [Saint-Jean 1977]. I disegni fatti su una tavoletta di input grafico vengono convertiti in suono attraverso un computer e un sistema di conversione digitale-analogico. Xenakis si fornisce così di un sistema di gestione piuttosto intuitiva e dal potenziale interattivo sicuramente fertile per chi fa del connubio “musica-architettura” un perno della propria poetica [Xenakis 1971]. In contesti educativi promossi dal CEMAMu, il compositore invita giovani e non-esperti ad acquisire nozioni musicali e di acustica mediante un approccio largamente inedito.<sup>28</sup>

<sup>27</sup> Nell’occasione, Xenakis lavorò allo Studio di Colonia con l’assistenza tecnica di Volker Müller e James Withman [Morawska-Bungeler 1988, p.110]. Al tempo, lo Studio disponeva almeno di un EMS Synthi AKS e di un EMS Synthi 100. Negli appunti di lavorazione, Xenakis chiama i suoni così ottenuti “Muller” e “James” [Solomos 2010].

<sup>28</sup> Scrivo “largamente inedito” ma non si tratta certo del primo caso di sintesi del suono con controllo grafico. Ricordiamo la *Free Music Machine* dell’anglo-australiano Percy Grainger, a fine anni 1940, con mezzi elettro-meccanici. Ricordiamo apparati analogici come il *Compositron* del canadese Osmond Kendall (anni 1950) e il *Convertidor Gráfico Analógico* costruito da Fernando von Reichenbach al Laboratorio de

Il primo prototipo UPIC è del 1977.<sup>29</sup> L'anno successivo Xenakis ne esplora il potenziale creativo in *Mycénes Alpha* (nastro magnetico, 1978), primo suo lavoro interamente realizzato al computer. Seguiranno altre implementazioni di UPIC, con mezzi di calcolo sufficientemente performanti da operare in tempo reale [Raczinski & Marino 1988]. Nel 1986, nei pressi di Parigi, Xenakis inaugura Les Ateliers UPIC, una piccola struttura dedicata ad attività formative e divulgative basate appunto sul sistema UPIC (più tardi le iniziative si sarebbero ampliate e la struttura sarebbe diventata Centre Création Musicale Iannis Xenakis, CCMIX, in attività fino al 2007). In anni successivi sono state fatte versioni interamente software di UPIC su personal computer, alcune di disponibilità commerciale, altre di dominio pubblico [Marino *et al.* 1993, Baudel 2006, Georgaki 2015]. Indipendentemente dalle varie versioni, qui ci interessano aspetti generali dell'operatività musicale del sistema UPIC aventi diretta pertinenza per il nostro discorso.

#### 4.1 Disegnare il suono (*sintesi tabellare con input grafico*)

La generazione del suono in UPIC equivale essenzialmente all'algoritmo di sintesi audio digitale più elementare e più diffuso, cioè ad una procedura di *sintesi tabellare*: una breve sequenza di campioni audio viene caricata in una "tabella" (un vettore, una piccola area di memoria) considerata equivalente alla forma d'onda di un singolo periodo di oscillazione; viene poi attivato un processo che preleva i campioni dalla tabella e ripete più volte tale operazione, finché richiesto, ricominciando ogni volta dall'inizio della tabella, ciclicamente (per brevità tralasciamo dettagli tecnicamente importanti). La particolarità di UPIC sta nel fatto che la forma d'onda messa in tabella viene disegnata a mano (con linee rette o curve). Si tratta dunque di sintesi tabellare con input grafico.<sup>30</sup>

Tale procedura equivale esattamente a quella «giustapposizione di elementi finiti» che Xenakis aveva criticato [Xenakis 1992, pp.244-245]. Va detto che UPIC fornisce un banco di 64 di tali oscillatori tabellari, sommabili tra di loro (sintesi additiva) o in configurazioni di modulazione di frequenza. E soprattutto che nel momento di tracciare un qualsiasi segno sulla tavoletta grafica, nulla è realmente deciso circa la sua interpretazione da parte del sistema: il segno può valere come forma d'onda oppure come segnale di controllo (oscillatore in bassa frequenza, LFO) dell'ampiezza (invi-

Musica Electronica di Buenos Aires (fine anni 1960). Qualche anno prima di UPIC, soluzioni informatico-musicali simili erano state provate all'Università di Ottawa e ai Bell Telephone Labs negli Stati Uniti. Il quadro si amplierebbe fin troppo se poi volessimo considerare i metodi di "sintesi ottica" (su pellicola cinematografica) messi a punto in Germania, Canada e Unione Sovietica, alcuni decenni prima, in certi casi già prima della Seconda Guerra Mondiale (cfr. vari contributi in [Weibel, Brümmer & Kanach 2020]).

<sup>29</sup> Sulla struttura hardware e sulle funzionalità software relative alle prime versioni di UPIC, si veda la ricostruzione datane di recente da uno dei principali tecnici responsabili [Médigue 2020].

