

BARÁTH BÁLINT

KÁOSZ ÉS KOMPOZÍCIÓ

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

2024

Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem

28-as számú művészet- és művelődéstörténeti besorolású doktori iskola

KÁOSZ ÉS KOMPOZÍCIÓ

BARÁTH BÁLINT

TÉMAVEZETŐ: GRABÓCZ MÁRTA PhD, SZIGETVÁRI ANDREA DLA

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

2024

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás.....	III
Bevezetés	IV
I. RÉSZ	1
1. Fraktálmodell Alberto Posadas <i>Modulaciones</i> című művében	1
1.1. A fraktáljelenség	1
1.2. Fraktálok a zeneszerzésben.....	3
1.2.1 A zaj, mint kiindulópont.....	3
1.2.2 Kapcsolódódás a fraktálokhoz Posadas előtt	4
1.3. A <i>Modulaciones</i> szerkezetének alapja	7
1.4. A fraktálmodell felépítése.....	10
1.4.1. Gesztusok eloszlásai.....	11
1.4.2. Hangmagasságok.....	13
1.4.3. A szólamok szűrési.....	14
1.5 A főszakaszok tanulmányozása	15
II. RÉSZ.....	27
2. Tristan Murail: <i>Allégories</i> című művének elemzése	27
2.1 Az <i>Allégories</i> objektumai	27
2.2 Szintézistípusok az <i>Allégories</i> -ban	37
2.2.1. Frekvenciamoduláció	37
2.2.2. Additív szintézis	40
2.3 A szintetikus szólamról.....	41
2.4 Az <i>Allégories</i> formai felépítése	42
2.4.1 Az első formai egység.....	43
2.4.2 A második formai egység.....	54
2.4.3 A harmadik formai egység	55
2.4.4 A negyedik formai egység.....	64
2.5 Az <i>Allégories</i> káosz szemlélete	68
III. RÉSZ	72
3. Lindenmayer-rendszerek a zeneszerzésben.....	72
3.1 Az algoritmus kialakulása.....	73
3.2 Az algoritmus leírása	74
3.3 Teknős interpretátor	76
3.4 Elágazások	80
3.5 Az L-rendszerek típusai	82

3.5.1 Kontextusfüggő és kontextusfüggetlen L-rendszerek.....	82
3.5.2 Determinisztikus és sztochasztikus L-rendszerek.....	83
3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái	85
3.6.1.1. Roger Luke Dubois rugalmas hozzárendelési megoldásai.....	86
3.6.1.2. Külső és belső hozzárendelés	87
3.6.1.3. Események egyértelmű hozzárendelése	88
3.6.1.4. Akkordikus hozzárendelés	90
3.6.1.5. Paraméteres hozzárendelés.....	92
3.6.2. Hozzárendelések további megfontolásai.....	97
3.7. Konklúzió	104
Ábrajegyzék.....	106
Kottapéldák jegyzéke	109
Bibliográfia.....	111

Köszönetnyilvánítás

Nagy hálával tartozom két témavezetőmnek, Grabócz Mártának és Szigetvári Andreának, akik számtalan fogalmazással, értelmezéssel kapcsolatos kérdésben segítettek a munkámat. Kettejük felbecsülhetetlen segítsége nélkül nem tudtam volna megküzdeni az algoritmikus zeneszerzés útvesztőivel és az eljárásainak bemutatásával. Köszönetemet szeretném kifejezni Menyhért Mártonnak, aki a dolgozat megírása során nagyszámban felmerülő programozási akadály leküzdésében sietett fáradhatatlanul a segítségemre.

Végül hálás köszönet illeti feleségemet, Bocz Rékát, aki nemcsak türelemmel és szeretetteljes légkört nyújtva viselte a dolgozat megírásához szükséges időszakot, hanem tevékenyen segített a szövegkezelésben és az interpretációban.

Dolgozatomat a tanulmányaim elején, 2019 októberében elhunyt Jeney Zoltán emlékének ajánlom, akivel még a témakeresés időszakában mély eszmecserét folytattam az algoritmusok zenében történő megjelenéséről, felhasználásáról és jövőjéről.

Budapest, 2024. április 3.

Baráth Bálint

Bevezetés

Amióta csak az eszemet tudom, lenyűgözött a természet. Csodáltam a felhők alakját és tovahaladását, a füst mozgását, a fák ágrendszerét vagy éppen a kaktuszok virágainak mintázatát. Számtalanszor gondolkodtam azon, hogy mi van a mozgás mögött és hogyan alakulnak ki ezek a különleges, tiszta, organikus formák. Végül szinte természetes volt, hogy rábukkantam azokra az elméletekre, amelyek éppen ezeket a jelenségeket igyekeznek modellezni. A káosztudomány végérvényesen magával ragadott és megannyi inspiráló rádöbbenést, ámulatba ejtő felismerést hozott.

Megvizsgálhatjuk egy sziget partjainak formáját, egy hópehely alakját, az égi mechanikát vagy egy dinamikus rendszer (például a kettős inga) összetett viselkedését – egy idő után felsejlik egy univerzális modell. Ez a modell, amelyet nevezhetünk káosznak, a természetben sok helyen jelenlévő formákat és folyamatokat igyekszik leírni. A káosz egy olyan jelenség, amely megtalálható a mindennapjainkban éppúgy, mint a természettudományok számos kísérletében. Tekintettel arra, hogy a káosz szót többnyire a „zűrzavar” értelmében használjuk, érdemes tisztázni a mindennapi életre vonatkozó, és a tudományos megközelítéssel kimutatható káosz fogalombeli különbségét.

A káosz eredetileg görög szó, jelentése „semmi, üresség”, az „összevisszaság” jelentést csak később, Arisztotelész munkássága nyomán kapta meg.¹ Legtöbbször egy állapot leírására alkalmazzuk, és összekötjük a mennyiséggel. Minél több tárgyból álló rendezetlenséget látunk, annál inkább helyesnek érezzük a kaotikus szót a látottak leírására. Tudományos értelemben viszont nem egy állapotot jelöl a káosz, hanem egy rendszer időbeli viselkedésre vonatkozik.²

A káosz tudományos fogalmára nem találunk egységes definíciót, íme, pár példa a sok meghatározás közül:

- Egyfajta periodikusság nélküli rend.
- Az egyszerű, beépített véletlenszerű vonások nélküli modell azon képessége, hogy szabálytalan viselkedést mutat.
- Látszólag véletlenszerű, ismétlődő viselkedés egy egyszerű determinisztikus rendszeren belül.³

¹ Tél Tamás: „A káosz természetrajza.” *Természet világa*. 129/9 (1998. 9): 386-388. 386.

² Tél Tamás: *A káosz természetrajza*, i.m., 386.

³ Sadar, Ziauddin, Abrams, Iwona: *Introducing Chaos: A Graphic Guide*. (Cambridge :Icon Books Ltd., 2008). 6.

- A káosz a kevés összetevőből álló rendszerek összetett mozgása.
- A káosz önmagát nem ismétlő állandósult mozgás.⁴

Az önmagát nem ismétlő mozgás az időben nem periodikus, még közelítőleg sem. Ez az egyetlen tulajdonság, amelyben a „zűrzavar” jelentés feltűnik. Az állandósultság a hosszú ideig tartó, nem csökkenő mozgásra utal, ami valamilyen energiabefektetés hatására alakul ki. Ezeket a különös, a várakozástól eltérő mozgásokat számos mindennapi jelenségben megtalálhatjuk, példa erre a hópelyhek szállingózása.⁵

Joggal tekintjük a káosz-forradalom egyik alapkövének azt a felismerést, hogy egyszerűen megfogalmazható képletekkel is modellezhető nagyon bonyolult viselkedés. Ez a megállapítás írja le kaotikus rendszerek egyik fontos tulajdonságát.

A káosz tehát egy olyan megjósolhatatlan mozgás, ami determinisztikus, vagyis a körülmények által pontosan meghatározott. A megjósolhatatlanság a körülmények pontos meghatározásában rejlik, ugyanis a mozgás csak akkor lehetne megjósolható, ha a kezdeti meghatározás végtelenül pontos lenne. Ez természetesen elvi absztrakció. A káosz ilyen módon egyszerre fejezi ki az elvi determinizmust, és annak gyakorlati korlátait.⁶

A kaotikus rendszerek következő fontos tulajdonsága a nemlinearitás, amit például az egyszerű feltétel – bonyolult következmény ismertetőjeggyel is le lehet írni. A lineáris rendszerekben a kiinduló szabályok bonyolultsága meghatározza a rendszer felépítését, a kiindulópont és a végeredmény komplexitása egymással arányos. A kaotikus rendszerek többségében azonban a következmény nem arányos a kiváltó okával, hanem annak egy komplex függvénye. A nemlinearitást úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a játék alakulása befolyásolja a játékszabályokat. Az így keletkező csavaros változékonyság teszi nehezen kifürkészhetővé a nemlinearitást, egyben ez ad lehetőséget a vele járó gazdag viselkedésformák kialakulására, amelyek a lineáris rendszerekben nem fordulnának elő.⁷ A káosz tekinthető a nemlineáris rendszerek időbeli viselkedéseként.⁸ A nemlineáris rendszerek többségében megvan a káoszpotenciál. A káosz megvalósulása azonban a kiindulási helyzettől és a rendszer konkrét tulajdonságaitól is függ.⁹

⁴ A meghatározásokhoz lásd: Tél Tamás: *A káosz természetrajza*, i.m., 386.

⁵ I.m., 386.

⁶ Tél Tamás: *A káosz természetrajza*, i.m., 387.

⁷ Gleick, James: *Káosz – Egy új tudomány születése*. Ford.: Szegedi Péter. (Budapest: Göncöl kiadó, 1999.) 37.

⁸ Tél Tamás: *A káosz természetrajza*, i.m., 387.

⁹ I.m., 387.

A kaotikus mozgást tanulmányozva egy újabb alapvető tulajdonság bukkan fel, a kezdeti feltételekre¹⁰ mutatott jelentős érzékenység. Ha két azonos tulajdonságokkal rendelkező szalvétát azonos helyzetből megpróbálunk leejteni, a mozgásuk kis idő elteltével különböző lesz. Ha a kiinduló pontban megadott kis pontatlanság következményei az időben gyorsan szaporodnak, akkor a mozgás megjósolhatatlanná válik. A kaotikus mozgás tehát nem jelezhető előre. Ebből az következik, hogy minden olyan tudományban, ahol a káosz előfordul, számításba kell venni az előrejelezhetőség problémáját.¹¹ Többek között a nem megjósolható viselkedés miatt vezették be a valószínűségi leírást a kaotikus mozgásra alkalmazva, hogy egyetlen mozgás pontos megfigyelése helyett mozgás sokaságot lehessen vizsgálni. A valószínűségi leírás azonban nem jelent bizonytalanságot, indeterminizmust. Ezzel a leírással pontos kijelentések tehetők.¹²

Miután kiderült számomra, hogy a kaotikus folyamatoknak egy részét fel lehet használni zenei környezetben is, könnyedén jött a gondolat, hogy a tanulmányaimat a káosztudomány zenei vetületeinek megismerésére irányítsam. Ehhez azonban szükség volt bizonyos, eddig számomra felszínes módon ismert zeneszerzési technikákkal kapcsolatos tudásom elmélyítésére. Ezek az algoritmikus zeneszerzés eljárásai, amelyek ugyan Magyarországon bántóan ritkán kerülnek reflektorfénybe, nemzetközi viszonylatban különleges megoldásokra, elméletekre és kutatási területekre lehet bukkanni.¹³

Az algoritmikus zeneszerzés több részterületre bontható. Ezek közé tartozik a genetikusan algoritmusok¹⁴, a generatív nyelvtanok¹⁵, a sejtautomaták¹⁶, a mesterséges

¹⁰ A rendszert a vizsgált időszak kezdetén jellemző információk összessége.

¹¹ Tél Tamás: *A káosz természetrajza*, i.m., 387.

¹² I.m., 387.

¹³ Lásd: Alex McLean, Roger Dean: *The Oxford Handbook of Algorithmic Music*. (New York: Oxford University Press, 2018).

¹⁴ A genetikusan algoritmusok (genetic algorithms) az evolúciós algoritmusok sajátos alosztályai. Ezek az algoritmusok a természet fejlődési stratégiáit modellezik, alapjukat a Darwin-féle evolúció elmélet adja. A genetikusan algoritmusok fogalmi köze tartozik a mutáció, a szelekció vagy a legerősebb túlélése. Ritmikus, dallami vagy hangszínfejlődést leíró mintázat generálására, fejlesztésére, illetve optimalizálásra alkalmazzák.

¹⁵ Ezek az algoritmusok Noam Chomsky által megalkotott nyelvi modellen alapulnak. A Chomsky-féle generatív nyelvtan a mondatelméletét alapul véve, karakter-újraíró szabályokat alkalmazva kutatja és modellezi a nyelv mondatalkotó képességeit. Ezeket az algoritmusokat zenei analízisre és generálására is használják, bár én az analízisre több példát ismerek.

¹⁶ A sejtautomaták (cellular automata) rendszerint diszkrét dinamikusan rendszereket modelleznek. Az időben lezajló rendszerállapot-sorozat egy n-dimenziós sejt-/cellatérben jelenítik meg (a kétdimenziós megjelenítés a leggyakoribb). A sejtterben megtalálható sejteknek véges állapotaik lehetnek (például 0 vagy 1, másképpen inaktív vagy aktív). Széles körben nevezetes sejtautomata a John Conway által megalkotott Élet Játéka (The Game of Life). Az automaták sokféle módon felhasználhatók zenei környezetben. Én a formaképzésre, poliritmusok generálására, illetve a MIDI-n alapuló rendszerek generatív automatizálására irányuló törekvéseket tanulmányoztam.

neurális hálók¹⁷ illetve a káosz és önhasonlóság részterülete.¹⁸ Az algoritmikus zeneszerzés területén a káosztudomány eredményei közül a fraktálokkal, dinamikus rendszerekkel, különös attraktorokkal és a Lindenmayer-rendszerekkel kapcsolatos eljárásokat lehet találni. Ebben a munkában a fraktálokra és a Lindenmayer-rendszerekre fókuszáltam. A dolgozat nem foglalkozik a dinamikus rendszerek, illetve szűkebben tekintve a különös attraktorok¹⁹ zenei felhasználásával. A dinamikus rendszerek tanulmányozása szorosan kötődik a káosztudományhoz, azonban nem találtam olyan darabokat, amelyek egyrészt bizonyíthatóan egy dinamikus rendszer/attraktor bármilyen aspektusát használnák, másrészt megfelelően, továbbá elérhető módon lennének dokumentálva.

A munkám három részből áll. Az első részben Alberto Posadas katalán zeneszerző *Liturgia Fractal* című vonósnégyesre írt ciklusának egy darabját, a *Modulaciones*-t elemzem. A ciklus különböző fraktáljelenségek zenei megvalósításával foglalkozik, mint például a Mandelbrot-halmaz (*Órbitas*) vagy az emberi érrendszer szétágazó szerkezete (*Bifurcaciones*).²⁰ Bármelyik darabot választhattam volna, de számomra a *Modulaciones* tűnt a legizgalmasabbnak, amelyben a szerző a fraktál Brown-mozgást használja fel.

A második részben Tristan Murail *Allégories* című, kis együttesre és elektronikus hangszerre írt művét vizsgálom. Ez a különleges darab remek példa a hagyományos hangszeres hangzás és az elektronikus szintézis által nyújtott hangszínek összekapcsolására. A mű kompozíciós elvét éppúgy áthatja a fraktáljelenség tanulmányozásából fakadó formaképzés, mint az objektum orientált programozási paradigma alkalmazása a motívumok fejlesztésére.

Ha egy zeneszerző egy algoritmus kiértékelésének eredményeire támaszkodva hozza létre egy darabját, lényegében két úton indulhat el. Az egyik lehetőség során nem kívánja megváltoztatni, átalakítani az algoritmus eredményét és abban érdekelt, hogy addig finomítsa az adott algoritmust, ameddig az a kívánalmi szerinti eredményt nem adja. Ebben az esetben az algoritmus művészi értékét keresi és a zeneszerzői munka fő hangsúlyát az eljárási útvonalak magas szintű szervezésében látja.

¹⁷ A mesterséges neurális háló (Artificial Neural Network, ANN) az idegrendszert alkotó neuronok szerkezetének mintájára felépülő, egymással összeköttetésben álló egységek rendszere. Széles körben alkalmazhatók zenei elemzésre és generálásra egyaránt.

¹⁸ További információk az algoritmusokról: Nierhaus, Gerhard: *Algorithmic Composition. Paradigms of Automated Music Generation*. (Wien: Springer-Verlag, 2009.)

¹⁹ Az attraktor egy olyan geometriai alakzat, amely felé a rendszer fázistérben ábrázolt pályája az idők során konvergál. A fázistér valamely rendszer viselkedésének leírására használt absztrakt tér. Szabados László: „Glosszárium.” *Magyar Tudomány*, 100/4 (1993. 04): 524-526. 524.

²⁰ Besada, José L.: *Metamodels in Compositional Practices*. Paris: Édition Delatour/IRCAM, 2017.