<sup>30</sup> In una versione di UPIC di metà anni 1980, i campioni in tabella potevano essere ottenuti da segnale microfonico mediante conversione analogico-digitale (ADC). Tale possibilità di campionamento venne messa a frutto da Xenakis in *Taurhiphanie*, dove la sorgente sonora era costituita dal muggito di tori!

luppo) o della frequenza (valori di altezza determinata, oppure curve di glissando). La lunghezza del segno sul piano non è legata a una determinata durata, che può essere arbitrariamente assegnata in un range fra 6 millisecondi e 12 minuti.<sup>31</sup> Perciò il segno grafico vale inizialmente come oggetto astratto, *hors-temps*, e solo al momento di diventare suono assume una durata reale, traducendosi in evento sonoro *en-temps*.<sup>32</sup> Resta comunque sempre possibile traslare un segno o anche un'intera configurazione di segni (una "pagina" di UPIC) a scale temporali diverse.

#### 4.2 Scivolare fra micro- e macro-tempo

Data la particolare operatività, UPIC favorisce più l'ordine di elementi sonori individualmente progettati che l'ammassarsi di micro-eventi probabilistici. Possiamo vedere in ciò una reazione di Xenakis alle esperienze precedenti, dove si era rivelato difficile o impossibile – come dire? – sollevarsi dal "micro-" al "macro-tempo".

Va però rilevato un importante fattore di continuità. Immaginiamo di usare come curva d'inviluppo in frequenza (glissando) un segno inizialmente pensato come forma d'onda – o viceversa. Immaginiamo di contrarre una configurazione grafica di qualche secondo fino a farne la forma d'onda di un suono, oppure di dilatarla fino a farne schema formale di un intero brano. Consideriamo inoltre che differenti forme d'onda e differenti controlli possono essere assegnati a una medesima sequenza di altezze, modificandone le qualità timbriche. Dalla partitura grafica di *Mycènes Alpha* sappiamo che le sezioni 7 (3'53"-4'17") e 13 (8'35"-9'36") sono pressoché identiche nello schema grafico tempo-frequenza, pur risultando diverse all'ascolto e nell'articolazione temporale. Il «paradigma multi-temporale» praticabile con UPIC [Pietruszewski 2020, p.614 e sgg.] offre insomma modi empirici di studiare un legame significativo tra strati diversi della costruzione sonora complessiva: le strutture micro-temporali possono diventare meso- e macro-temporali, e viceversa.

Naturalmente è prioritario verificare che il segno grafico abbia senso come suono o gesto musicale: l'equivalenza tra operazioni nello spazio piano e loro proiezione temporale è puramente formale, non garantisce certo da esiti arbitrari. In un certo senso dunque anche gli esiti sonori di UPIC sono essenzialmente "epifenomeni" – non di un procedimento logico-statistico ma di un gesto originato in uno spazio bidimensionale e reso udibile da un artificio tecnico-informatico. Per ragioni diverse, gli esiti della sintesi diretta stocastica manifestavano proprietà dinamiche inizialmente del tutto residuali e derivative. Ma in fondo la tavoletta di input grafico di UPIC corrisponde concettualmente allo spazio discreto tempo-ampiezza della sintesi diretta stocastica – anzi, nel momento in cui vi si disegna una forma d'onda, la tavoletta è il piano dei valori discreti tempo-ampiezza. I trattamenti geometrici che essa favorisce (traslazioni, trasformazioni di simmetria, eventuali segmentazioni e interventi del tipo "taglia-e-

<sup>31</sup> Mi riferisco al sistema UPIC descritto in [Xenakis 1992, pp.329-334; Marino *et al.* 1993].

<sup>32</sup> Richiamo naturalmente l'opposizione generica "hors-temps / en-temps", su cui Xenakis riflette in altri contesti del suo lavoro a partire da [Xenakis 1965].

incolla”) sono operazioni deterministiche e lineari nello spazio (per l’occhio) di cui resta da verificare la valenza nel tempo (per l’orecchio).

Operare con UPIC, pertanto, significa procedere di volta in volta per tentativi ed errori, soprattutto proiettando configurazioni identiche a diverse scale di grandezza temporale. Insieme al rischio di scelte arbitrarie, vi è anche un importante potenziale formativo, consistente appunto nel poter vagliare empiricamente la relazione tra “comporre il suono” e “comporre coi suoni”. Ciò fa del progetto UPIC un passo di superamento di certe difficoltà precedenti, pur nella continuità di certe questioni di fondo. La continuità è ben rilevata dall’orecchio, all’ascolto delle sonorità di *Mycènes Alpha* e di altri lavori, appena meno ruvide e graffianti in confronto agli esiti della sintesi stocastica diretta.