A másik opció során a zeneszerző bizonyos mértékben megváltoztatja az algoritmus kiértékelésének eredményét és az általa elért kívánt ideál függvényében módosítja, kombinálja, illetve felhasználja a produktumot vagy annak egy részét. Ebben az esetben az algoritmikus gondolkodás a darab alapját képezi, azonban az algoritmust, mint teremtő közeget lehet csupán felfogni a zeneszerző kompozíciós folyamatában.

A két eljárást elképzelhetjük úgy is, mint egy tengely két szélső pontját. A tengely jobb oldalán az alkalmazott modell matematikai szerkezetét is hűen tükröző műveket találunk, a bal oldalán pedig olyan darabokat, amelyek az alkalmazott modellt, mint többdimenziós ihletforrást használják. Az *Allégories* ennek a képzeletbeli tengelynek a bal oldalán helyezkedik el, ellentétben a *Modulaciones*-szel, amely egyértelműen a jobb oldalon található. A két darab a fraktálok eltérő zenei felhasználását hivatott bemutatni, emellett az állandó, nemlineáris mozgás – amely azonban szigorú szabályoknak engedelmessé válik – ugyancsak a két darab sajátja.

A harmadik rész a Lindenmayer-rendszerek (L-rendszerek) zenei felhasználásával foglalkozik. Ebben a részben nem egy darabot elemzek, hanem azt mutatom be, hogy milyen módokon lehet az L-rendszerek kimenetét zenei paraméterekhez kötni és közvetlen kapcsolatot létesíteni az algoritmus és a kompozíció között. A műelemzés mellőzésének két fő oka van. Az egyik az, hogy az általam elérhető, L-rendszereket alkalmazó darabok döntő része nem tisztán az L-rendszereket használja, hanem vagy módosítja, vagy összevonja más algoritmusokkal, így egy darab analízisében nehézkesen vagy egyáltalán nem bontható ki kielégítően az L-rendszerek általános, a zeneszerzésben kimutatható szerepe. A másik ok pedig abban áll, hogy izgalmasabbnak ítélem a változatos hozzárendelések szemléltetését, mivel így egyrészt az L-rendszerek alapjait, működési elveit is jobban be lehet mutatni, másrészt ezek az elgondolások és stratégiák magyar nyelven is hozzáférhetővé válnak más alkotók számára.

I. RÉSZ

1. Fraktálmodell Alberto Posadas *Modulaciones* című művében

1.1. A fraktáljelenség

A fraktál szót Benoit B. Mandelbrot alkotta meg¹ és vezette be 1975-ben.² A fraktál egy olyan geometriai objektum, amelynek a határoló vonalai végtelenül töredezetten (szemben az általánosan jobban ismert alakzatokkal, mint például a téglalap). Ez a tulajdonság volt az egyik fő oka a fraktálokkal kapcsolatban táplált kezdeti ellenségeskedésnek,³ mivel a huszadik század elején a matematika a görbékkel jellemezi tudta, mégsem tudta leírni egy összegyűrt papírlap felületét.⁴ A fraktálok fontos ismertetőjele az úgynevezett önhasonlóság.⁵ Az önhasonlóság az objektum egyes részeinek a viszonyára utal. Bármely részt vesszük ki és hasonlítjuk össze egy, az előbbivel nem azonos résszel, azok egymásra vagy éppen a teljes objektumra szinte teljesen hasonlítani fognak. Az önhasonlóság következik a fraktál létrehozásának rekurzív eljárásából is, lényegében a fraktál önmagát másolva terebélyesedik. Úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a fraktálok skálafüggetlenek, bármilyen nagyításban ugyanazt a képet adják. Találó zenei párhuzam a fehér zaj. A fehér zaj bármely két nem azonos részét, bármilyen hosszban vesszük is ki, bármekkorára nyújthatjuk/lassíthatjuk vagy zsugoríthatjuk/gyorsíthatjuk, az eredménynek hasonló hangzása lesz.

Léteznek szabályos és véletlen fraktálok. Szabályos fraktálról akkor beszélhetünk, ha az objektumot alkotó, ismétlődő alakzatok pontos szabály szerint képződnek, viszont véletlen fraktált kapunk, ha az alakzatok reprodukálását előre nem látható tényezők irányítják.⁶ Szabályos, szigorú fraktálokat a számítógéppel generált képeken láthatunk leggyakrabban, mivel a szabályok által meghatározott repetitív/rekurzív folyamat létrehozására a számítógép kiváltképpen alkalmas (1-2 ábra).

¹ A latin fractus, azaz törött kifejezésből.

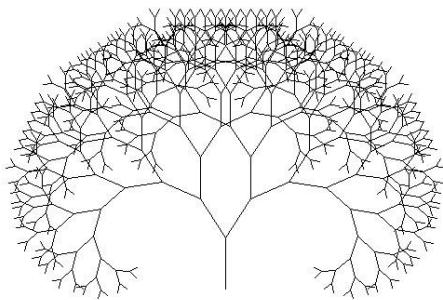
² Mandelbrot, Benoit B.: *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Paris: Flammarion, 1975.

³ Tél Tamás: „Törtdimenziós rendszerek: a fraktálok.” *Természet világa*. 115/3 (1984. 03): 106-109. 106.

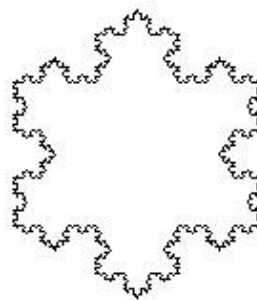
⁴ Oláh-Gál Róbert: „Fraktálok”. *Korunk*. 47/8. (1988/8): 607-609. 607.

⁵ Dr. Borsa Béla: „A fraktálok”. *Élet és Tudomány*. 48/6 (1993/5): 163-166. 163.

⁶ Oláh-Gál Róbert: „Fraktálok”. *Korunk*. 47/8. (1988/8): 607-609. 608.



1. ábra. Fraktál



2. ábra. Koch-görbe

A természetben általában véletlen (valószínűségi) fraktálokat láthatunk, mint például a felhők mintázata, a partvonalak csipkézettségé vagy az emberi tüdő görgőinek szerkezete. Mandelbrot fontos érdeme, hogy felhívta a tudományos világ figyelmét arra, hogy számos kaotikusnak vélt alakzat és folyamat (például a később tárgyalt Brown-mozgás) fraktál tulajdonságú.⁷

Ezek is olyan alakzatok, amelyek minden nagyításban hasonlóan néznek ki, most azonban a hasonlóságot nem a szigorú geometriai értelemben kell tekinteni, hanem statisztikus értelemben. Azt is mondhatjuk, hogy a véletlen fraktálok olyan szabálytalan alakzatok, melyek minden skálán egyformán szabálytalanok. [...] Természetesen a véletlen fraktálok dimenziója sem egész szám.⁸

A fraktálok tanulmányozását nem lehet megfelelően elvégezni az általánosan használt geometriai eszközök segítségével. Az egyik fő akadály a dimenzió kérdése, ugyanis egy fraktál töredezett felülete nem tekinthető két-, vagy háromdimenziósnak, hanem csak tört dimenzióval lehet leírni.⁹ Ennek a problémának a megoldására fejlesztette ki Mandelbrot a fraktálgeometriát, mely lehetővé teszi a tört dimenziók használatát. Már háromnál több dimenziót is nehéz elképzelni, de a tört dimenziót talán még nehezebb. Székely J. Gábor a lényegét megragadva magyarázza el ezt a különös fogalmat:

Könnyű kiszámítani, hogy amikor egy léggömböt úgy fújunk egyre nagyobbra, hogy a sugara kétszeresére, háromszorosára... stb. növekedjék, akkor a gömb térfogata nyolcszorosára, 27-szeresére stb. növekszik, vagyis a térfogat változása a sugár változásának harmadik hatványával arányos. Azért éppen a harmadik hatvánnyal, mert a gömb háromdimenziós. A síkban – például egy kör nagyításakor – a terület a sugár

⁷ I. m. 608.

⁸ Tél, *Tört dimenziós rendszerek: a fraktálok*, i.m. 108.

⁹ Oláh-Gál Róbert: „Fraktálok”. *Korunk*. 47/8. (1988/8): 607-609. 607.

1.2. Fraktálok a zeneszerzésben

növekedésének már csak a második hatványával arányosan tágul. Egy test olyankor válik törtdimenzióssá, ha a háromdimenziós térfogatnak vagy a kétdimenziós területnek megfelelő „mértéke” a nagyításnak nem „kerek” (harmadik vagy második), hanem tört hatványával arányosan változik.¹⁰

1.2. Fraktálok a zeneszerzésben

1.2.1 A zaj, mint kiindulópont

A számítógéppel támogatott zeneszerzésben gyakran használnak véletlenszerű folyamatokat akár kiindulópontként, akár erre helyezik a teljes kompozíció szerkezetét.¹¹ Ezeket a folyamatokat leghatékonyabban a spektrális sűrűség¹² mértékével lehet kategorizálni. Három véletlen-forrást alkalmaznak sűrűn, a fehér-, a Brown- és a rózsazajt.

A fehér zaj spektrális sűrűsége $1/f^0$, a hangnyomás minden frekvenciánál azonos.¹³ Mivel bármely szám a nulladik hatványon 1, ezért bármely frekvenciát helyettesítjük be az „f” helyére, az eredmény mindig 1 lesz, a teljesítmény egyenletesen oszlik el. Ennek egy következménye, hogy ha például hangmagasságokhoz rendeljük a számsorozatot, akkor minden hangmagasság azonos valószínűséggel fog megjelenni. A harmadik ábra egy zenei példát mutat. A bemenet fehér zaj, amelyet hozzárendeltem egy három oktáv széles, 12-fokú skálához, két ritmusértéket használva. Jól látható, hogy a hangjegyek szinte egyáltalán nem rendelkeznek koherenciával, mintha véletlenül jönnének egymás után. Ezt az eredményt kapjuk, akárhányszor generáljuk is újra ezt a négy ütemet.



3. ábra. Fehér zaj dallamvonala

A Brown-zaj spektrális sűrűsége $1/f^2$, tehát minél magasabb a frekvencia száma (f), annál inkább csökken a teljesítmény. A Brown-zajt úgy tudjuk létrehozni, hogy a fehér zaj értékeihez hozzáadunk egy olyan valószínűségi változót, amely Gauss-eloszlást követ.¹⁴ A Gauss-eloszlásban a kisebb változások az értékekben gyakoribbak, mint a nagyobb változások, ezért ez a zajfajta már rendelkezik összefüggéssel az értékek között. Ha

¹⁰ Székely J. Gábor: „Tört dimenziók a mikro- és makrovilágban”. *Delta*. 13/8. (1979/8): 27-29. 28.

¹¹ Dodge, Charles and Bahn, Curtis R.: „Musical Fractals.” *Byte*. 11/6, (1986/6): 185-199. 185.

¹² A spektrális sűrűség a zaj (véletlenszerű számsorozat) teljesítményének és a frekvenciájának a hányadosa. A spektrális jelző a frekvenciában mért felosztás miatt szerepel a fogalomban, az akusztikai spektrumot nem írja le.

¹³ Dodge, Bahn: *Musical Fractals*, i.m. 187.

¹⁴ I.m., 188.

lefuttatjuk az előző dallamgenerátort azonos paraméterekkel, de kicseréljük a fehér zajt Brown-zajra, azt láthatjuk, hogy kialakul egy laza összeköttetés a hangok között, de dallamvezetési szempontból még keszokusza marad az eredmény (4. ábra).



4. ábra. Brown-zaj dallamvonala.

Ezek a zajok a fraktálzajok osztályába tartoznak.¹⁵ Egy zaj akkor tartozik ebbe az osztályba, ha a spektrális sűrűsége az $1/f^x$ formulával csökken, és ha a formulára igaz, hogy $0 \leq x \leq 2$. Különlegesség a harmadik zajfajta, a rózsazaj, amelynek a spektrális eloszlása $1/f$. Ez a zajt alkalmazzák a leggyakrabban, mivel az ebből készített modell számos természeti jelenség megfigyelésében segít, mint például a napfoltok aktivitása, vagy az elektronikus eszközök zaja.¹⁶ Ha ezt zajfajtát helyezzük a dallamgenerátorba, az előző példákhoz képest világosabb iránnyal rendelkező, több belső összefüggést mutató eredményt kapunk (5. ábra).



5. ábra. $1/f$ zaj dallamvonala.

1.2.2 Kapcsolódódás a fraktálokhoz Posadas előtt

A fraktálgeometria megalkotása után szinte azonnal megindult a hasonló vagy azonos tulajdonságok utáni kutatás más tudományterületen vagy a különböző művészeti ágak alkotásaiban, így a zenében is. Maga Mandelbrot is előszeretettel hivatkozott Richard Voss és John Clark cikkére, melyben a szerzőpáros a zenével és a fraktálokkal kapcsolatos kutatását mutatta be, feltárva többek között egy J. S. Bach és S. Joplin zenemű hangzóanyag analizésének eredménye és az $1/f$ zaj közötti szoros kapcsolatot.¹⁷ Ugyan a dallamok hangjai között nem bizonyítottak ilyen összefüggést, később Kenneth Hsü és Andrew Hsü vizsgált

¹⁵ I.m., 189.

¹⁶ I.m., 189.

¹⁷ A szerzők úgy találták, hogy az elemzett művek hangerőgörbéje által kirajzolt csúcspontok közötti kapcsolat fraktáltermészetű. Voss, R. F. and Clarke, J.: „ $1/f$ Noise in Music and Speech.” *Nature*. 5533/258. 1975/258: 317-329.

1.2. Fraktálok a zeneszerzésben

ugyancsak J. S. Bach és W. A. Mozart műveket az önazonosság és a skálafüggetlenség jegyében, meggyőző eredménnyel.¹⁸

Ezek a fejlemények és új összefüggések nem tűntek el rezonancia nélkül a zeneszerzők körében. Az egyik példa erre Ligeti György. Saját bevallása szerint a fraktálgeometria egyrészt az etűdök első kötetére volt hatással:

Ezekhez a korábbi ösztönzésekhez járult a nyolcvanas évek eleje óta az, hogy [...] elbűvöltek Benoit Mandelbrot „fraktál”-jai – ez 1984-ben történt, amikor Manfred Eigen megmutatta nekem Heinz-Otto Peitgen és Peter H. Richter komputer generálta képeit.¹⁹

Másrészt Ligeti megemlíti a fraktálokat a zongoraversennyel kapcsolatban is, a negyedik tétel ismertetésénél. Ezen a helyen hangsúlyozza az új elmélet inspiráló, közvetett szerepét:

Ez a nagy, önmagába ágyazott örvény közvetetten azokból a zenei asszociációkból ered, amelyeket a Julia-halmazok és a Mandelbrot-halmaz komputerképeinek szemlélése váltott ki bennem. [...] Azóta jelentős szerepet játszanak zenei elképzeléseimben. Nem mintha ennek a negyedik tételnek a megírásához matematikai módszereket, iteratív számításokat használtam volna: bár konstrukciókkal dolgozom, de azok nem matematikai megfontolásokon alapulnak, hanem inkább „kézműves konstrukciók”.²⁰

Ligeti az inspiráció elismerése és a fokozott érdeklődése mellett a tudományos elméleteken alapuló szigorú formalizmust korlátozva engedte be a zeneszerzői eljárásába:

Továbbá ahhoz, hogy művészetet hozzunk létre, fantáziánknak ide-oda kell ugrálnia a különböző gondolati szintek között; egy zárt gondolatmeneten belül ez nem lehetséges, „ki kell ugranunk a rendszerből”. Ezért – Gottfried Michael Koenig, Iannis Xenakis és Klarenz Barlow hihetetlenül érdekes elképzelései, módszerei és eredménye ellenére is – némiképp tartózkodó vagyok az algoritmikus zeneszerzéssel szemben.²¹

¹⁸ A szerzők azzal kísérleteznek a cikkben, hogy ha elvesznek bizonyos mennyiségű hangot a darabokból, akkor azok megőrzik-e eredeti jellegüket. Azonban hangsúlyozzák, hogy a cikkben egy metódust mutatnak be, nem pedig sok mű elemzése alapján elkészített analízist. Hsü, K. J. and Hsü, A.: „Self Similarity of the 1/f Noise Called Music.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 88/8. 1991/8: 3507-3509.

¹⁹ Ligeti György: „Études pour piano – Premier livre.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. (Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010). 430-433. 431.

²⁰ Ligeti György: „Zongoraverseny.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. (Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010). 435-439. 438.

²¹ Ligeti György: „A számítógépek alkalmazásáról a zeneszerzésben.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. (Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010). 259-261. 259-260.

Jeney Zoltán nagyszabású művében, a *Halotti szertartásban* is találhatunk fraktálokból merített inspirációt:

A *Halotti szertartás* másik – a zenei anyagot illető – előzménye is 1979-re megy vissza. Akkor találtam rá arra a 128 hangból álló sorra, amely később a zsoltárok anyaga lett, és amelyet a fraktálokkal történt találkozásomnak köszönhetek. [...] Visszatérve az említett cikke²², abban volt egy rövid, a fraktál jellegű számsorok generálását leíró algoritmus is. Én 1976-ban Párizsban vettem az első már programozható kalkulátoromat, s a kalkulátorok, később pedig a számítógépek iránti szenvedélyes érdeklődésem mellett nyilván ez a cikk is döntően hozzájárult ahhoz, hogy ezt 1979-ben Olaszországban olyan nagyobb teljesítményűre cseréltem ki, amelyről már nyomtatni is lehetett, s azzal csináltam egy csomó programot: az egyik ezt a 128 hangú sort adta ki. Ez tehát egy „objet trouvé”, talált tárgy: a program által generált hangsor.²³

Gérald Grisey megemlíti, hogy a hangszín és a hangzó anyag magas szintű formális szervezéséhez használható eszközök megjelenése egybeesik a fraktálgeometria létrehozásával, emellett igyekezett összeköti a hangszín belső szerkezetének összetételét a fraktálgeometria komplexitásával.²⁴ Tristan Murail is foglalkozott a káoszelmélettel, ezen belül a fraktálokkal, amelyek tulajdonságait kereste a hangszín kétdimenziós értelmezésében:

A harmónia-mezőről szólva, vegyünk egy elképzelést, amely közös a mai zenében: határozzuk meg és tegyük elsődlegessé a vertikális és a horizontális közé helyezett szinonimát. Ahogy egy sor vagy sejt szolgálhat arra, hogy dallamot vagy akkordot készítsünk belőlük, a spektrum vertikális és horizontális síkjait is használhatjuk e célból, egy kis extrával: a közbülső helyzetek kigondolásának lehetőségével, amelyhez egyfajta fraktális dimenzió társul. Ebben a dimenzióban az észlelésünk többféle lehetséges elemzés között mozog vagy megadja magát a kétértelműség bájának.²⁵

²² Jeney a 17. lábjegyzetben található Voss-Clarke cikke utal.

²³ Farkas Zoltán: „Spekuláció nélkül nincs intuíció – „Jób Könyvé”-től a fraktálokig. *Holmi*, 18/7 (2006. 07): 869 – 902. 872.

²⁴ Grisey, Gérald: „Did You Say Spectral?” *Contemporary Musical Review*. 19/3. 2000/3: 1-3.

²⁵ Murail, Tristan: „Questions de Cible.” In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & Artifices*. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004). 45-73. 54. Saját fordítás.

1.3. A *Modulaciones* szerkezetének alapja

A *Modulaciones* a második tétele a vonósnégyesre írt *Liturgia Fractal* című, 2006-ban komponált, több tételes darabnak. Az egyes tételek alapanyagai különböző fraktálmódellék, melyeket a szerző kiindulási pontként használ és a darabok írása folyamán kiegészíti a modellektől független, saját zenei ötleteivel. Ezek a művek tehát nem szigorú értelemben vett fraktálok, hanem a fraktál metaforáján alapuló, önálló alkotások.²⁶ A Quatuor Diotima által elkészített CD kísérőfüzetében Posadas a következőket mondja a darab komponálásának technikájáról:

A ciklus második kvartettje ugyancsak különböző típusú Brown mozgással foglalkozik, de más módon. Ezúttal a hangmagasságokat és a hangszerkiosztást négytípusú mozgás irányítja, melyeknek a funkciója eltérő. A zenei anyagok eloszlásában azonban ezek a Brown-mozgások összekötésben vannak egymással. Ilyenformán az első hegedű mozgása modulálja a második hegedű mozgását, ami viszont a brácsa mozgását befolyásolja, végül a brácsa a cselló mozgására van hatással. Végül tehát mindegyik, eredetileg független és időben egybeeső mozgás kialakít egy kapcsolatot a többi mozgással.²⁷

Ahhoz, hogy jobban megérthessük a darabban megtalálható speciális Brown-mozgások interakcióit, szemügyre kell vennünk a Brown-mozgás elméletét.

A Brown mozgást Robert Brown angol fizikus vizsgálta részletesen 1827-ben, noha a jelenséget már korábban is ismerték.²⁸ Brown megfigyelte, hogy a vízbe szórt virágpór véletlenszerű, rendezetlen mozgást végez.²⁹ Akkor még úgy gondolták, hogy a mozgást apró élőlények okozzák.³⁰ Miután a mozgást gázokban is megfigyelték, a formális modelljének megalkotását Albert Einstein végezte el, majd Norbert Weiner fejlesztette tovább, lehetővé téve a sztochasztikus folyamatok elméletének jobb kidolgozását.³¹ Az egyre mélyebbre hatoló kutatások során a kutatók rájöttek, hogy a részecskék szünni nem akaró mozgását

²⁶ Említésre érdemes, hogy nagyjából ez a helyzet a természeti fraktálokkal is, hiszen nagyítás közben egy idő után az atomok szintjére jutunk, ami alapvetően más környezet. Itt nem értelmezhető a szigorú önhasonlóság, tehát a természeti fraktálok ugyancsak közelítőleg fraktálok. Tél, *Tört dimenziós rendszerek: a fraktálok*, i.m. 108.

²⁷ Posadas, Alberto: *Liturgia fractal. Cycle of five string quartets*. (Vienna: Kairos, 2009.) 0012932 KAI. Saját magyar fordítás.

²⁸ Mende Jenő: „A Brown-féle mozgás”. *Uránia*. 17/5. (1916/5): 160-165. 160.

²⁹ Dr. Sas Elemér: „Nyáron minden nagyobb”. *Élet és Tudomány*. 45/19. (1990/15): 598. 598.

³⁰ Fokasz Nikosz: „Nemlineáris idősorok – a tőzsde káosza?”. *Magyar Tudomány*. 109/10. (2002/10): 1312-1329. 1318.

³¹ Karlin, Samuel és Taylor, M. Howard: *Sztochasztikus folyamatok*. Ford.: Michaletzky György. Budapest: Gondolat kiadó, 1985. 335.

olyan függvények írják le, melyek fraktálként értelmezhetők.³² A Brown-mozgás fraktálszerűségét Paul Lévy is kimutatta, amikor megállapította, hogy a mozgás független a skálázás mértékétől.³³ Mindezt pár évvel azelőtt, hogy a tanítványa, B. Mandelbrot megalkotta volna a fraktál kifejezést. Ha a fraktálokra gondolunk, általában képek vagy mintázatok jutnak eszünkbe, nem folyamatok. A Brown-mozgás viszont egy folyamatosan zajló eseménysor, azonban mégis fraktálnak tekinthető, mivel a matematikai modellje által kirajzolt görbe önhasonló és a dimenziója 1.5.³⁴ Dr. Sas Elemér szemléletes példát ír le a jelenség megértésének elősegítéséhez:

Egy emelődaru kötelén függ például egy vasúti vagonra vagy kamionra helyezhető konténer. E konténeret minden irányból teniszlabdákkal dobálják. [...] A minden irányból érkező labdák aprócska lökései kiegyenlítik egymást, így a konténer meg sem rezdül. Más azonban a helyzet, ha például egy 1 kilogrammos szaloncukros dobozt húzunk fel a zsinóron a száguldó teniszlabdák közé. A kis doboz ide-oda lökődik, forog, rezeg a szakadatlan ütközések hatására. A doboz falának viszonylag kis felületét ugyanis a különböző irányokból egyszerre nem azonos számú labda találja el, és már egy labda lökése is elég nagy gyorsulást tud a dobozon létrehozni.³⁵

Ha Brown kísérletére gondolunk, akkor ebben a példában a konténer/kis doboz a virágpór szemcséket jelenti, míg a labdák a víz molekuláit, atomjait reprezentálják.

Ugyanakkor Posadas kiinduló modellje nem a klasszikus Brown mozgás, hanem annak egy változata, a fraktál Brown mozgás (fBm), melyet először B. Mandelbrot és W. van Ness írt le.³⁶ A két mozgás rokon egymással, de van közöttük egy lényeges különbség, nevezetesen amíg a Brown mozgás (Bm) állapotváltozásai egymástól viszonylag függetlenek, addig a fraktál Brown mozgás (fBm) állapotváltozásai összefüggésben vannak egymással.³⁷ A Bm és az fBm közötti különbség nem nagy, de az ebből eredő következmény annál nagyobb. Korábban volt szó róla, hogy a Bm modellje a fehérzaj és a Gauss-eloszlást követő változó összegének az eredménye. Az fBm-ben kicserélik a Gauss-eloszlást az úgynevezett fraktál Gauss-eloszlásra, ilyenformán az fBm értékeinek változásai nem feltétlenül lesznek egymástól függetlenek.³⁸ Fontos különbség a két eloszlás között a Hurst-

³² I.h., 336.

³³ Lévy, Paul: *Processus stochastiques et Mouvement Brownien*. Paris: Éditions Jacques Gabay, 1965. 15.

³⁴ Székely, *Történelmi dimenziók a mikro- és makrovilágban*, i.m., 29.

³⁵ Dr. Sas, *Nyáron minden nagyobb*, i.m., 598.

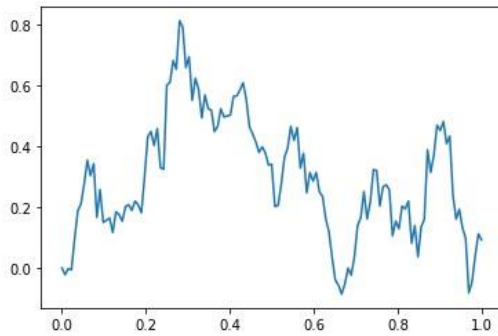
³⁶ Mandelbrot, B., Van Ness, J. W.: „Fractionals Brownian Motions, Fractional Noises and Applications”. *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*. 10/4. (1986/4): 422-437. 422.

³⁷ Dr. Mukli Péter: *Spontán agyi hemodinamikai fluktuációk komplexitásának multifraktális elemzése*. PhD disszertáció. Budapest: Semmelweis Egyetem. 2019. (Kézirat). 30.

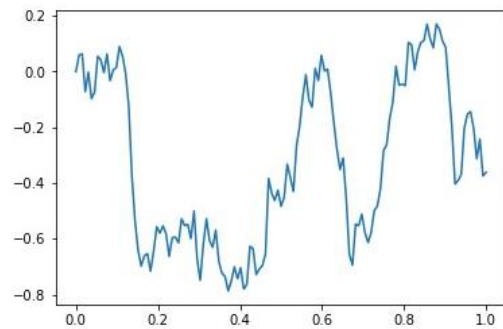
³⁸ Mandelbrot, Van Ness, *Fractionals Brownian Motions, Fractional Noises and Applications*, i.m., 422.

1.3. A Modulaciones szerkezetének alapja

index, mely $[0,1]$ közötti értéket vehet fel és alapvetően meghatározza a kialakuló görbe képét.³⁹ Nézzünk meg először egy Bm által kirajzolt két nyomvonalat⁴⁰ (6-7. ábra):

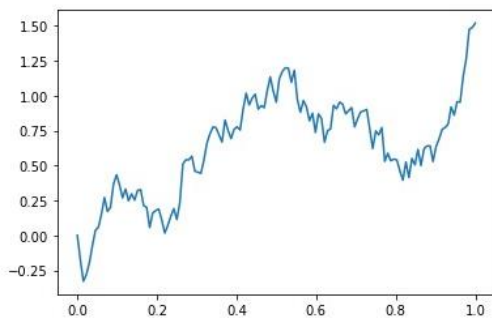


6. ábra. Bm, első nyomvonal.

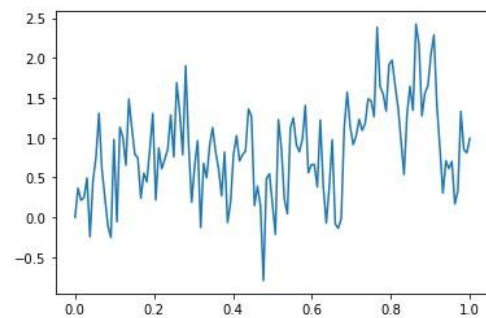


7. ábra. Bm, második nyomvonal.

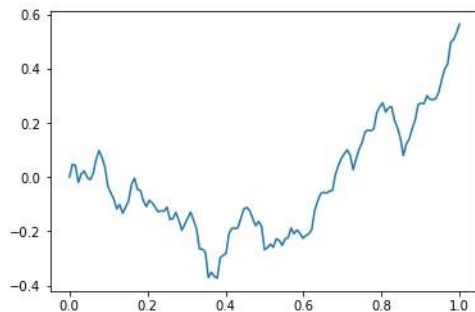
Jól láthatók a helyi csúcspontok, a mozgás hirtelen változó jellege valamint a töredezettsége. Ha az fBm-nél a Hurst-indexet 0.5-re állítjuk, szinte azonos eredményt kapunk az Bm-vel (8- ábra). Minél inkább közelítünk az index-el 0 felé, annál inkább egyenetlen, érdes, fehérzajszerű lesz a vonalunk (9. ábra). Ellenben ha az 1 felé közelítünk, a jel egyre inkább kisimul és az egyeshez igazán közel szinte lineáris függvénné változik (10-11. ábra).



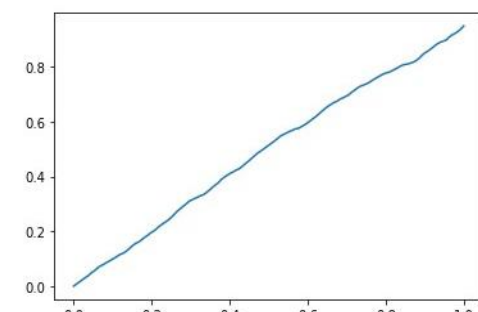
8. ábra. fBm, Hurst-index=0.5.



9. ábra. fBm, Hurst-index=0.1



10. ábra. fBm, Hurst-index=0.7.



11. ábra. fBm, Hurst-index=0.99.

³⁹ Az indexet H. E. Hurst angol vízmérnökről nevezték el. Fokasz, *Nemlineáris idősorok – a tőzsde káosza?*, i.m., 1321.

⁴⁰ A nyomvonal kifejezést a továbbiakban a koordináta rendszerben megjelenő mozgásirány megjelölésére használom.

Nem véletlen, hogy Posadas az fBm-eket használta, hiszen a Hurst-index manipulálásával megszelídíthette vagy éppen elvadíthatta a mozgásokat. A Hurst-index egy remek eszköz arra, hogy a szerző úgy tudjon fraktálösszefüggéseket használni, hogy nem kell eltávolodnia a formális modelltől, mindeközben a zajló zenei koncepcióhoz tudja igazítani a nyomvonalakat.

Mindazonáltal nem Posadas az első zeneszerző, aki felfigyelt a Brown-mozgásra. Egy Gunther Schuller által készített interjúban Edgard Varèse azt állította, hogy *Bourgorne* című darabjában megkísérelte megközelíteni egy belső, mikrokozmosz élet létrehozását, ahhoz hasonlót, amit bizonyos kémiai megoldásban lehet fellelni.⁴¹ Ez J. D. Anderson szerint közvetlen utalás a Bm-re.⁴² Francisco Guerrero is érdeklődött a Brown-mozgások iránt. *Zayin III* című vonóstrióra írt darabjában a számítógéppel segített zeneszerzési eszközeit is igénybe véve fBm-eket használt, melyeket később Posadas örökségként vett át.⁴³

1.4. A fraktálmodell felépítése⁴⁴

A *Modulaciones* fraktálmodellje tizenkét, egymástól független fBm-ből épül fel. Az fBm-ek további három kategóriára bonthatók, attól függően, hogy mihez rendelte Posadas a nyomvonalak értékeit:

1. gesztusok eloszlásai,
2. hangmagasságok,
3. a szólamok szűrési.

Az egyes fBm-eket a szerző a saját, számítógéppel segített zeneszerzési eszközeinek használatával alkotta meg, majd az eredményt kétdimenziós koordinátarendszerben jelenítette meg. A koordináta rendszerben a horizontális tengely (x) mindig az időt jelöli. Ez a tengely 821 egység hosszú, ez a szám megegyezik a darab másodpercben kifejezett hosszával, leszámítva a kódát.⁴⁵ A vertikális tengely (y) két szélső értéke változik, attól

⁴¹ Schuller, G.: „Conversation with Varèse”. *Perspective of New Music*. 3/2. (1965/3): 32-37. 33-34.

⁴² Anderson, J. D.: „Varèse and the Lyricism of the New Physics.” *The Musical Quarterly*. 75/1. (1991/1): 31-49. 37-38.

⁴³ Besada, José L.: *Metamodels in Compositional Practices*. Paris: Édition Delatour/IRCAM, 2017. 101.

⁴⁴ A fraktálmodell rekonstrukcióját J. L. Besada elemzése alapján mutatom be, aki Posadas feljegyzéseit használva készítette el a modellt.

⁴⁵ A darab a kóda kezdetéig 4/4-ben van, a metronómszám 60.

1.4. A fraktálmodell felépítése

függően, hogy a gesztusokhoz, a hangmagasságokhoz vagy a szűréshez rendelte a szerző az nyomvonalakat.