### 5. Sintesi stocastica dinamica

All’inizio degli anni 1990 Xenakis scrive il programma GENDYN, che implementa processi di *sintesi stocastica dinamica* in tempo differito. Scritto su personal computer in linguaggio Basic [Xenakis 1992, pp.304-321], il programma viene successivamente riscritto da collaboratori in linguaggi di programmazione più professionali.<sup>33</sup> Il compositore ne trae due lavori su supporto digitale, *Gendy3* (1991) e *S.709* (1994), interamente realizzati con GENDYN. Nonostante la radice comune, *Gendy3* e *S.709* presentano differenze importanti, sia nelle sonorità, sia nell’articolazione complessiva (il primo ha una durata di 19 minuti circa, il secondo una durata di 7 minuti).<sup>34</sup>

Come negli esperimenti dei primi anni 1970, il criterio fondamentale è ancora il calcolo diretto di sequenze di campioni nello spazio tempo-ampiezza. L’effettivo processo di sintesi però è piuttosto diverso. In breve, la sintesi stocastica dinamica consiste nel generare segmenti rettilinei di segnale di cui modificare lunghezza e pendenza rispetto al piano orizzontale. Significa variare dinamicamente i punti di congiunzione di  $n$  segmenti successivi, definiti da coppie di coordinate  $x$  e  $y$  sul piano discreto tempo-ampiezza. Ogni coppia di coordinate è controllata da una funzione probabilistica fra varie disponibili, e viene linearmente interpolata con la coppia successiva. Si ottengono pertanto segmenti di retta, appunto, di pendenza e lunghezza variabili. Variando solo i valori in ascissa (pendenza del segmento) si hanno segnali periodici (eventualmente suoni ad altezza determinata) dal timbro eventualmente cangiante (spettro dinamico). Variando solo i valori in ordinata (durata del segmento) si ottengono alterazioni della

<sup>33</sup> Il computer utilizzato da Xenakis fu un HP 9000 Series 500, una “workstation” molto performante al tempo, arrivata qualche anno prima al CEMAMu direttamente dalla sede francese della Hewlett-Packard [Colyer 1986]. Alcuni anni dopo, analizzando i listati di codice originali, Peter Hoffmann avrebbe descritto lo stile di programmazione di Xenakis come «davvero molto caotico!» [Hoffmann 2000, p.31].

<sup>34</sup> La prima esecuzione di *Gendy3* ha avuto luogo a Metz, il 17 novembre 1991 (Rencontres Internationales de Musique Contemporaine). Un mese prima, Xenakis aveva presentato a Montréal (International Computer Music Conference) un brano intitolato *Gendy301*, sostanzialmente identico all’altro pur con alcune differenze. Nel catalogo ufficiale risulta solo *Gendy3*, mentre *Gendy301* va considerato una versione preparatoria.

periodicità più o meno significative, quindi suoni in glissando, oppure fenomeni di modulazione di frequenza. Variando entrambi si determinano complesse interferenze tra modulazioni di frequenza e ampiezza, con esiti talvolta molto dinamici, fino a dense texture di rumore articolato. Appare particolarmente fragorosa la quarta sezione di *Gendy3* (4'57"-6'28") probabilmente l'esito più *noise* raggiunto da un musicista della generazione di Xenakis!

### 5.1 *Determinismo e correzione di scala temporale*

L'interpolazione tra valori successivi è un fattore decisivo: ogni coppia di valori probabilistici scivola gradualmente fino ai due nuovi valori successivi in un tempo variabile ma comunque breve (nell'ordine di centisecondi e millisecondi, come vedremo). La variazione stocastica dunque non ha luogo di campione in campione (a frequenza di campionamento, come nella sintesi stocastica dei primi anni 1970) ma a distanza di alcuni campioni (decine o centinaia). Il programma GENDYN prevede la possibilità di controllare dinamicamente i range di variazione stocastica [Xenakis 1992, p.296], introducendo così un orientamento nello sviluppo del risultato sonoro, a breve o anche a lungo termine.

Questi e altri aspetti che qui per brevità non esamineremo (si rinvia a [Xenakis 1992, pp.289-322]) fanno della "sintesi stocastica dinamica" un metodo musicalmente più fertile della sintesi stocastica diretta degli anni 1970. Le variabili si rinnovano con tempi meno ridotti di quanto avvenisse con l'altro approccio, ma con granularità comunque più fine rispetto alle nuvole di grani sonori di *Analogique B*. Perciò le irregolarità aleatorie interne al segnale ora sono a scala intermedia tra "grani" e "campioni". Con un numero ragionevole di segmenti  $n$  (da qualche unità a una ventina) e operando con frequenza di campionamento standard (44.1 kHz), i segmenti di segnale hanno durate nell'ordine dei centisecondi e dei millisecondi, come si era anticipato. Sono ora proprio tali segmenti di interpolazione lineare a costituire le unità elementari del processo micro-compositivo.

La circostanza merita attenzione: dopo aver applicato le sue funzioni stocastiche su scale temporali superiori e inferiori, finalmente Xenakis – per così dire – “centra il bersaglio"! E contestualmente introduce un fattore deterministico quale l'interpolazione, che controbilancia l'inerente condizione probabilistica. Il tutto rappresenta una riduzione di complessità rispetto alla sintesi stocastica diretta. E rappresenta forse anche il frutto dell'esperienza maturata col sistema UPIC, che spingeva appunto a riconsiderare l'isomorfismo fra processi attivi a scale di tempo diverse, fino a trovarne un'opportuna mediazione.

### 5.2 *Un'arte sonora interamente automatizzata*

Una circostanza tutt'altro che trascurabile è il fatto che, oltre a GENDYN, Xenakis scrive un secondo programma, chiamato PARAG, atto a richiamare varie

istanze simultanee o sequenziali di GENDYN, inizializzandone le variabili di rilievo. Nell'insieme, questo è uno schema operativo di composizione algoritmica più usuale: un programma “di alto livello”, più astratto, richiama e gestisce processi “di basso livello”, cioè i concreti processi di sintesi. Anche PARAG naturalmente utilizza funzioni stocastiche, simili o comunque assimilabili a quelle di GENDYN. Si conserva dunque un implicito isomorfismo complessivo. Allo stesso tempo, si persegue il tentativo di creare «una forma d'arte completamente automatizzata, senza alcun intervento umano dopo l'avvio» [ibid., p.295].

Questo quadro operativo corrisponde esattamente a quel che Xenakis aveva potuto solo ipotizzare nel 1971: gestire processi di sintesi stocastica con un programma che a sua volta utilizzasse funzioni stocastiche per costruire articolazione e forma musicale [ibid., p.249]. Riaffiorano d'altra parte anche le suggestioni del 1959, allorquando il compositore aveva immaginato di incapsulare le sue trame granulari in un meccanismo generativo di tipo ricorsivo, organizzato su più livelli temporali [Xenakis 1960, p.90]. Nel 1971, la sintesi stocastica diretta aveva prodotto suoni incessantemente variabili a scala temporale troppo fine (a livello dei campioni audio digitali), il che causava la difficoltà o l'impossibilità di differenziarne i risultati sul piano percettivo. Nel 1959, al contrario, le sequenze granulari avevano stentato a fondersi in trama unitaria, lasciando distinguibili all'orecchio le singole unità elementari, i singoli quanta sonori. Eccesso d'informazione (differenziazione incessante) e scarsità d'informazione (differenziazione insufficiente) sono sostanzialmente equivalenti a una mancanza di informazione *utile*.

Nel 1991, con la sintesi stocastica dinamica la situazione cambia. Le proprietà uditive del processo micro-temporale rispecchiano un bilanciamento fra varianza e ridondanza, fra disordine e ordine, al punto da lasciar emergere molteplici forme sonore e perfino ridondanze strutturali di rilievo sintattico: accade, ad esempio, che molti passaggi di *Gendy3* siano connotati da una gamma di altezze – quindi un insieme di possibilità intervallari e corrispondenti campi armonici – che è in realtà un «epifenomeno a livello di sintesi del suono» [Hoffman 2004, p.143], cioè il frutto non di esplicite determinazioni del compositore ma di fenomeni dinamici all'interno del segnale che si rivelano solo con l'avanzare del processo generativo, secondo vincoli interni alla sintesi non necessariamente noti a Xenakis, in partenza. Più in generale, i suoni ottenuti con GENDYN sono morfologicamente più vari rispetto alle texture granulari di *Analogique B* e allo stesso tempo sono meno incontrollabili, meno prossimi all'indifferenziazione (rumore) dei suoni di sintesi diretta inseriti in *La Légend d'Eer*.

Va da sé che, nel 1990, Xenakis opera con tecnologie più sofisticate di quelle disponibili venti o trent'anni prima, e può espandere i suoi processi micro-compositivi anche in senso polifonico, ottenendo fino a sedici “voci” simultanee – qualcosa di enorme rispetto alle precedenti condizioni di lavoro. Ciò contribuisce a fare di *Gendy3* un *opus magnum* di musica algoritmica. Tuttavia, da sole, le migliori condizioni tecnologiche non spiegano l'avanzamento di una ricerca che, come si è visto, procede dall'esigenza di pensare la relazione tra suono e musica secondo un nucleo di criteri ricorrenti e sempre meglio definiti nel corso degli anni.