1.4.1. Gesztusok eloszlásai

Az első négy nyomvonalat Posadas a kisebb-nagyobb gesztus alapú zenei anyagok eloszlásának irányítására alkalmazta. A nyomvonalak 5 és 95 között mozogtak, ezek voltak a függőleges tengely szélső értékei. Miután elkészítette az egymástól független nyomvonalakat az első algoritmussal, a második algoritmussal tovább finomította a kapott értékeket. A második algoritmus a következőképpen működik: a komponista vesz két nyomvonalat, az elsőt bejövő mozgásnak, a másodikat vivő mozgásnak nevezi el. A vivő mozgás minden helyi csúcspontjánál összehasonlítja ezt a pontot (ez legyen 39) a bejövő mozgás ugyanazon a helyen lévő pontjával (ez legyen 15). Ezután a vivő mozgás pontja (koordinátája) helyén, a függőleges tengelyen található számértéket kicseréli egy új egész számra, ha az teljesít két feltételt:

- Az új számnak kongruens modulo 12 relációban kell lennie az eredeti számmal.⁴⁶ Tehát új szám ($a=39$) kongruens eredeti szám ($b=15$) modulo 12 (m). Mivel itt érvényesül a reláció, ezért a 39-et kicseréli a 15-re.
- Az új számnak olyan közel kell lennie a bejövő nyomvonal számértékéhez, amennyire csak lehetséges.

A zeneszerző vázlataiból kiderül, hogy ha két egész szám teljesíti a feltételeket, akkor a kisebb szám élvez előnyt.⁴⁷ A második algoritmus kiértékelése adja meg tehát a modulált mozgást. Az eljárást a szerző modulációnak nevezte az egyes nyomvonalak közötti kapcsolat miatt, erre utalt a darab fentebb idézett ismertetőjében. A moduláció az első hegedű szólamán indul, a hangszerhez rendelt nyomvonal modulálja a második hegedűhöz rendelt mozgást. Ez utóbbi nyomvonal modulálja a brácsa mozgását, ami végül a cselló mozgását módosítja. Ebben a módszerben óhatatlanul felismerjük a hullámforma moduláció (AM, FM) inspiráló hatását,⁴⁸ egyúttal tanúi lehetünk egy, a darab koncepciójára

⁴⁶ A kongruencia egy számelméleti fogalom, közelebbről nézve egy reláció. Azt fejezi ki, hogy két szám egy harmadik számmal vett osztási maradéka egyenlő-e vagy sem. $39:12=3$ maradék 3, és $15:12=1$ maradék 3, a maradékok azonosak. Definíció szerint: $a, b, m \in \mathbb{Z}$ esetén azt mondjuk, hogy az a kongruens b -vel az m modulusra (osztóra) nézve, ha az a és b szám különbsége maradék nélkül osztható m -el ($m \mid a-b$). Például $a=39$, $b=15$, $m=12$, akkor a kongruens b modulo 12, mert $39-15=24$, ami maradék nélkül osztható 12-vel. Szalay Mihály: *Számelmélet*. Budapest: Typotex, 3 kiadás. 2009. 81.

⁴⁷ Besada: *Metamodels in Compositional Practices*, i.m., 123.

⁴⁸ A hasonlóság világos, még akkor is, ha matematikai értelemben szinte semmi köze nincs a két eljárásnak egymáshoz.

vonatkozó különleges elegynek, hiszen a fraktálgeometria törvényei szerint megalkotott mozgásból eredő nyomvonal keveredik a hullámforma moduláció létrehozásához szükséges eljárás működésévé alkalmazó módosításokkal.

Gesztus alapú mozgások				
	A „Statikus”	B „Mozgás”	C „Trillák”	D „Artikulált”
1				
2				
3				
4				
5				
6				

12. ábra. Gesztuscsoportok, gesztusvariációk. J. L. Besada ábrája.

Az eloszlások végső kialakításához azonban még két lépésre volt szüksége a szerzőnek. Először négy csoportba rendezte a gesztusszerű zenei anyagokat, hasonlóságuk alapján, ezeket a csoportokat láthatjuk a 12. ábrán. A csoportban lévő gesztusokat ő maga alkotta meg, saját invencióból, ezek függetlenek a felhasznált fBm-ektől. Másodszor ötösével felosztotta a modulált mozgásokból kapott 5-95 intervallumot és mindegyik felosztáshoz hozzárendelt egy gesztusszerű zenei anyagot (13. ábra).⁴⁹

Főszakaszok (ms)								
Felosztás	[1-100]	[101-171]	[201-285]	[301-400]	[401-648]	[701-737]	[738-788]	[789-821]
	A	A-B	A	A-B-C	A-B-C-D	A-B-C	A-B	A
[90-95]		A ₄						
[85-90]	A ₄	B ₁	A ₄					
[80-85]	A ₅	A ₅	A ₅			A ₃	B ₄	A ₃
[75-80]	A ₆	B ₄	A ₆	B ₂		C ₃	B ₄	A ₃
[70-75]	A ₄	B ₂	A ₄	A ₆	D ₁	B ₁	B ₂	A ₁
[65-70]	A ₅	A ₆	A ₅	C ₁	C ₄	A ₄	A ₆	A ₄

⁴⁹ Besada: *Metamodels in Compositional Practices*, i.m., 127.

1.4. A fraktálmodell felépítése

[60-65]	A ₆	A ₄	A ₆	B ₂	A ₄	C ₄	B ₂	A ₁
[55-60]	A ₃	B ₃	A ₃	A ₁	B ₃	A ₅	A ₁	A ₆
[50-55]	A ₁	A ₁	A ₁	A ₂	B ₄	C ₃	A ₁	A ₄
[45-50]	A ₂	B ₂	A ₂	C ₃	C ₂	A ₃	A ₆	A ₆
[40-45]	A ₃	A ₂	A ₃	C ₂	D ₁	A ₄	B ₄	
[35-40]	A ₄	B ₁	A ₄	B ₁	C ₁	B ₁	B ₃	
[30-35]	A ₅	A ₃	A ₅	A ₆	D ₂	C ₄		
[25-30]	A ₆	B ₄		C ₂	D ₃	B ₃		
[20-25]	A ₁			C ₁	A ₁			
[15-20]	A ₂			A ₁	C ₄			
[10-15]	A ₃				B ₂			
[5-10]					B ₄			

13. ábra. A főszakaszok felosztása és a gesztusvariációk hozzárendelése a [5-95] intervallumhoz. J. L. Besada ábrája.

Ezután mind a négy hangszernél egy-egy modulált mozgást felhasznált és beillesztette a gesztusokat. A tizenharmadik ábrán az is látható, hogy nyolc, másodpercekben meghatározott formai főszakaszt jelölt ki. Ezek is a saját ötletei voltak, függetlenül a nyomvonalaktól.⁵⁰ Ha például a brácsához rendelt nyomvonal a 103. másodpercben 76 volt, akkor a B₄ gesztus ékelte be. A gesztusok időbeli hosszúságát Posadas dinamikusan kezeli: nyolc különböző ritmusértéket cserél és rendel szabadon az egyes mozgásokhoz.

1.4.2. Hangmagasságok

A szerző további négy nyomvonalat rendelt hozzá a hangmagasságokhoz. A nyomvonalakat megjelenítő koordinátarendszerben a függőleges (y) tengelyen MIDI értékeket határozott meg, negyedhangokban. Az eredményül kapott hangmagasságok halmaza lényegében puffertartályként működött és a mindenkorai gesztusváltás időpontjában aktivizálódott. Ilyenformán nem az összes, a nyomvonalakból kapott értéket használta fel Posadas, hanem csak akkor nyúlt a tartályba, ha új gesztust használt fel.⁵¹ Ez fontos kitétel, hiszen ez azt jelenti, hogy a gesztus alapú anyagok eloszlása már meghatározta, hogy milyen hangmagasságon szólaljanak meg éppen maguk a gesztusok. Ezen kívül mikrotonális elcsúszásokat is alkalmazott, tehát a darabra szabta a nyers adathalmazt.

⁵⁰ Besada: *Metamodels in Compositional Practices*, i.m., 127.

⁵¹ Besada: *Metamodels in Compositional Practices*, i.m., 122.

1.4.3. A szólamok szűrési

Ha a munka itt befejeződik, egy olyan darab jönne létre, melynek minden negyedén szól egy hang. Az utolsó négy nyomvonalat a zeneszerző a szólamokban megjelenő hang események ritkítására veszi igénybe (így lesz összesen tizenkettő felhasznált nyomvonal). Valóban, ha Posadas csak az eddig bemutatott eljárásokat használná, egy változatos, de meglehetősen egynemű zenei anyagot készítené, amelyben nincs se szünet, se tagolás. Egy megállás nélküli, szüntelenül jelen lévő folyam uralná a darab karakterét és mivel a mű több, mint tizennégy perc hosszú, a homogenitás óhatatlanul vontatottá tenné a zenei folyamatot. Ez az utolsó négy nyomvonal ennek a gondnak a kiiktatásában segít. Az eljárás hosszabb-rövidebb szünetek beékelését eredményezi, ezáltal belső tagolások jönnek létre, illetve tovább töredezik a textúra.

Ebben a műveletben a szerző alapján véve sávszűrőkön engedi át a nyers fBm-eket.⁵² Másodpercben mért szakaszokban adja meg azt, hogy hány darab sáv, milyen szélességben határozza meg a szűrőket. A nyomvonalakat megjelenítő koordinátarendszerben a függőleges (y) tengely két szélső értéke 0 és 100. Ha az fBm értéke beleesik a sáv szélességbe, semmi nem változik, ellenben ha a sávon kívül esik, akkor az adott helyen szünet kerül a hangok helyére.⁵³ A 14. ábra mutatja a szűrők eloszlását, négy szakasz szerint, amely szakaszok újfent a szerző saját felosztásai. Az első szűrő sávjai (14. ábra, második oszlop) úgy jönnek létre, hogy a szerző uniót képez a (a nullával együtt vett) természetes számok és egy olyan halmaz között, melynek tagjai [1-10], [21-30], [41-50], [61-70], [81-90]. Ily módon, ha a nyomvonal értéke egy meghatározott helyen például 11, akkor az ezen a helyen lévő hangot kicseréli szünetre, de ha mondjuk 19, akkor nem változik semmi.

A második szűrő új lappal indul. A görög khi betű (χ) egy újabb uniót jelöl (14. ábra harmadik oszlop). A két intervallumon kívül eső számok esetén szünetre cserélődik a hang, például 20 esetén nem változik, de 77 esetén már szünet lesz. A harmadik szűrő (14. ábra, negyedik oszlop) a χ betű által jelölt unióhoz tesz hozzá még egy intervallumot, emiatt például a 77 már nem szünetet ad, hanem változatlanul hagyja a hangot, ahogy a 20 is. Ellenben, ha például 4 jönne ki a nyomvonalból, akkor az a második, illetve a harmadik

⁵² I. m., 127.

⁵³ A sáv szélességeket J. Besada aprólékos elemzése mutatta ki, ő maga nem talált erre vonatkozó információkat a szerző vázlataiban és a kiértékelt adatokban.

szűrőben is szünetet adna ki. Az utolsó szakaszban található kérdőjel azt mutatja, hogy abban a szakaszban nem lehet azonosítani sáv szélességeket.

Ebben a pillanatban felfedezhetünk egy újabb konceptuális elegyet, hiszen a szerző ismételten egy fraktálmozgást végző nyomvonalon alkalmaz egy alapvetően hullámformák manipulálására használt eszközt, a többsávós szűrőt.⁵⁴

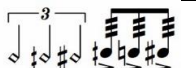
Szakaszok (ms)	[1,400]	[401,564]	[565,700]	[700,821]
Szűrők sáv szélességei	$\bigcup_{n \in \mathbb{N} \cup \{0\}} [20n+1, 20n+10]$	$\chi = [11,25] \cup [41,70]$	$\chi \cup [76,85]$?

14. ábra. Szűrők sáv szélességei az egyes szakaszokban. J. L. Besada ábrája.

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

A darab formai vázát meglátásom szerint a gesztus alapú zenei anyagok elrendezése és az ehhez kapcsolódó funkcionális eltérések adják meg. A gesztusok csoportosításában meghatározott szakaszok karakter szerint is eltérnek, ezért alkalmasak arra, hogy a formaegységek jellegzetességeit be lehessen mutatni rajtuk keresztül.⁵⁵

A darab tartalmaz három olyan alszakaszt, melynek gesztusai különböznek a fő csoportokban szereplő gesztusoktól (15. ábra). Ezeknek a gesztusoknak nincsenek változataik, illetve ezek az alszakaszok számottevően rövidebbek, mint a főszakaszok. Mindhárom alszakaszra jellemző egy lassú, hangmagasságban emelkedő irányú mozgás, az egyes hangszerek között eltérő sebességgel.

Első eltérő szakasz 44-50 ütem	Második eltérő szakasz 72-75 ütem	Harmadik eltérő szakasz 162-175 ütem
		

15. ábra. Eltérő szakaszok gesztusai. J. L. Besada ábrája.

Az első főszakasz bevezető jellegét az első csoport, a statikus gesztusok kizárólagos használata adja meg. Ez a szakasz a huszonötödik ütemben ér véget. Annak ellenére, hogy változatos, negyedhangokból felépülő együttállások sorozatából áll, mégis egy önmaga

⁵⁴ Besada: *Metamodels in Compositional Practices*, i.m., 127.

⁵⁵ A 13. ábra ábra időfelosztása mutatja a szakaszokat.

körül mozgó objektumot jelenít meg. Noha az első szakasz második felében egyre több gesztus csendül fel az A₄, A₅, A₆ (statikus) típusokból (12. ábra) - emiatt a mozgás irányváltoztatásai jobban érzékelhetők -, mindez nem zavarja meg a konzisztens állapotot, de előkészíti a következő szakaszt. Rögtön az első ütem harmadik negyedén felbukkan egy tiszta kvarttból, tiszta kvinttből, tritónuszból illetve a hangközök mikrotonális változataiból álló alapakkord, mely a darab több pontján újra feltűnik.⁵⁶ Annak ellenére, hogy megjelenésének pillanatai nem lineárisan követik egymást,⁵⁷ az akkord jellege mindenhol eltér a szakaszokban található állapotoktól. Alkalmas arra, hogy analízis híján, csupán a füllel felismerhető legyen, ennek köszönhetően pedig közvetítsen egy formafolyamatot (1. kottapélda).

♩ = 60

Violon I
Violon II
Alto
Violoncello

quasi flaut, sempre
sans vibr, sempre

quasi flaut, sempre
sans vibr, sempre

quasi flaut, sempre
sans vibr, sempre

quasi flaut, sempre
sans vibr, sempre

^(*) Pour une même dynamique à plusieurs instruments, le son doit être complètement équilibré, indépendamment de l'utilisation ou non de la sourde. Cela signifie que l'instrument ayant la sourde et produisant ainsi un son plus faible (pour une dynamique donnée), servira de référence pour les autres instruments qui devront donc adapter leur volume sonore.
For the same dynamic, the sound must be completely balanced, independently of the use and by each player.
This means that the instrument mixed with the sourd, which produce a weaker sound (for the same dynamic) will be the reference for the other instruments.

1. kottapélda. 1-15. ütemek, a darab kezdete.

A második főszakasz a 26. ütem első negyedén indul és a 42. ütem harmadik negyedén zárul. Ebben a szakaszban a statikus gesztusok (A) mellett a mozgó gesztusok (B) is megjelennek (12. ábra), két csoport keveredik. A két, egymástól feltűnően eltérő mozgásforma ugyan megszünteti a statikusságot, de jelenős változást nem hoz a hangzásban. Az egyes gesztusok közötti kontrasztok egyre jobban kiemelik az irányokat, mintha most lenne érezhető a fBm-ek különös szerkezete. A faktúra két részre bontható. Az

⁵⁶ A szerző összes vázlatával rendelkező Besada vette észre, hogy az akkord akkor jelenik meg, hogy ha az egymástól független sávszűrők minden szólamban szünetet adnak ki.

⁵⁷ Az akkord az 1, 3, 9, 41, 68, 69, 93, 94, 121, 125, 149 ütemekben tűnik fel.

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

első, második hegedű és a brácsa szólama hol akkordfejlődést, hol már-már hangfűrtöt formál, de cselló, noha bizonyos helyeken segíti a mozgást, kitartott, mély hangjaival alátámasztja a másik három hangszer bolyongó karakterét. A tartott hangok üveghangként vagy normál hangként jelentkeznek. Az alapakkord egyszer szerepel a szakaszban, de be van ágyazva a mozgó folyamatba, így nehezen észrevehető (2. kottapélda). A második főszakasz végén található az első alszakasz (15. ábra) a 42-50. ütemekben, mely előkészíti a harmadik főszakaszt.

2. kottapélda. A második főszakasz első fele, 25-31. ütemek.

A harmadik főszakasz az 50. ütem harmadik negyedén indul és a 71. ütemmel zárul. A szerző itt újra csak a statikus (A) gesztusokat használja (12. ábra), ennél fogva visszatér egy egyöntetű hangzáshoz, ami érdekes módon kevésbé merev és mozdulatlan, mint az első szakasz. A második főszakaszban a szólamok szerepében tapasztalt dualitás a harmadik szakaszban megszűnik, mindazonáltal mintha utalna rá Posadas a szakasz vége felé, amikor előbb a brácsára, majd a csellóra kér szordínót és a mély regiszterben játszott akkordokat mezzoforte-ig felerősíti. Ezen a helyen később a hegedűk is az A₁, A₂ gesztusokat játsszák, majd a 68. ütemben forte hangerőre emelkedve megszólal az alapakkord, közvetlenül ezután ugyancsak erőteljesen megint megszólal, de ezúttal cselló nélkül. Ez a két pillanat markánsan jelöli a szakasz végét (3. kottapélda). A főszakasz végén van a második alszakasz

(15. ábra), mely csupán pár ütem, de fokozza a darab haladását az egyre sűrűbb textúrák irányába (72-74. ütem).