## 6. Conclusioni

Dalla nostra indagine si ricava un quadro d'insieme in cui metodi e strategie di sintesi del suono sono espressione di una personale concezione del sonoro e di corrispondenti modalità di mettere in relazione suono e musica. Per tappe successive, anche piuttosto lontane fra loro, Xenakis ha lavorato su un nucleo di questioni in fondo assai omogeneo, traducendolo in condizioni operative e tecniche di volta in volta diverse. Nel linguaggio comune, “fare sintesi” significa ricondurre a unità l'irriducibilità delle circostanze date, comporre o ricomporre la molteplicità: nell'approccio di Xenakis alla sintesi del suono, il “molteplice” tendenzialmente portato a coerenza estetica va riferito innanzitutto a fenomeni dinamici interni al suono a temporalità diverse. Il compositore franco-argentino Horacio Vaggione, riprendendo quest'idea e sublimandola nella sua personale prassi acustica, avrebbe poi sviluppato proprie strategie di composizione *multi-scala* [Vaggione 2008].

### 6.1 Fare sintesi

In *Storia generale delle scienze* (1904), il matematico e storico francese Paul Tannery aveva scritto:

Secondo l'etimologia, il termine *sintesi* equivarrebbe a *composizione*. Ma [...] evoca, secondo l'uso che ne è stato fatto, in modo particolare l'idea di elementi ottenuti per *analisi* o *scomposizione*. Orbene [per uno storico] la *sintesi* non sempre produce, come in chimica, una composizione simile a quanto è stato analizzato; essa produce un risultato essenzialmente diverso, e cioè una nuova opera storica [Tannery 1986, p.71].

La determinazione di Xenakis ad abbandonare il paradigma dell'analisi armonica di Fourier coincide con un'istanza *sui generis* di sintesi, non con l'inverso di un momento di analisi: essa produce «un risultato essenzialmente diverso», una nuova forma sonora. In ciò sta la connotazione *non-standard* dei processi di generazione elettronica del suono che il compositore ha ideato e praticato: essi non sono il correlato di una scomposizione e scaturiscono invece da un'intuizione creativa, da un'attitudine teoretica non-specifica tradotta in prassi creativa. È vero che il procedimento granulare escogitato nel 1959 può ricondursi ovviamente a una cornice analitica (Gabor), ma per Xenakis ciò che conta davvero è che esso funzioni come concreto dispositivo procedurale, ingegneristicamente calibrato e adatto a “fare qualcosa”. A fare cosa? A generare, in quel caso, «nuvole di suono», a materializzare in forma sensibile istanze di un'entità di senso puramente metaforico, non un dato oggettivo da scomporre e rappresentare [Di Scipio 2003]. Pur facendo leva su osservazioni di contenuto empirico – pensiamo all'importanza accordata alle micro-variazioni non periodiche nel suono, riprese dalla ricerca sonologica di Meyer-Eppler – Xenakis mira prima di tutto a produrre sonorità inaudite, «prive di precedenti e inimmaginabili fino ad oggi» [Xenakis 1960, p. 90].

Se *Analogique B* è la sonificazione della “musica stocastica markoviana” (*Analogique A*, *Syrmos*), la sintesi stocastica “diretta” (1971) e infine la sintesi stocastica “dinamica” (1991) sono invece la proiezione nel suono della “musica stocastica libera” (*Pithoprakta*, *Achorripsis* e il ciclo dei lavori *ST*). In entrambi i casi, una progettualità orientata a strutture musicali viene ripensata come generativa di strutture sonore, facendosi così potenziale forma di progettualità non-specifica e intermediale – infatti elaborata in qualche misura anche nelle “galassie” di puntini luminosi del *Diatope* [Xenakis 1978]. Non senza difficoltà e aporie che abbiamo cercato di comprendere, l’approccio di Xenakis alla sintesi del suono tende a generalizzare una concezione unitaria del tempo nella costruzione musicale – un obiettivo che Karlheinz Stockhausen ha perseguito in modi del tutto differenti, in un certo senso antitetici. Lo sviluppo di UPIC, spesso visto come un capitolo a sé stante, rappresenta invece un passaggio volto a ponderare meglio il rapporto fra micro- e macro-temporalità, mitigando l’arbitrio di un isomorfismo ingenuo.

Alla stregua di altri della sua generazione (iniziando proprio da Stockhausen), Xenakis si appropria dei mezzi elettronici del suo tempo seguendo l’esigenza di *comporre-il-suono* – un’esigenza complementare, ma non sempre sovrapponibile, all’esigenza di riprogettare ed espandere le pratiche di composizione di musica strumentale e vocale. Gli esiti di questa ricerca compositiva riflettono dunque una sensibilità che tende a vivere le *forme del suono* come *musica*, come fattore costruttivo oltre che espressivo. Il suono vi appare dunque come *forma* – come forma *formata* (deliberatamente costruita, composta) e forma *formans* (suggestiva del fare compositivo). Ciò si innesta naturalmente in percorsi storici di portata più generale, decisivi di una svolta storico-estetica della tarda modernità musicale che è possibile connotare come il passaggio «dalla musica al suono» [Solomos 2013]. Una svolta da cui, attraverso derive molteplici, sarebbero scaturite pratiche creative diverse ed eterogenee, forme di “arte sonora” ancora oggi non del tutto storicizzabili ma soprattutto non sempre (o non più) ridicibili ad accezioni storicamente ereditate di “musica” [Di Scipio 2021, pp.544-547].

Come negli snodi storici più emblematici della musica elettroacustica, il suono – una volta “supporto” o “materiale” della costruzione musicale – diventa esso stesso frutto di perizia tecnica e di inventiva musicale, appartenente al regno delle forme prodotte dall’uomo. Gli artifici della sintesi stocastica sono emblematici, in proposito: *Gendy3* è forse un grande esempio di un *concetto forte di sintesi*, nel senso di un dispositivo che genera suono e musica in un unico gesto costruttivo. L’identità dell’opera vi si materializza non tanto o non solo in una determinata configurazione linguistico-formale, ma nell’insieme delle condizioni di possibilità prese in carico dal compositore – cioè, in questo caso, nel codice di programmazione informatica! Xenakis è probabilmente il solo tra i compositori della sua generazione (nati nei primi anni 1920) che abbia scritto e fatto circolare i suoi codici di programmazione [Xenakis 1992: pp.145-153, 279-288, 300-321]. In fondo si tratta di un caso antesignano di software *open source*! Ciò ha favorito collegamenti e contatti con esperienze successive, molto differenti oltre che molto più giovani, dove comunque “materialità” e “virtualità” del software sono categorie vissute dialetticamente [Di Scipio 2021, p.499].<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Sulla ripresa e rielaborazione del lavoro di Xenakis in autori più giovani, cfr. [Hoffmann 2011; 2015]. Tralascio per brevità i numerosi e più recenti casi di *porting* ed espansione del programma GENDYN.

L'indagine proposta in queste pagine potrebbe in teoria ampliarsi secondo un'idea più generale di *arte sintetica*, anche nella contraddittoria dimensione moderna e modernista della *sintesi delle arti* – alla quale infatti andrebbero collegati i *Polytopes* (opere di suono, luce e spazio). Ciò posizionerebbe l'eredità di Xenakis in un più vasto quadro di fenomeni estetici decisivo della modernità matura, ma probabilmente anche esaurito con essa. Qui abbiamo scelto una prospettiva assai più circoscritta, ma forse anche più fertile, più aperta al nostro presente e al futuro: l'impegno per certi versi autarchico di Xenakis a *comporre le tecniche di sintesi* prima di comporre *con* esse esemplifica in fondo un'attitudine di responsabilità del fare compositivo, dove la libertà progettuale e operativa appare condizione irriducibile di libertà espressiva ed estetica.

### Riferimenti bibliografici

- [Arcella & Silvestri 2015] Andrea Arcella e Stefano Silvestri, “*Analogique B. A computer model of the compositional process*”, in *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique* (a cura di Makis Solomos), L'Harmattan, 2015.
- [Baudel 2006] Thomas Baudel, “From information visualization to direct manipulation: extending a generic visualization framework for the interactive editing of large datasets”. Proceedings of the *19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 2006 <https://doi.org/10.1145/1166253.1166265>
- [Bregman 1990] Albert Bregman, *Auditory Scene Analysis*, MIT Press, 1990.
- [Brillouin 1959] Léon Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, 1959.
- [Colyer 1986] Cornelia Colyer, “Studio Report: CEMAMu”, Atti della *International Computer Music Conference*, L'Aia, 1986.
- [Di Scipio 1994] Agostino Di Scipio, “Formal processes of timbre composition challenging the dualistic paradigm of computer music”, in Atti della *International Computer Music Conference*, Aarhus, 1994.
- [Di Scipio 1995] Agostino Di Scipio, “Da *Concret PH* a *Gendy301*. Modelli compositivi nella musica elettroacustica di Xenakis”, *Sonus*, 14, 1995. Trad. inglese “Compositional models in Xenakis' electroacoustic music”, *Perspectives of New Music*, 36(2), 1998.
- [Di Scipio 1997] Agostino Di Scipio, “The problem of 2nd-order sonorities in Xenakis' electroacoustic music”, *Organised Sound*, 2(3), 1997.
- [Di Scipio 2001] Agostino Di Scipio, “Clarification on Xenakis: the cybernetics of stochastic music”, in *Présences de Iannis Xenakis* (a cura di Makis Solomos), Parigi, Centre de Documentation de la Musique Contemporaine, 2001.
- [Di Scipio 2003] Agostino Di Scipio, “Métaphore, formalisation et intuition dans *Analogique A et B* de Xenakis” in *Iannis Xenakis, Gérard Grisey. La métaphore lumineuse* (cura di Makis Solomos), L'Harmattan, 2003.
- [Di Scipio 2004] Agostino Di Scipio (a cura di) *Perspectives on Xenakis*. Special issue of *Journal of New Music Research*, 33(2), 2004.
- [Di Scipio 2006] Agostino Di Scipio, “Le nubi di suono ed i loro meccanismi. Uno studio di *Analogique A et B*”, in *Iannis Xenakis. Musicista scienziato architetto*. Quaderni di Ricerca IRMus n.2 (a cura di A. Melchiorre), Edizioni Scuole Civiche di Milano, 2006.