The image shows a musical score for measures 72-74. It consists of four staves. The top staff is in treble clef, and the bottom three are in bass clef. The music is characterized by dense, rhythmic patterns with frequent accents and dynamic markings such as *p*, *mp*, *mf*, and *f*. There are also some performance instructions like *changer pour sa voir son* and *si veuf son* written in French.

The image shows a musical score for measures 75-79. It consists of four staves. The top staff is in treble clef, and the bottom three are in bass clef. The music continues with dense, rhythmic patterns and dynamic markings. There are also some performance instructions like *changer pour sa voir son* and *si veuf son* written in French.

3. kottapélda. Az alapakkord első megszólalása és az odavezető folyamat.

A negyedik főszakasz a 75. ütemben kezdődik és a 100. ütemben van vége, így ugyanolyan hosszú, mint az első főszakasz. A gesztusok jóval változatosabbak, jelen vannak a statikus (A), mozgó (B), és a trillák (C) gesztusok is (12. ábra), tehát három csoport kombinálódik. Már a szakasz elején, a 76. ütemben az első hegedű figyelemfelkeltő módon, forte dinamikával hozza a C₁-es (trillák) gesztust, ezzel egycsapásra kitör az előző rész kóborló iránykereséséből. Eddig a pontig a statikus és mozgó csoportok gesztusai legtöbbször mezzopiano, esetenként mezzoforte hangerőre hangosodtak fel, ezúttal ezek a gesztusok is jóval hangosabbak, artikuláltabbak. Ebben a szakaszban az irányok tisztán érthetőek, a nyomvonalak kirajzolása előtérbe kerül. Ritkán szerepel az összes hangszer egyszerre, inkább a hangszerek közötti helyi interakciók jellemzőek, amelyek viszont mindenféle kombinációban előfordulnak. A gesztusok változatos módon követik egymást, de a trillák csoportba tartozó anyagok használata előtérbe kerül, egyfajta tematikus jelleget adva a textúrának. A szakasz utolsó harmada, akár csak az eddig tárgyalt részeknél, változást hoz, mégpedig az alapakkord megjelenésével a 92-95. ütemekben. Többféle felrakásban, a

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

kitartott hangokon trillázva (C₃-as gesztus) az akkord kiemelkedik a szakaszra jellemző mozgásból (4. kottapélda).

4. kottapélda. A negyedik főszakasz közepe, 80-89. ütemek.

Az ötödik főszakasz a 100. ütemben indul és a 162. ütemben végződik. Ez a leghosszabb szakasz és itt használja fel Posadas az összes gesztus alapú zenei anyagot, mind a négy csoport jelen van (12. ábra). Ez a szakasz három kisebb formai részre bontható. Az első rész a 112 ütemig tart, a C (trillák) gesztuscsoport uralja, főleg a C₂ kvintolává szélesített változata. Amíg az itt szereplő gesztusok crescendo vagy decrescendo alatt futnak, addig a C₂ szinte kizárólag konstans forte szól. Ez a rész a brácsa és a cselló párbeszédével indul, ami pár ütem után egy sűrű textúrává képződik, az összes hangszer jelenlétével. A trillázó gesztusok (C) apró hangközökben mozognak, de így is jól érthető körvonallal rendelkeznek. A cselló szinte végig magas regiszterben van, emiatt a hangzás összeszűkül és fényessé válik (5. kottapélda).



5. kottapélda. Az ötödik főszakasz első része, 108-111. ütemek.

A második kisebb formarész a 113. ütemtől a 153. ütemig tart. A második rész első három ütemét négy (trillák és artikulált) gesztus uralja (16. ábra, 6. kottapélda). Az első hegedű szerepe visszaszorul, a többi hangszer továbbra is egymáshoz közel játszik. A 117. ütemtől az artikulált gesztuscsoportban lévő D₃ gesztus dominál, a hangzás ritkul, elcsendesedik, majd pedig a 121. ütemben megjelenő alapakkorddal kisimul. Ezután újraindul a folyamat, a D₃ kiegészül a C₂ és D₁ gesztusokkal. Az építkezés most is az alapakkord felé tart és el is éri azt a 125. ütemben.

Ütemszám (4/4)	113				114				115			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. hegedű	?	?	?	?	?	?	D ₁	?	?	?	?	?
2. hegedű	C ₂	C ₂	D ₂	D ₁	D ₁	D ₁	D ₁	D ₁	A ₁	C ₂	C ₂	A ₁
brácsa	D ₁	C ₁	C ₁	D ₁	D ₁	D ₂	D ₁	?	C ₁	D ₂	D ₂	D ₂
cselló	D ₁	C ₂	C ₂	D ₂	D ₂	C ₂	C ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	A ₁

16. ábra. Négy gesztus (C = Trillák, D = Artikulált) tömörül a 113-115. ütemekben.



6. kottapélda. 112-115. ütemek.

A 127. ütemtől a második kisebb formarész végéig a zene bővelkedik a gesztusokban, a statikus (A), mozgó (B), trillák (C) és artikulált (D) csoport is képviselteti magát. Egymást segítő folyamatok hangsúlyozzák a mozgás megjelenítését, helyi

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

csúcspontok bukkannak fel a szövetben,⁵⁸ amely a hangzás szempontjából továbbra is szűk, mindegyik hangszer magas regiszterben szól. Ezzel együtt bizonyos helyeken annyira sűrű a faktúra, hogy a sok mozgás szinte egy gyorsan változó hangszínné alakul át. Számomra ez a terület van a legközelebb a Brown-mozgáshoz. Itt hallható a legfőképp csipkézett textúra a 140. és a 146. ütemek között (7. kottapélda). A 149. ütemben felbukkan az alapakkord, de váratlan helyen, minden előzmény nélkül. Mivel itt a cselló leugrik a mély regiszterbe és kitartott hangok szólnak, az akkord feltűnő, de a sok mozgásban mégis inkább elveszettnek tűnik (8. kottapélda).



The image shows the first system of a musical score, measures 140-147. It features three staves with dense, intricate musical notation. The notation includes various rhythmic values, accidentals, and dynamic markings such as *ff*, *f*, *mp*, and *mf*. There are also performance instructions like "change pour soud. out." and "soud. out." interspersed within the score. The overall texture is highly complex and rhythmic.



The image shows the second system of the musical score, measures 144-151. It continues the dense, textured musical passage from the first system. The notation remains highly complex with many notes and dynamic markings. The system concludes with a measure marked "change pour soud. out.".

7. kottapélda. Csipkézett textúra, 140-147 ütemek.

⁵⁸ Akárcsak a Brown-mozgásban.

This musical score segment covers measures 148 to 155. It features four staves: a vocal line at the top, followed by two piano staves, and a bass line at the bottom. The notation is highly complex, with frequent rests, dynamic markings such as *p*, *mf*, *mp*, *f*, *ff*, and *fff*, and various articulation marks. The piece is in a minor key, indicated by the key signature of one flat. The overall texture is dense and chaotic, characteristic of the 'Chaos and Composition' style.

This musical score segment covers measures 152 to 155. It continues the four-staff structure from the previous section. The notation remains highly complex, with dense rhythmic patterns and dynamic markings. The piece maintains its chaotic and experimental character, with frequent changes in dynamics and articulation. The overall texture is dense and chaotic, characteristic of the 'Chaos and Composition' style.

8. kottapélda. Az alapakkord megjelenése és átvezetés a fokozásba, 148-155. ütemek.

A harmadik kisebb formarész a 162 ütemig tart. Erőteljes fokozás jellemzi, amelyben mind a négy hangszer szerepet vállal. A C_2 és D_2 gesztus (trillák és artikulált) harciasan, akcentussal jelentkezik, szinte csak forte-fortissimo dinamika van jelen. Az eddig hullámzást biztosító crescendo-decrescendo párok visszaszorulnak, helyüket crescendo vagy konstans dinamika veszi át (9. kottapélda).

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

The first system of the musical score, measures 150-159, features four staves. The top staff is the vocal line with lyrics 'széles szél'. The second staff is the piano accompaniment. The third and fourth staves are for the cello and double bass. The music is characterized by a steady, driving rhythm with frequent accents and dynamic markings such as *f* and *ff*. The texture is dense, with many notes and rests.

The second system of the musical score, measures 160-169, continues the piece. It features the same four staves as the first system. The music maintains its driving, accented character, with dynamic markings like *f*, *ff*, and *pp*. The texture remains dense and rhythmic, with a clear sense of forward motion.

9. kottapélda. Az ötödik főszakasz vége, erőteljes fokozás.

Az ötödik főszakasz végül a harmadik alszakaszba (15. ábra) csapódik. Ez a szakasz jóval hosszabb az első kettő alszakasznál, ezért formailag azonos rendű a főszakaszokkal, ráadásul ide kulminál az ötödik főszakasz. Egy-egy normál hang mellett szinte csak üveghangokat hallunk. Egy állandó emelkedés jellemzi, amelyben van egy rövid törés a 167. ütemben, ez fokozza a feszültséget. A cselló csak a szakasz végén jelenik meg, akkor is egy kitartott kissetekkel normál hangon, egyértelműen jelezve a zenei folyamat folytatódását (10. kottapélda).

A hatodik főszakasz a 174. ütemben kezdődik és a 184. ütemben ér véget. Ez a főszakasz használja a legmagasabb regisztereket, a hangszerek nagy arányban csak üveghangot játszanak. A glisszandot használó C_3 (trillák) gesztus többszöri megjelenése hangsúlyosabbá teszi az elmosódott körvonalakat, mintha távolabbról, elrévedve tekintenénk a fraktálobjektumra. Gesztusok a D (artikulált) csoportból már nem jelennek meg (11. kottapélda).

Baráth Bálint: Káosz és kompozíció

First system of musical notation, measures 165-174. It consists of three staves. The top staff is in treble clef, the middle in alto clef, and the bottom in bass clef. The music is dense with many notes and rests, including various dynamic markings such as *ff*, *mp*, and *p*. There are also some performance instructions like *rit.* and *rit. II*.

Second system of musical notation, measures 175-183. It consists of three staves. The top staff is in treble clef, the middle in alto clef, and the bottom in bass clef. The music continues with complex rhythmic patterns and dynamic markings like *ff*, *mp*, *p*, and *mf*. There are also some performance instructions like *rit.* and *rit. II*.

10. kottapéllda. A harmadik alszakasz közepe és vége, 165-174. ütemek.

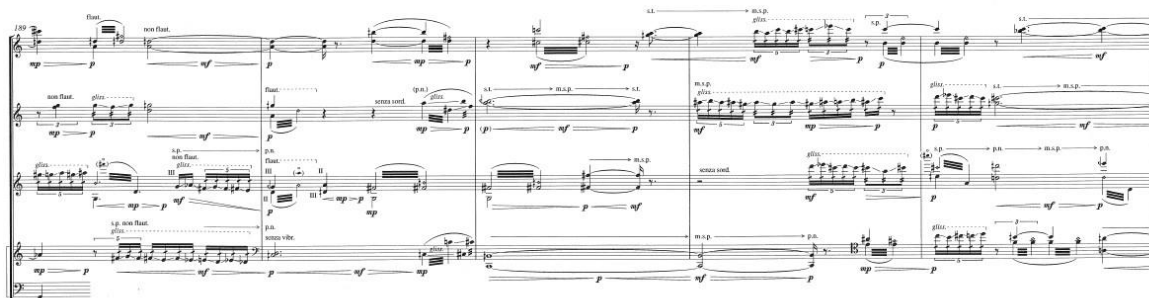
Third system of musical notation, measures 175-183. It consists of three staves. The top staff is in treble clef, the middle in alto clef, and the bottom in bass clef. The music continues with complex rhythmic patterns and dynamic markings like *mp*, *f*, and *mf*. There are also some performance instructions like *rit.* and *rit. II*.

Fourth system of musical notation, measures 175-183. It consists of three staves. The top staff is in treble clef, the middle in alto clef, and the bottom in bass clef. The music continues with complex rhythmic patterns and dynamic markings like *mp*, *f*, and *mf*. There are also some performance instructions like *rit.* and *rit. II*.

11. kottapéllda. A hatodik főszakasz eleje, 175-183. ütemek.

1.5 A főszakaszok tanulmányozása

A hetedik főszakasz a 184-197. ütemek között található. Ez a főszakasz már csak az statikus (A) és mozgó (B) gesztusokat használja. Az előző, hatodik szakasszal ellentétben most mindegyik hangszer játszik, dinamikában és hangmagasságban is csökkenő zenei anyagot. A cello mély, hosszú kitartott hangjai újra megjelennek, melyeket kiegészítenek főként a brácsa, de a hegedűk szólamai is. A B₂ gesztus uralja a szakaszt, emiatt a nyomvonalak irányváltásai jól követhetők, emellett jól érzékelhető a vonalak egyfajta puhítása, mely a darab végét készíti elő (12. kottapélda).

The image shows the first system of a musical score, measures 184-193. It consists of five staves. The top staff is for the flute (flaut.), the second for the oboe (ob.), the third for the clarinet (cl.), the fourth for the bassoon (fag.), and the fifth for the cello (vcl.). The score includes various dynamic markings such as p, mp, mf, and sf, and articulation marks like accents and slurs. The music is in a 3/4 time signature and features a complex texture with overlapping lines and sustained notes.The image shows the second system of a musical score, measures 194-193. It consists of five staves, continuing the instrumentation from the first system: flute (flaut.), oboe (ob.), clarinet (cl.), bassoon (fag.), and cello (vcl.). The score continues with dynamic markings (p, mp, mf) and articulation marks. The musical texture remains dense and complex, with many overlapping notes and sustained sounds.

12. kottapélda. A hetedik főszakasz eleje, 184-193. ütemek.

A nyolcadik főszakasz a 197 ütemtől a kóda kezdetéig, a 205. ütemig tart. Ez a szakasz kizárólag a statikus (A) gesztusokból építkezik. A kontúrok elmosódnak, a nyomvonalak iránya érzékelhető, de az egyes pontokat összekötő vonalak egyenesből görbéké alakulnak. Az A₄ és A₅ gesztusok jelenléte továbbra is hordoz némi feszültséget, így előkészítve a kóda megnyugtató szerepét. A normál és az üveghangok elegye a gesztuskombinációkkal párosulva unikális hangzást eredményez, a szólamok sűrű egymásra halmozása itt is néhol már szinte egy hangszínen oldódik fel (13. kottapélda).

13. kottapélda. A nyolcadik főszakasz közepe, 199-203. ütemek.

A kóda végérvényesen kisimítja a hangzást. A zaklatottan változó harmóniai keringés megáll, ez már önmagában drámai hatást kelt. Egyfajta centrum alakul a G hang körül, melyet a cselló pizzicatoval ismétel. A két hegedű és a brácsa kizárólag üveghangokat használ.⁵⁹ Egy fényes, kristályszerű hangszín keletkezik, amelyek összetevői mikrotonális devianciákkal a természetes felhangsört célozzák meg (14. kottapélda).

14. kottapélda. Kóda.

⁵⁹ Leszámítva a nagyon rövid ideig megszólaló normál kis G-ket, melyek azonban a cselló szerepét erősítik.

II. RÉSZ

2. Tristan Murail: *Allégories* című művének elemzése

Tristan Murail 1990-ben fejezte be *Allégories* című művét, amelyben a fuvola, kürt, hegedű, gordonka, ütőhangszerek mellett egy olyan rendszert is használ, amely jelen idejű hangszintézist tesz lehetővé. Az *Allégories* azon darabok közé tartozik, amelyek inspirációs háttérben felfedezhetünk egy vagy több tudományos modell leírásából származó gondolatokat, algoritmusokat.

Murail a fraktálmodellből ismert önazonosság elvét alapvetően kiindulási pontként használta, a mű a bevezetésben említett képzeletbeli tengely bal oldalán helyezkedik el. Mindez nem jelenti azt, hogy az *Allégories* zenei anyagának kompozíciós módszerei ne bővelkednének rafinált matematikai megoldásokban. Inkább arról van szó, hogy az olyan összetett gondolati építmény, mint a káoszelmélet alkalmas arra, hogy sugalmazzon egy már meglévő eszköztárral rendelkező zeneszerzőt újfajta kombinációk, és egy innovatív nagyforma megalkotására.

2.1 Az *Allégories* objektumai

A darab struktúrájának megismeréséhez érdemes meghatározni, hogy Murail mit gondol a zenei objektumról. Murail az általa meghatározott zenei objektum magyarázatát azzal kezdi, hogy a klasszikus stílusú darabok arpeggio jellegű témáit objektumként írja le:

Nem az a fontos, hogy a téma például C-Esz-G hangok egymásutánját használja. Nem is az a fontos, hogy az ember tudja, hogy c-mollban van, hanem az, hogy felismerje az „arpeggio” objektumot. A darab további részében [...] a harmónia színei, az intervallumok változni fognak, de mindezen tárgyaknak erős közös identitása lesz.¹

Ezt az objektumelképzelést Murail az Objektumorientált Programozás (OOP) szemléletéből kölcsönzi.² A programozási paradigmák segítségével az ember valós folyamatokat igyekszik modellezni, ilyenformán az OOP a valóságos világ ábrázolásának egy módszere. Lényege, hogy úgynevezett objektumokat kezel. Ezek az objektumok adatokat és funkciókat tartalmaznak, ezek együttesen határozzák meg az objektum állapotát.

¹ Tristan Murail: „L’objet musical”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004.) 169-172. 169. Saját fordítás, mint a továbbiakban.

² I. h.

A különböző állapotokat a metódusokkal lehet leírni illetve megváltoztatni.³ Egy objektumorientált program az egymással összeköttetésben lévő objektumok összessége, amelyben minden objektumnak körülírt, gondosan determinált feladata van. Az objektumok ilyenformán tekinthetők egy modellezett világ önálló egységeinek. Az objektumokat tulajdonságaik szerint különböztetjük meg és soroljuk osztályokba. Az osztályokra érdemes úgy gondolni, mint sablonokra, amelyek képesek létrehozni egy-egy objektumot. Az objektum-osztályok tartalmazzák a hozzájuk sorolt egységek közös jellemzőit. A hasonló tulajdonságokkal bíró objektumok tehát egy osztályba tömörülnek. Minden objektum egy osztály példánya, eszerint hordozza osztályának sajátosságait és átveszi az osztály adatszerkezetét és műveleteit egyaránt.⁴

Ebben a kontextusban tehát egy arpeggio objektum az arpeggio osztálynak egy példánya. Egy téma létrehozásához alkalmazott módszer (metódus) a „készíts arpeggiót”, amelyet ha parancsba adunk, az arpeggio-példány generál egy arpeggio-mozgást egy másik osztály, a harmonikus mező hangjait felhasználva. Az elkészült motívumot aztán tovább finomíthatjuk egyéb paraméterek megadásával, mint a sebesség, az ambitus, a lépések száma, szélessége, iránya. Az arpeggio osztálynak is lehetnek alosztályai, mint például egy szabálytalan arpeggio vagy egy véletlenszerű arpeggio.⁵ Murail igyekszik megfeleltetni a tradicionális tematikus fejlesztés illetve a leitmotívum átalakításából eredő fejlesztés eredményeit az OOP sugallta komponálási elvbe, azonban belátja, hogy ez nem sikerülhet:

Mindazonáltal ez a fajta objektumfogalom ellentmond a tematikus fejlesztés megközelítésének, közelebb van a leitmotívumhoz. [...] A leitmotívum azonban, mivel a hallgató számára a jelzőtábla szerepét tölti be, általában nem vesz részt a formák és textúrák kialakításában, és a diskurzuson belül elszigetelt marad; úgy tűnik számomra, hogy nincs olyan objektum funkciója, amit keresünk.⁶

Murail a zenei objektumhoz olyan képességet kíván rendelni, amely lehetővé teszi, hogy egy darab formaképzésének is aktív tagja legyen. Ilyenformán nemcsak a fejlesztés

³ Például a Skála nevű objektumnak különböző állapotai lehetnek, mint a dūr, moll vagy bohlen. Ezeket az állapotokat a metódus segítségével tudjuk kiválasztani, például Skála.dūr parancs a dūr skálát fogja visszaadni, a Skála.bohlen a Bohlen-Pierce skálát adja vissza.

⁴ Kovács D. Lehel István, Sergyán Szabolcs, Nyékyné Gaizler Judit: „Objektumorientált programozás.” In: Nyékyné Gaizler Judit (szerk.): *Programozási nyelvek*. (Budapest: Kiskapu Kft., 2003). 391-459. 391-392.

⁵ Murail: *L'objet musical*, i. m., 171.

⁶ I.m., 171.

2.1 Az Allégories objektumai

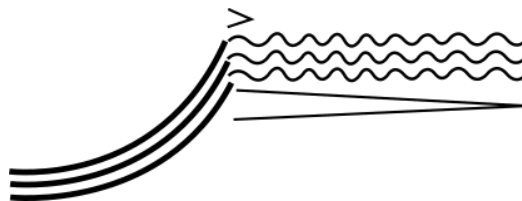
módszereit vizsgálja felül, hanem egy darab részeinek egymáshoz való viszonyát is, mindemellett nagyobb hangsúly fektet egy darab érzékelésének dimenziójára is:

Ahelyett, hogy csak a tematikus, formai modellekre, tonális progressziókra összpontosítanánk, inkább a strukturális és statisztikai jelenségek érdekelhetnének, mindaz, ami a mű valódi érzékelését érinti, nem pedig annak elméleti koncepcióját. [...] A zenei objektum fogalmához tehát hozzárendelhetünk más fogalmakat is, mint például a textúra. Ahelyett, hogy ellenpontról, többszólamúságról vagy kísért dallamról beszéljünk, a textúra különböző típusait lehetne kategorizálni.⁷

Tovább gondolva ezt az elképzelést oda jutunk, hogy ez a fajta zenei objektum akkor működik hatékonyan, hogy ha a hangszínt is arra a formaképző szintre emeljük, ahol a tematikus fejlesztés és az abból kialakuló formaképzés áll. Murail deklarálja, hogy ebben a koncepcióban a folyamat gondolata különösen fontos:

Egy összetett zenei kép, amely textúrákból és tárgyakkból áll, a komponenseit érintő átalakulásoknak köszönhetően életre kel, majd egy másik kép felé halad, amely igencsak eltérő és amellyé fokozatosan alakul át a különböző, mozgásba hozott folyamatok révén. [...] Az objektumok folyamatai és metamorfózisai új, sőt, szokatlan jellegű köztes helyzeteket hoznak létre, miközben az átalakulások által létrehozott instabilitás erőteljes feszültséget, irányultságot ad a zenei diskurzusnak.⁸

Az *Allégories*-ban témák és leitmotívumok helyett tehát zenei objektumokat találunk. Ezek a zenei objektumok egy alapobjektumra vezethetők vissza. A darabban található minden zenei objektumhoz valamint az alapobjektumhoz a szerző egy vizuális reprezentációt készített. Az alapobjektum rajza az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az alapobjektum reprezentációja. T. Murail ábrája.

⁷ I.m., 171.

⁸ I.m., 172.

Murail kiindulási pontként egy olyan alapobjektumot akart létrehozni, ami egyszerű, mégsem banális, ugyanakkor plasztikus, sokféleképpen átalakítható és eléggé karakteres ahhoz, hogy felismerhető legyen.⁹ Az alapobjektumban több hangszer egymásra helyezett, skálaszerű, gyors felfutása egy trillázó, halkuló akkordba torkollik, amelynek belépési pontját egy akcentus is segíti. Az alapobjektum az *Allégories*-osztály példányainak prototípusaként tekinthető.¹⁰ Az *Allégories*-osztálynak további alosztályai vannak, a darabban található összes zenei objektum pedig az alosztályok egy-egy példánya.

A 2. ábrán látható az *Allégories*-ban fellelhető alosztályok reprezentációi (2-3-4-5-6), illetve az összes megjelenő példány.¹¹ A szerző bevallása szerint valamennyi zenei objektum¹² az alapobjektum transzformációja.¹³ A darab szerveződése szempontjából azonban az motívumfejlődés nem lineáris, nem úgy építkezik, hogy fokozatosan átalakítja az alapobjektumot. Ezek a motívumok szabadon reagálnak egymásra, mindenféle kombinációban előfordulnak. A formaképzésben tevékenyen részt vesznek és a darab alapelképzelését, tudniillik a folyamat létrehozását és megjelenítését aktívan támogatják. A műben nem a logikailag összefüggő formaartikuláció uralkodik, hanem inkább egy önszervező, saját magára visszaható forma képe rajzolódik ki. Az egyes formarészeket erőszakosan lehetne csak elválasztani egymástól, mert ezek inkább egymásba hatolnak, fokozatosan átalakulnak. A darab kisebb formai egységei nem statikusak, hanem az adott motívumok felhasználásától függően dinamikusan változnak. Murail ugyan szabályos formarészeket határozott meg, de ezeket a részeket a darab hallgatáskor a kotta ismerete nélkül nem lehet világosan elválasztani egymástól.

⁹ Tristan Murail: „Allégories”. In: Pierre Michel (szerk.): Tristan Murail: Modèles & artifices. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004.) 172-197. 183.

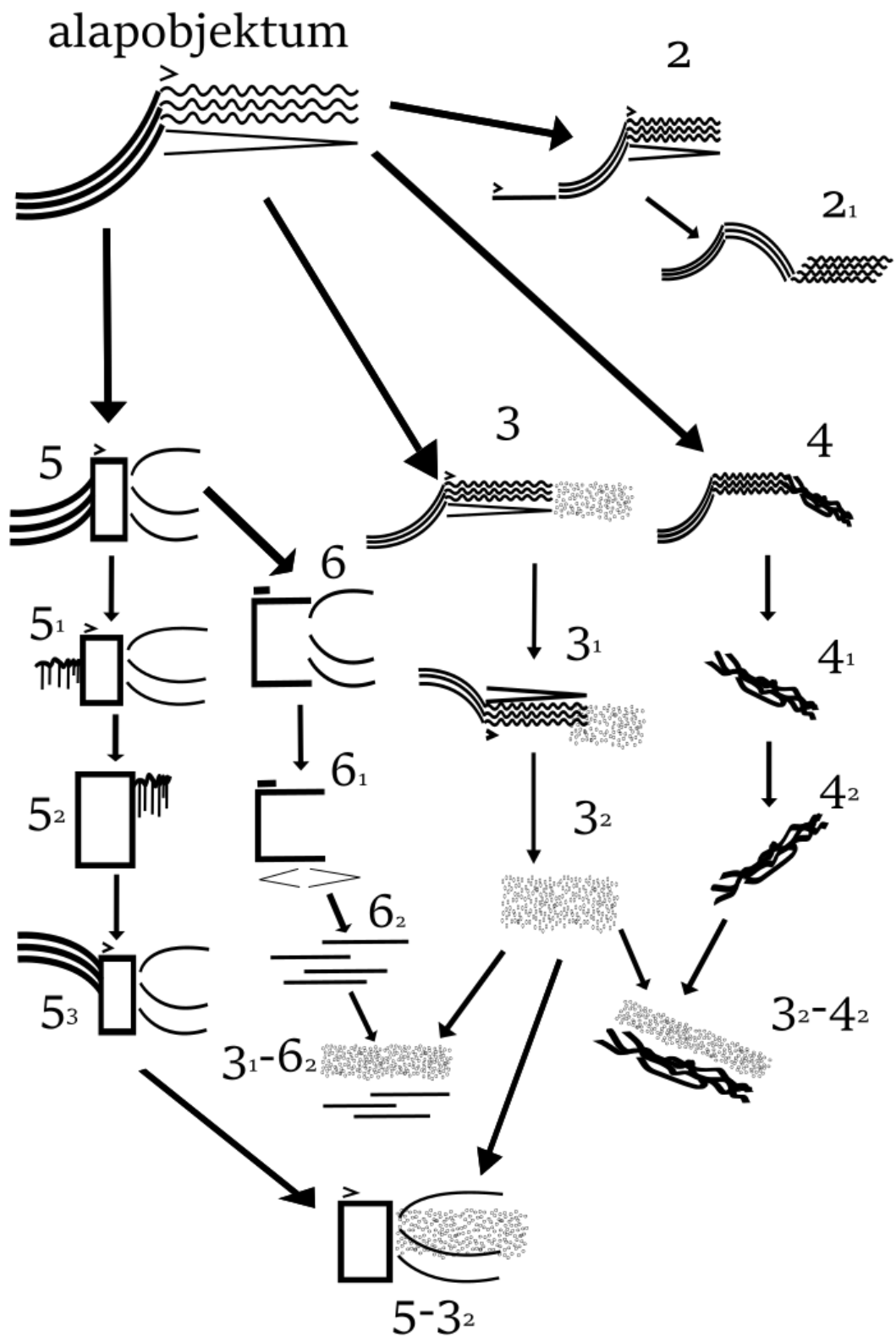
¹⁰ Azért tekintem prototípusnak az alapobjektumot, mert eredeti formájában nem találtam meg a darabban.

¹¹ Ez az ábrát a szerző készítette. A 2-3-4-5-6 számmal jelölt zenei objektumok további állapotai az indexelt formában jelölt zenei objektumok (például 2₁).

¹² Az elemzés további részében a zenei objektumot és a motívumot szinonimaként használom, hiszen ebben a kontextusban a két kifejezés ugyanarra a jelenségre utal.

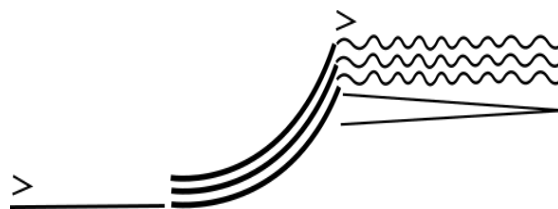
¹³ Murail: *Allégories*, i. m., 184.

2.1 Az Allégorias objektumai



2. ábra. Az Allégorias összes zenei objektuma, kapcsolataik valamint transzformációik.
T. Murail ábrája.

A kettes alosztály zenei objektumaiban egy kitartott hangmagasság előzi meg az alapobjektumot. A motívum reprezentációja a 3. ábrán látható.



3. ábra. A második alosztály zenei objektuma. T. Murail ábrája.

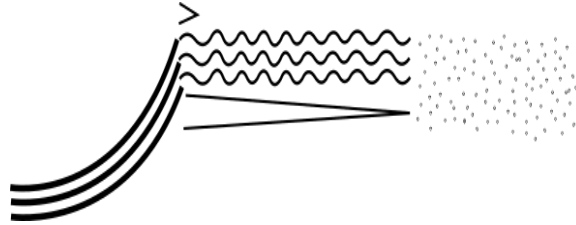
Ez a motívum indítja el a darabot. A kettes alosztály egy példányának megjelenését az 1. kottapélda mutatja. A mély hangmagasságtartományból induló, majd rövid idő alatt a magasba szökő felfutás ugyancsak jól felismerhető karaktert ad a példánynak. A hagyományos hangszereknél megjelenő rezonáns trilla kibővül egy szintetikus hangzással, amelynek spektruma csak szinuszhangokból áll. Ez elnyújtja, emlékszerűvé teszi a komplex hangszínben jelen lévő hangmagasságok érzékelését.

Tristan MURAIL


1. kottapélda. A második alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 1-3 ütem.

2.1 Az Allégories objektumai

Az alapobjektum egy másik változata ugyancsak bővít, de ezúttal utótagot helyez az alapobjektum mögé. Ez a hármas alosztály, amelynek a reprezentációja a 4. ábrán látható, valamint egy megjelenését a 2. kottapélda mutatja.



4. ábra. A hármas alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.

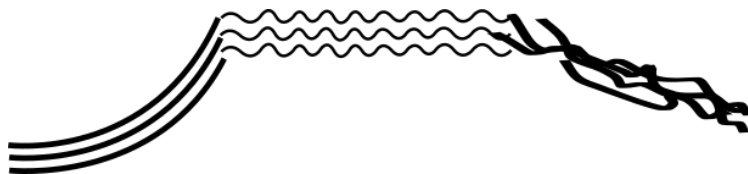


2. kottapélda. A hármas alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 36-40 ütem.

Az utótagot a szerző felhőnek hívja (utolsó ütem a 2. kottapéldán). Ezek a felhők legtöbbször a magas regiszterben jelennek meg. A felhőket a szerző quasi-aleatórikus módszerekkel komponálta, mindazonáltal megőrizte benne annak a spektrumnak az összetevőit, ahová behelyezte az alakzatokat. Ezekben a zenei objektumokban nincsen

szinkronitás a hagyományos és elektronikus hangszerek között, ellenben az indulás pillanata pontosan meg van határozva.¹⁴

A négyes alosztály is utótagot rak az alapobjektum mögé, de ezúttal egy folyondárszerű, spirálhoz hasonló gestussal zárja le a trillázó akkordot (5. ábra, 3. kottapélda).



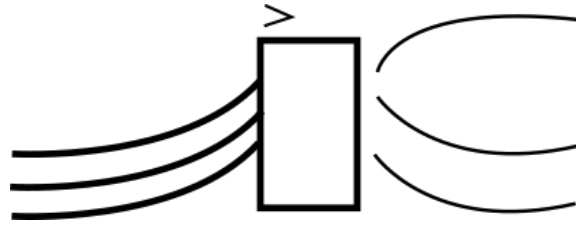
5. ábra. A négyes alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.

3. kottapélda. A négyes alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 8-10 ütem.

Az ötös alosztályban a trillázó akkordot egy statikus, hangszeres akkordból és ennek az akkordnak hangmagasságaiból szintetizált hangzáseggyüttes váltja fel, ami félúton van az egyértelműen hangmagasságokból álló akkord és a hangszíneként érzékelt hangjelenség között. Olyan hangszínek jönnek így létre, amelyeknek pár összetevője hangosabb, ezért ezeket az összetevőket hangmagasságként ki tudjuk hallani (6. ábra, 4. kottapélda).