- [Di Scipio 2015] Agostino Di Scipio, “Stochastics and granular sound in Xenakis’ electroacoustic music”, in [Solomos 2015].
- [Di Scipio 2016] Agostino Di Scipio, “I quanta acustici di Gabor nelle tecnologie del suono e della musica”, *Musica / Tecnologia*, 10, 2016. <https://oajournals.fupress.net/index.php/mt/article/view/7468>
- [Di Scipio 2021] Agostino Di Scipio, *Circuiti del tempo. Un percorso storico-critico nella creatività musicale elettroacustica e informatica*. LIM, 2021.
- [Döbereiner 2011] Luc Döbereiner, “Models of Constructed Sound: Nonstandard Synthesis as an Aesthetic Perspective”, *Computer Music Journal*, 35(3), 2011.
- [Fleuret 1988] Meurice Fleuret, “Il teatro di Xenakis”, in *Xenakis* (a cura di Enzo Restagno), EDT, 1988.
- [Frenkel et al. 1991] V.Y. Frenkel, B.M. Bolotovskii e R. Peierls (a cura di), *Igor Evgen’evich Tamm (1895–1971). Selected Papers* Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-74626-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-74626-0_1)
- [Gabor 1947] Dennis Gabor, “Acoustical quanta and the theory of hearing”, *Nature* 159, 1947. Trad. italiana “I quanta acustici e la teoria dell’udito”, *Musica / Tecnologia*, 10, 2006. <https://oajournals.fupress.net/index.php/mt/article/view/7467>
- [Georgaki 2015] Anastasia Georgaki, “Sound pedagogy through polyagogy”, in *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique* (a cura di Makis Solomos), L’Harmattan, 2015.
- [Georgaki & Solomos 2022] Anastasia Georgaki e Makis Solomos (a cura di), *Proceedings of the Centenary International Symposium Xenakis 2022*, Atene, Kostarakis Scientific, 2022. <https://xenakis2022.uoa.gr/proceedings/>
- [Hagan 2005] Kerry Hagan, “Genetic analysis of Xenakis’ *Analogique B*”, Proceedings of the *Electroacoustic Music Studies Network*, Montréal 2005. <http://www.ems-network.org/spip.php?article150>
- [Harley 2002] James Harley, “The electroacoustic music of Iannis Xenakis”, *Computer Music Journal*, 26(4), 2002.
- [Hoffmann 2000] Peter Hoffmann, “The new GENDYN program”, *Computer Music Journal*, 24(2), 2000.
- [Hoffmann 2001] Peter Hoffmann, “L’électroacoustique dans l’œuvre de Iannis Xenakis”, in *Portraits de Iannis Xenakis* (a cura di François-Bernard Mâche), Bibliothèque Nationale de France, 2001.
- [Hoffmann 2004] Peter Hoffmann, “Something rich and strange. Exploring the Pitch Structure of *Gendy3*”, *Journal of New Music Research*, 33(2), 2004.
- [Hoffmann 2011] Peter Hoffman, “Xenakis Alive! Explorations and extensions of Xenakis’ electroacoustic thought by selected artists”, *Atti dello Xenakis International Symposium*, Londra, 2011.
- [Hoffmann 2015] Peter Hoffmann, “Post-Xenakian art: after and beyond xenakis”, in *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique* (a cura di Makis Solomos), L’Harmattan, 2015.
- [Ikeshiro 2014] Ryo Ikeshiro, “Audification and non-standard synthesis in *Construction in Self*”, *Organised Sound*, 19(1), 2014.
- [Julesz 1981] Bela Julesz, “Textons, the elements of texture perception, and their interactions”, *Nature*, 290, 1981.
- [Kuhn 1962] Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1962. Trad. italiana *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, 1978.

- [Marino *et al.* 1993] Gérard Marino, Marie-Hélène Serra, Jean-Michel Raczinski, “The UPIC system: origins and innovations”, *Perspectives of New Music*, 31(1), 1993.
- [Médigue 2020] Guy Médigue, “The early days of UPIC”, in [Weibel, Brümmner & Kanach 2020].
- [Meyer-Eppler 1958] Werner Meyer-Eppler, “Statistic and psychologic problems of sound”, *Die Rebie*, 1, 1958.
- [Meyer-Eppler 1959] Werner Meyer-Eppler, *Grundlagen und Anwendungen der Informations Theorie*, Springer-Verlag, 1959.
- [Orcalli 1993] Angelo Orcalli, *Fenomenologia della musica sperimentale*, Sonus Edizioni, 1993.
- [Paland & von Blumenroeder 2009] Ralph R. Paland e Christoph von Blumenroeder (a cura di), *Iannis Xenakis: Das elektroakustische Werk*, Der Apfel Verlag, 2009.
- [Pietruszeswki 2020] Marcin Pietruszeswki, “The digital instrument as an artifact”, in [Weibel, Brümmner & Kanach 2020].
- [Raczinski & Marino 1988] Jean-Michel Raczinski e Gérard Marino, “A real time synthesis unit”, Atti della *International Computer Music Conference*, Colonia, 1988.
- [Roads 1978] Curtis Roads, “Granular Synthesis of Sound”, *Computer Music Journal*, 2(2), 1978.
- [Roads 2006] Curtis Roads, “Xenakis e la sintesi granulare”, in *Iannis Xenakis. Musicista scienziato architetto*. Quaderni di Ricerca IRMus 2 (a cura di A. Melchiorre), Edizioni delle Scuole Civiche di Milano, 2006.
- [Roads 2015] Curtis Roads, “From grains to forms”, in [Solomos 2015].
- [Saint-Jean 1977] Patrick Saint-Jean, *Conception d'un système informatique de laboratoire opérationnel pour le Centre d'Études de Mathématique et Automatique Musicale*, Parigi, École Supérieure d'Informatique, d'Électronique et d'Automatique, 1977.
- [Shannon & Weaver 1949] Claude Shannon e Warren Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, 1949. Trad. italiana *La teoria matematica delle comunicazioni*, Etas Compass, 1971.
- [Solomos 2006] Makis Solomos, “Le Diatope et La Légende d'Eer de Iannis Xenakis” (a cura di Bruno Bossis, Anne Veitl e Marc Battier). *Musique, instruments, machines. Autour des musiques électroacoustiques*, Université de Paris 4, 2006.
- [Solomos 2010] Makis Solomos, “Xenakis, il Diatope e La Légende d'Eer”, *Le arti del suono*, 3, 2010.
- [Solomos 2013] Makis Solomos, *De la musique au son. L'émergence du son dans la musique des XX<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup> siècles*, Presses Universitaires de Rennes, 2013
- [Solomos 2015] *Iannis Xenakis, la musique électroacoustique* (a cura di Makis Solomos), L'Harmattan, 2015.
- [Solomos & Hoffmann 1998] Makis Solomos e Peter Hoffmann, “The electroacoustic music of Iannis Xenakis”, Atti del *Symposium in Music and Computers*, Corfu, 1998.
- [Tannery 1986] Paul Tannery, “De l'histoire générale des sciences”, *Revue de synthèse historique*, 22, 1904. Traduzione italiana in *Problemi e prospettiva di storia della scienza* (a cura di M. Baldini), La Città Nuova, 1986.
- [Turner 2014] Charles Turner, *Xenakis in America*, One Block Avenue, 2014.
- [Truax 1988], Barry Truax, “Real-time granular synthesis with a digital signal processing computer”, *Computer Music Journal*, 12(2), 1988.
- [Vaggione 2008] Horacio Vaggione, “Composition musicale : représentations, granularités, émergences”, *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 48-49, 2008.

- [von Foerster & Beauchamp 1969] Heinz von Foerster e James Beauchamp (a cura di), *Music by computers*, Wiley and Sons, 1969.
- [Weibel, Brümmer & Kanach 2020] Peter Weibel, Ludger Brümmer e Sharon Kanach (a cura di) *From Xenakis's UPIC to Graphic Notation Today*, Hatje Cantz Verlag, 2020.
- [Xenakis 1960] Iannis Xenakis, "Elements of Stochastic Music", *Gravesaner Blätter*, 18, 1960.
- [Xenakis 1963] Iannis Xenakis, *Musiques formelles*. Numero speciale di *La revue musicale*, 253/254, 1963.
- [Xenakis 1965] Iannis Xenakis, "La voie de la recherche et de la question", *Preuves*, 177, 1965.
- [Xenakis 1971] Iannis Xenakis, *Musique/Architecture*, Tournai, 1971. Trad. italiana *Musica, architettura*, Spirali Editore, 1982.
- [Xenakis 1978] Iannis Xenakis, *Le Diatope. Geste de lumière et de son*, Parigi, 1978 (libretto distribuito ai visitatori dell'installazione *Diatope*).
- [Xenakis 1992] Iannis Xenakis, *Formalized Music. Thought and Mathematics in Music*, Pendragon Press, 1992. Edizione rivista e ampliata di *Formalized Music. Thought and Mathematics in Music*, Indiana University Press, 1971.
- [Xenakis 2003] Iannis Xenakis, *Universi del suono. Scritti e interventi 1955-1994* (a cura di A. Di Scipio), LIM, 2003.