¹⁴ Murail: *Allégories*, i. m., 179.

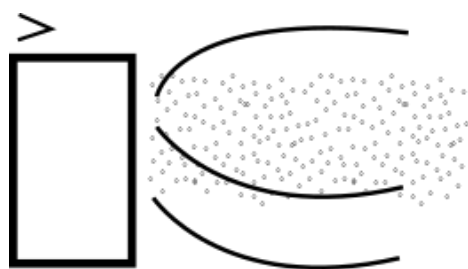
2.1 Az Allégories objektumai



6. ábra. Az ötös alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.

4. kottapélda. Az ötös alosztály zenei objektumának egy példája. P szakasz, 10-12 ütem.

Ahogy az OOP elmélete sugallja, létrehozhatók olyan példányok, amelyek két alosztály tulajdonságait ötvözik. Murail is megalkot számos olyan zenei objektumot, amelyek eltérőek ugyan, de az alapobjektumból származtathatók. Itt felfedezhetjük az önazonosságra való törekvést abban, hogy a motívumok közös alapanyagból fakadnak. Az ötös és a hármas zenei objektum fúzióját a 7. ábra, megvalósítását az 5. kottapélda mutatja.



7. ábra. Az ötös és hármás zenei objektum fúziója



5. kottapélda. Az ötös és hármás zenei objektum fúziójának egy példája. J szakasz, 15 ütem.

Az 1. táblázat tartalmazza a 2. ábrán látható zenei objektumok egy-egy rövid leírását a könnyebb beazonosíthatóság kedvéért.

Zenei objektum száma	Leírás
2	felfutás+trilla
2 ₁	felfutás+esés+trilla
3	felfutás+trilla+felhő
3 ₁	esés+trilla+felhő
3 ₂	felhő
4	felfutás+trilla+spirál le
4 ₁	spirál le
4 ₂	spirál fel
5	felfutás+akkord
5 ₁	gesztus+akkord
5 ₂	akkord+gesztus
5 ₃	esés+akkord
6	akkord
6 ₁	légzés akkord
6 ₂	kibomló akkord
3 ₁ -6 ₂	felhő+kibomló akkord
3 ₂ -4 ₂	felhő+spirál le
5-3 ₂	akkord+felhő

1. táblázat. A 2. ábrán található zenei objektumok rövid leírása.

2.2 Szintézistípusok az *Allégories*-ban

2.2.1. Frekvenciamoduláció

Az *Allégories*-ban található szintetizált hangok többsége additív szintézissel készült, azonban Murail néhány hangszín megalkotásához frekvenciamodulációt használt.¹⁵ A legegyszerűbben megalkotható frekvenciamoduláció során két hanggeneráló egységet alkalmazunk, amelyek a vivő és a modulátor frekvenciákat állítják elő. A vivő egység frekvenciáját modulálja a modulátor, amelynek következtében kevés számítási kapacitással is igencsak összetett hangszínt kapunk eredményül.¹⁶ A használat fő indoka abban keresendő, hogy Murail szerint az ütőhangszerek pontos spektrumát nehéz megtervezni, ezért egy specifikus megoldást kell alkalmazni:

A tam-tamokkal és általában az összes ütőhangszerrel kapcsolatban az a probléma merül fel, hogy nem lehet előre tudni, milyen lesz a megszólalás pillanatában a hangszínük összetétele. [...] Ez valódi problémát jelenthet, ha egy előre pontosan elképzelt hangszínre számítunk, amelyet egy hangszeres összeállítással kívánunk összekeverni. A megoldás abban állhat, ha egy valódi, a saját gazdag hangszínét létrehozó tam-tamot keverünk össze szintetizált hanggal, amelyek pontosan a keresett hangszínt állítják elő.¹⁷

A frekvenciamoduláció során a vivő körül akár végtelen sok oldalsáv jelenhet meg. Az oldalsávok frekvenciáját a következő formulával számolhatjuk ki:¹⁸

$$f = p \pm i * m$$

amelyben az f az eredményül kapott frekvencia, a p a vivő, az m a modulátor, az i pedig a pozitív egész számokon fut végig. Ha a vivő frekvencia 100 Hz, a modulátor 10 Hz, akkor

$i = 0, f = 100 \pm 0 * 10$ tehát az eredmény 100 Hz.

$i = 1, f = 100 \pm 1 * 10$ tehát az eredmény 110 Hz és 90 Hz.

$i = 2, f = 100 \pm 2 * 10$ tehát az eredmény 120 Hz és 80 Hz.

¹⁵ Murail: *Allégories*, i. m., 175.

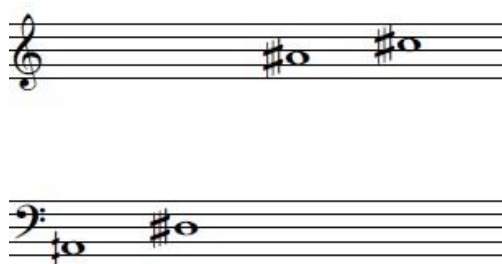
¹⁶ Eduardo Miranda: *Computer Sound Design*. (Oxford: Focal Press, 1998.), 24.

¹⁷ Murail: *Allégories*, i. m., 175.

¹⁸ Miranda: *Computer Sound Design*, i. m., 26.

Az eredményeket Hertzben kapjuk, amelyek átláthatóvá teszik a számításokat, ugyanakkor a kottában ritkán írunk Hertzben, ezért át kell konvertálni a kapott értékeket zenei hangmagasságokra. Murail a negyedhangoknál húzza meg a határt, tehát az eredményeket fel- illetve lekerekíti a legközelebbi negyedhangra azért, mert úgy ítéli, hogy ez nem idéz elő játszhatatlan szólamokat.¹⁹

A darabot indító hangfűrt frekvenciamodulációval készült²⁰ (lásd 1. kottapélda). Ha ismerjük a vivő- és modulációs frekvenciát, visszafejthetjük a hangfűrt összetételét. Murail a kottában megadja az ehhez szükséges információkat. A vivőfrekvenciákat a 9. ábrán láthatjuk.



9. ábra. A darabot indító hangfűrt vivőfrekvenciái. T. Murail ábrája.

A szerző a moduláló frekvenciát arányszámmal adja meg,²¹ amely a kezdőakkordnál 0.16. Az *i* pedig pozitív egész számok sorozata, egy és tíz között. Ha lefuttatjuk a számítást, az egyes vivőfrekvenciákon a következő oldalfrekvenciák jönnek létre (10-11-12-13 ábra):



10. ábra. Az első vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.

¹⁹ Tristan Murail: „Gondwana, pour orchestre (1980)”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004.) 119-127. 120.

²⁰ Vö. Murail: *Allégories*, i. m., 175.

²¹ Ha vesszük az első vivőfrekvenciát: nagy Á (110 Hz) + 25 cent (11.6 Hz) = 111.6 Hz, akkor a moduláló frekvencia $111.6 * 0.16 = 17.856$ Hz.

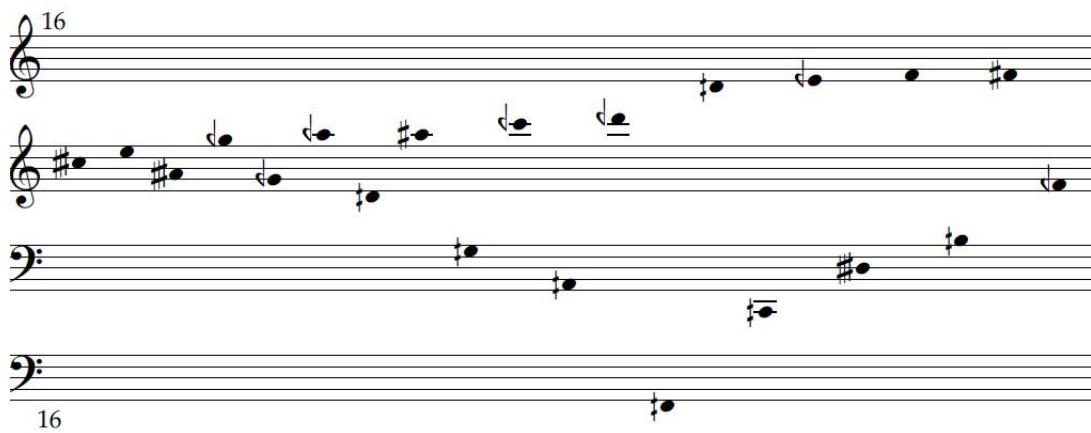
2.2 Szintézistípusok az Allégories-ban



11. ábra. A második vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.



12. ábra. A harmadik vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.



13. ábra. A negyedik vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.

A számítások eredménye egy rendkívül komplex spektrum, amely méltó kiegészítése a nyitóütemekben használt tam-tam ugyancsak összetett hangszínének. A most bemutatott eljárással készült hangfürtök többször is megjelennek a darabban, kontrasztot nyújtva az additív szintézissel készült hangokhoz.

2.2.2. Additív szintézis

Az additív szintézis mélyen kötődik a Fourier analízishez, amelynek segítségével bármely periodikus hullámformát lebonthatunk különböző frekvenciával és amplitúdóval rendelkező összetevőikre.²² A szintetizálás során ezeket az összetevőket, a hang atomjait, azaz a szinuszhullámot használjuk. Az előre meghatározott, saját frekvenciával és burkológörbével irányított amplitúdóval rendelkező szinuszokat összeadjuk azzal a céllal, hogy egy specifikus hangot készítsünk. Az eljárást spektrális modellezésnek is nevezik, hiszen ha megvannak a megfelelő adatok, elméletileg bármilyen spektrumot létre tudunk hozni.²³ Az eljárás hátránya, hogy rendkívül számításigényes. Egy komplex hangszínnek bámulatosan sok összetevője van, amelyek az alaphanghoz viszonyítva lehetnek harmonikusak vagy inharmonikusak, illetve szinte minden természetes hangszín tartalmaz zaj-elemeket is.²⁴

A darabban többféle additív szintézissel létrehozott hangot találunk, amelyeket a szerző betűvel jelölt kategóriák szerint állított össze. Ezzel egyrészt már a komponálás során szűri a létrehozható hangszínek végtelen számát, amellyel hozzájárul az elektronikus szólam tisztázásához. Másrészt pedig a megalkotott hangszínek jellegét formaképző szintre emeli, hiszen a spektrumok összetétele mellett a megjelenésüket is szabályozza és felismerhetővé teszi annak a hallgatónak, akinek nincs információja a darab összetételéről. A kategóriákat az 2. táblázat tartalmazza:²⁵

a	arpeggio
g	tam-tam típusú spektrum
h	spektrum-részlet, amelyből hangsor fejlődik
j	felfutás nélküli hangok
k	perkusszív jellegű hangok
kr	ismétlődő hangok
n	fejlődő spektrum, ami gyorsul
q	erőteljes alaphang
r	rezonanciapont

²² Vesd össze: Miller Puckette: *The Theory and Technique of Electronic Music*. (Singapore: World Scientific Printers, 2007). 267.

²³ Vesd össze. Miranda: *Computer Sound Design*, i. m., 50.

²⁴ Lásd: Szigetvári Andrea: *A multidimenzióális hangszíntér vizsgálata*. DLA disszertáció. Budapest: Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem, 2012. (Kézirat). 87.

²⁵ Grabócz Márta feljegyzései alapján. T. Murail listája, konferencia, Centre Acanthes, 1991.

2.3 A szintetikus szólamról

seq	hangfelhő
sm	az összetevőit kibontó spektrum
m	egyedüli hangmagasság vagy kéthangú akkord
t	egymásra helyezett trillák

2. Táblázat. A szintetikus hangok rövidítései és leírásaik. T. Murail listája.

A szintetizált hangok jelentős része inharmonikus összetevőkből álló, meghatározott rezonanciapontokkal rendelkező spektrum. Ez segíti a hagyományos és a szintetikus hangok minél jobb összeolvadását, ezáltal az akkordérzékelés ellenében erősítik a hangszínérzékelést. Az összes szintetizált hang összetétele az azt kiegészítő hagyományos hangszer hangszínének spektrális elemzésén alapul.²⁶

2.3 A szintetikus szólamról

Az elektronikus szólam megalkotásához Murail a Yamaha TX-816-os hangszintetizáló egységet használta. A TX-816 nyolc TF-1-es modullal rendelkezik. A TF-1-es modul képes reprodukálni egy DX-7-es szintetizátor minden beállítását, 16 hangot tud egymástól függetlenül kezelni és hat operátorral²⁷ rendelkezik. Az egységnek nincs billentyűzete, ezért az előadáshoz MIDI kontrollert és egy, a MIDI üzeneteket kezelő MAX szoftvert használtak.

Ez a kiemelkedő számítási kapacitás lehetővé tette Murail számára, hogy valós időben tudja kezelni/vezélni az elektronikus szólamot. Ezt fontos kiemelni, hiszen ilyenformán az elektronikus hangszer kezelője is képes azonnal előállítani a finom hangszínbeli változásokat, a többi hangszerjátékkal együtt tud reagálni a karmester gesztusaira, nem utolsósorban pedig rubato játékmódot is tud használni. Ezek Murail számára is fontos kitételek voltak, mert korábbi darabjainál a most említett lehetőségek hiánya nehezítette az elképzelései megvalósulását:

A Désintegrations (1983) komponálása során még nem létezett ilyen típusú rendszer. [...] A zeneszerzők továbbra is a mágnesszalagot használták. [...] Ez nagy nehézséget okozott: a szalagot szinkronizálni kellett a hangszeres együttesrel, és a karmesternek fülhallgatót kellett használnia, melyen keresztül a partitúra ütemeihez szinkronizált

²⁶ Murail: *Allégories*, i. m., 183.

²⁷ Az operátor a DX-7 alapvető hangelőállítási egysége, a szintetizátor által alkalmazott frekvenciamodulációs szintézis lényeges építőköve.

ütésekhez tartozó kattogásokat lehetett hallani. [...] Ez a "click-track" technika bebörtönzi a karmestert és a rubato játékmód sem lehetséges.²⁸

Az azonnali beavatkozás, a valós idejű megszólalás képessége azt is jelentette, hogy nem kellett igazodni egy, az előadás alatt nem változtatható, merev időkerethez, amely gyakran az egyik legfontosabb feltétele a hangszer-elektronika műfajú daraboknak. Az elektronikus szólam ebben a felállásban jobban képes igazodni a mindig változó zenei környezethez, képes megszólaltatni előre elkészített motívumokat, hangobjektumokat illetve textúrákat, hangfürtöket. Az elektronikus szólamot kezelő játékos azonnal tud reagálni az apró hangindítási változtatásokra, illetve a hangerőt is befolyásolni tudja, hozzájárulva az elektronikus és hangszeres szólamok²⁹ minél nagyobb integrációjához.

A TX-816 használata további lehetőségeket nyitott meg a zeneszerző előtt, ugyanis a sok, egymástól függetlenül kezelhető paraméterrel valós idejű additív szintézist tudott megvalósítani. Mindezeket figyelembe véve elmondhatjuk tehát, hogy a TX-816 felhasználása jelentősen segítette a szerzőt a szintetikus és hangszeres szólamok hangszíneinek egyesítésére irányuló törekvéseiben.

2.4 Az *Allégories* formai felépítése

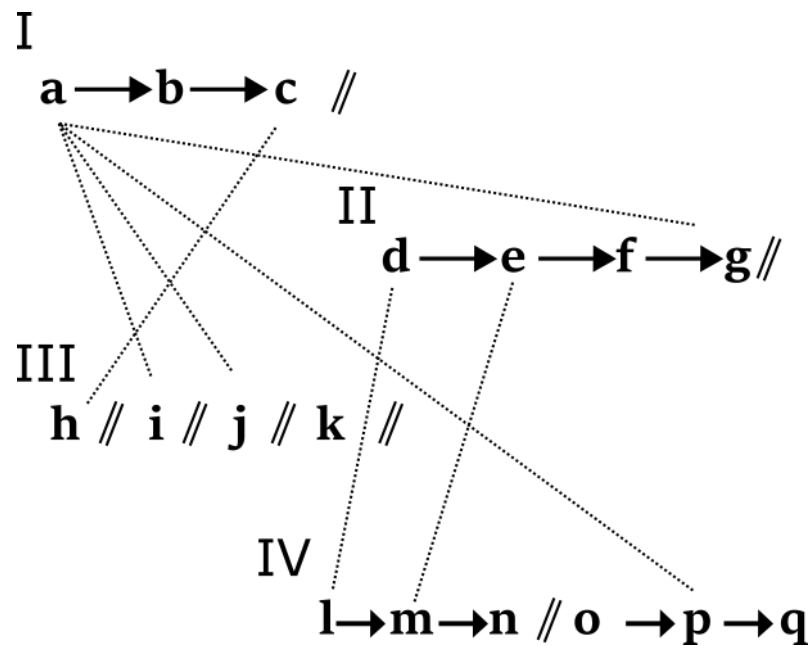
Az *Allégories* négy nagy formai egységre tagolódik, az egyes formai egységeken belül pedig további szakaszokra. A 14. ábrán az egységeket római számmal, a szakaszokat betűvel jelzi a szerző. A nyilak azonnali átmenetet jelölnek a szakaszok és textúrák között, amíg a kettős vonalak szüneteket jelentenek. A szünet nélküli átmenetknél nem érzékelhető a szakaszok vége, a hangzások összetorlódnak. A szünetek használatával egyenetlenebb lesz a darab folyamata. Ez a megszakítottság a darab közepén, a harmadik formai egységben jelentkezik. A szaggatott vonalak az egyes szakaszok közötti összefüggésre hívják fel a figyelmet. Az itt látható forma kibontakozását nagyban segíti a harmóniai viszonyok tudatos kialakítása. A szerző a darab komponálása során kitüntetett figyelmet szentelt a formaképzés és a harmóniai fejlődés szimultán kialakítására:

²⁸ Murail: *Allégories*, i. m., 173.

²⁹ A hangszeres szólam kifejezés azokra a nem elektronikus szólamokra utal, amelyeket a darabban részt vevő, nem elektronikus hangszeres szólamok szólaltatnak meg. Az akusztikus hangszer kifejezés félrevezető, mert a jelző nem a hangszer megszólaltatásának módjára utal, hanem a térre, amiben megszólal. Jelenleg nincsen következetes fogalmi keret a két hangszertípus megkülönböztetésére, így ebben a kontextusban a hangszeres szó a mechanikusan megszólaltatott hangszerekre utal, az elektronikus/szintetikus szó pedig az elektromosság által megszólaltatott hangszerekre utal.

2.4 Az Allégories formai felépítése

Az *Allégories* a harmónia funkcionális fejlődéséhez kapcsolódó formai diskurzust próbál javasolni. A hangzatok egymásutánisága, sorozata a darab formájának szerves részét képezi. [...] Úgy vélem, hogy a harmóniai fejlődés ugyanolyan fontos, mint a gesztusok és időtartamok formai és dinamikai szerkezete, olyannyira, hogy a rosszul megválasztott harmóniak vagy időtartamok ellentmondhatnak annak a zenei diskurzusnak, amelyet az ember ki akart alakítani.³⁰



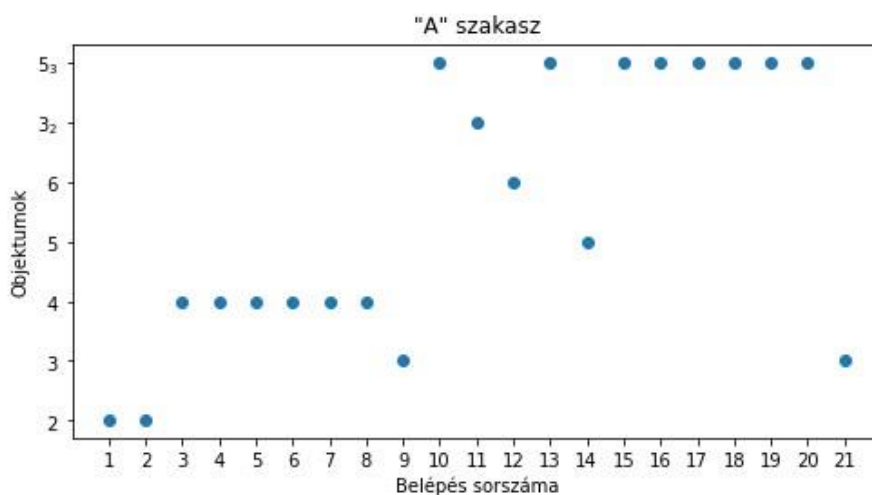
14. ábra. Az *Allégories* egységei (római számmal) és a szakaszai (latin betűvel). Szaggatott vonalak jelzik a szakaszok összefüggéseit. A nyilak azonnali átmenetet, a kettős vonalak szüneteket mutatnak. T. Murail ábrája.

2.4.1 Az első formai egység

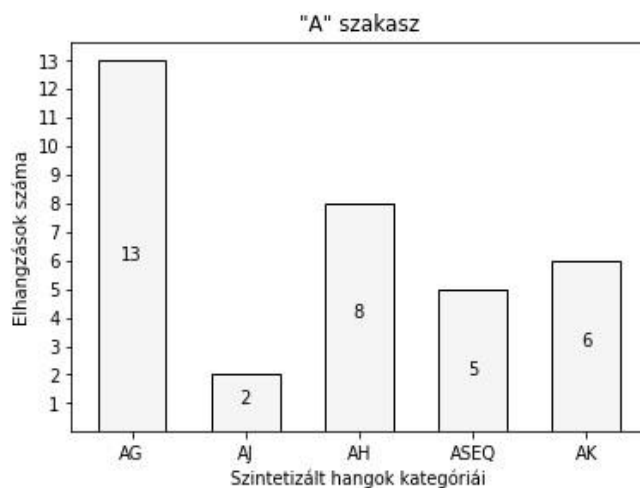
Az első formai egység három szakaszból áll (A, B, C). Az A szakaszban a zenei objektumok közül a négyes és ötös osztályba (felfutás+trilla+spirál le, felfutás+akkord) sorolható szerepel a legtöbbet, mint az a 15. ábrán látható. A motívumok időbeli kiterjedése változatos, a legrövidebb fél ütemes, míg a leghosszabb hét ütemig tart (16. ábra). A első szakasz (A) nagyobb gesztusokkal, hosszabb motívumokkal indul, amelyek fokozatosan rövidülnek, a zenei szöveget felszabdadják az ötös osztály (felfutás+akkord) zenei objektumai. A szintetizált hangzások kategóriái közül ötfélét használ a szerző. A „g” kategória (tam-tam típusú spektrum) szólal meg a legtöbbször, amint azt a 17. ábra mutatja. Ellenben ez nem azt jelenti, hogy a „g” kategória tizenháromféle spektrumot tartalmaz

³⁰ Murail: *Allégories*, i. m., 188.

ebben a szakaszban, mivel az „ag1”³¹ ötször jelenik meg egymás után rögtön a darab elején. Ez a kiinduláshoz használt harmóniai állapot perцепcionális megerősítése, egyúttal alátámasztja a szerző szándékát az akkordikus fejlődés határozott irányítása tekintetében. Murail számára fontos az akkordok illetve harmóniak/hangfürtök egymás után való megjelenésének közben tartása:



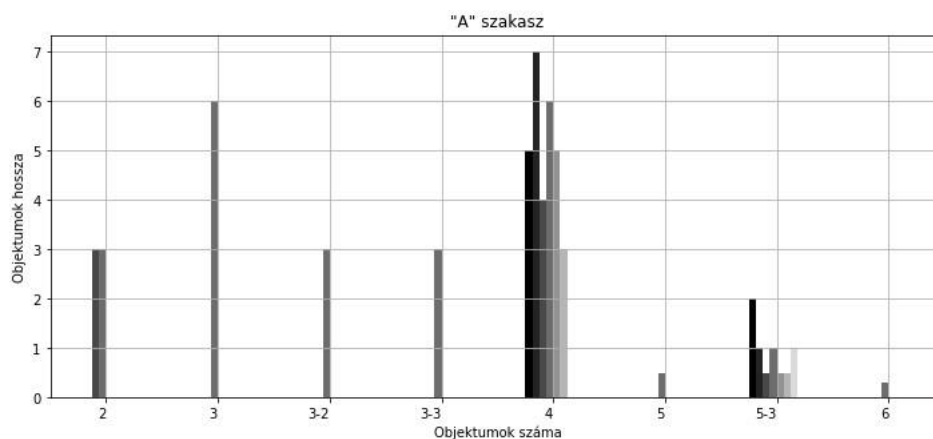
15. ábra. Az A szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2 = felfutás+trilla, 3 = felfutás+trilla+felhő, 4 = felfutás+trilla+spirál le, 5 = felfutás+akkord, 6 = akkord, 32 = felhő, 53 = esés+akkord.



17. ábra. Az A szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma. G = tam-tam típusú spektrum, J = felfutás nélküli hangok, SEQ = hangfelhő, H = spektrum-részlet, amelyből hangsor fejlődik, K = perkusszív jellegű hangok

³¹ Itt az „a” a szakaszra utal, a „g” a szintetizált hangzás kategóriájára, a szám pedig arra, hogy ez az adott szakaszon belül hányadik hangzás.

2.4 Az Allégores formai felépítése



16. ábra. Az A szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve. Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.

Ez az egyik első gondom: meghatározni azt a harmóniai szekvenciát, amely a legjobban képviseli az általam elképzelt zenei képet. Ez nem könnyű feladat, különösen azért, mert nem csak a tárgy saját hangszíne számít, hanem a kontextushoz való viszonya is. Ráadásul ezek a harmonikus egymástutániságok gyakran összetett aggregátumokból állnak, nagyszámú, finoman hangolt komponenssel.³²

Kiváló példát ad ennek bizonyítására az A szakasz végén, a szintetikus szólamban található szekvencia, amelyet a 6. kottapélda mutat. Az összes „ak” kategória (perkusszív jellegű hangok) akkordja itt hangzik el és ez a harmóniasor az egész szakaszra jellemző, hangfűrtökkel és spektrum-torzításokkal telített útvonalkeresésének egy világos lezárása, egyúttal a B szakasz előkészítése.

6. kottapélda. Az A szakaszt lezáró harmóniasor. A szakasz, 48-53 ütem.

³² Murail: *Allégores*, i. m., 188.

Ez a harmóniai fejlődés a szerző egy alapvető zeneszerzési technikájának példája, nevezetesen a harmonikus spektrumtorzítás felhasználása. A spektrumtorzítás alapja egy lineáris függvény:³³

$$f_{(x)} = ax^b + c.$$

1. Egyenlet. A spektrumtorzításhoz felhasznált lineáris függvény.

Ha például $a = 100$ Hz, $b=1$, $c=0$ és x a természetes számok növekvő sorozata, a függvény kiadja a harmonikus felhangsort.³⁴ Az eljárás magyarázatát Murail a zongora spektrumában található inharmonikus arányok felfedésével folytatja:

A zongora hangja valóban kissé inharmonikus. Vegyük a tizenhatodik felharmonikust referenciának. Ha a zongora hangja tökéletesen harmonikus lenne, akkor a tizenhatodik harmonikusnak az alaphang negyedik oktávjának kellene lennie. A valóságban ez a harmonikus azonban körülbelül fél hanggal magasabbnak hangzik. Ez a jelenség nyilvánvalóan a zongora összes részhangját érinti, sorszámuk arányában – minél magasabbak a részhangok, annál nagyobb az eltérés.³⁵

A zongora spektrumában lévő összetevők eltérése a harmonikus spektrumban található összetevőktől majdnem egyenletesen növekszik (18. ábra).³⁶

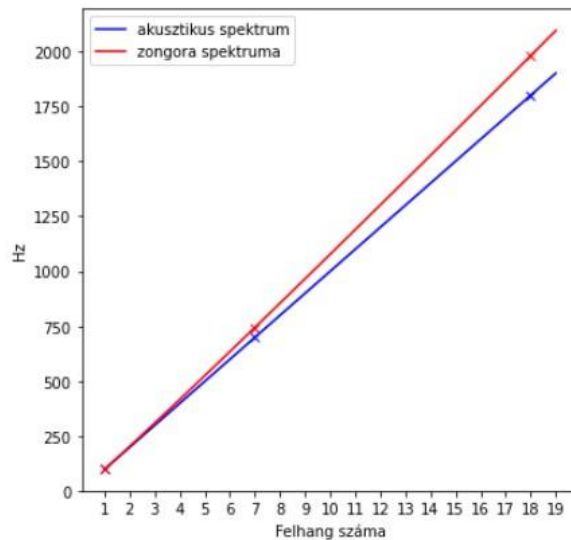
³³ Vessd össze: Murail: *Allégories*, i. m., 147.

³⁴ $f_1 = 100 * 1 = 100$, $f_2 = 100 * 2 = 200$, $f_3 = 100 * 3 = 300$ és így tovább.

³⁵ Tristan Murail: „Désintégration pour ensemble et bande magnétique: la section I”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004.). 127-154. 146. Saját fordítás.

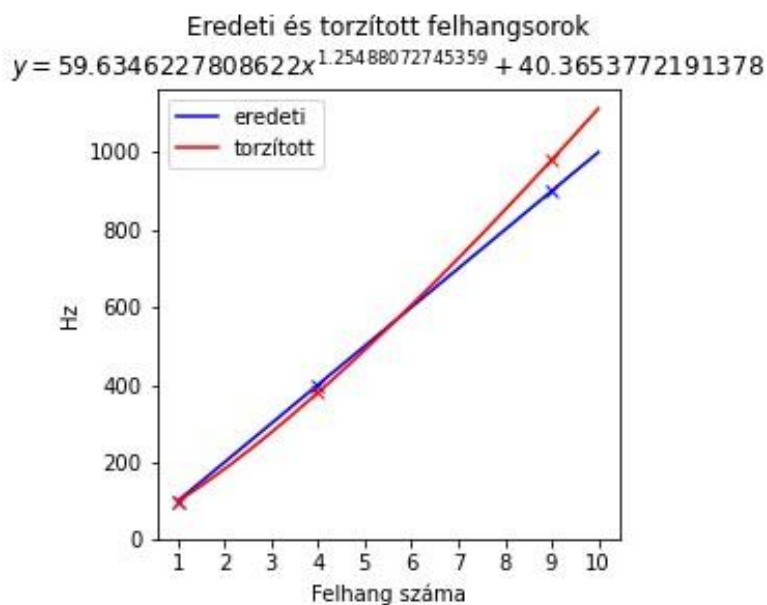
³⁶ Young, Robert W.: „Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings”. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 24/3 (1952. 05): 267-273. 268.

2.4 Az Allégories formai felépítése



18. ábra. A zongora spektrum összetevőinek eltérése (piros) az akusztikus spektrumban található összetevőktől (kék).

Murail a harmonikus spektrumtól való eltérést hívja spektrumtorzításnak. A harmonikus felhangsорт megadó egyenletet felhasználva céljaink szerint módosíthatjuk a harmonikus spektrumot. Nagyobb mértékben elváló, egyenletes eltéréseket generálhatunk vagy meghatározhatunk olyan függvényt is, amelyek egyes összetevőket leszállítanak, más összetevőket felemelnek. Ha például veszünk egy alaphangot 100 Hz-en, a negyedik felhangot leszállítjuk 20 Hz-el, a kilencedik felhangot pedig megemeljük 80 Hz-el, a következő, nem lineáris függvényt kapjuk (19. ábra):



19. ábra. Az eredeti (akusztikus, kék) spektrum és a torzított (piros) spektrum eltérése. Az 1. Egyenlet változóinak számai adják ki a torzított spektrumot.

A torzítás mértékét meghatározó függvény birtokában, a kiértékelés során ki tudjuk számolni a számunkra fontos információkat a spektrumokról, mint például az összetevők frekvenciaszámait, illetve az eltérés mértékét (20. ábra):

	eredeti	torzított	különbség Hz	különbség cent
1	100.00	100.00	0.00	0.00
2	200.00	182.68	-17.32	-156.80
3	300.00	277.08	-22.92	-137.58
4	400.00	380.00	-20.00	-88.80
5	500.00	489.75	-10.25	-35.84
6	600.00	605.28	5.28	15.18
7	700.00	725.85	25.85	62.77
8	800.00	850.89	50.89	106.78
9	900.00	980.00	80.00	147.43
10	1000.00	1112.82	112.82	185.07

20. ábra. A 19. ábrán látható függvények számokban. Balról jobbra: az akusztikus (eredeti) spektrum és a torzított spektrum összetevőinek Hertz számai, a két spektrum közötti különbség Hertzben és centben.

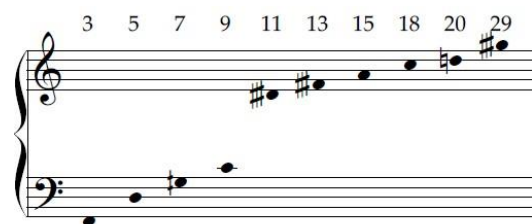
A zongora inharmonikus spektrumának megfigyeléséből eredő eljárást ilyenformán általánosítani lehet, vagyis végtelen számú torzításfüggvény hozható létre.

Az *Allégories* „B” szakaszának harmóniai szekvenciája egy kontra Bé alapú harmonikus spektrum torzításának különböző konfigurációiból ered. Murail ebből a spektrumból kiválasztotta a következő sorszámú összetevőket: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 20, 29. A torzítások létrehozásához a harmadik és a huszonkilencedik összetevőket manipulálta.³⁷ A célja az volt, hogy nem-lineáris útvonalon keresztül fokozatosan megközelítse az eredeti harmonikus spektrumot. Ilyen módon nem egy torzítást használt, hanem torzítások sorozatát. Az eredeti spektrum kiválasztott összetevői (21. ábra) és a sorozat utolsó két spektruma (22-23. ábra) a szerző adatai alapján rekonstruálhatók.³⁸ Az első torzított spektrumban a harmadik összetevőt 4.5 Hz-el megemelte, míg a huszonkilencedik összetevőt 62 Hz-el leszállította. A második spektrumban a harmadik összetevőt 0.8 Hz-el emelte meg, ezzel szemben a huszonkilencedik összetevőt 90 Hz-el leszállította.

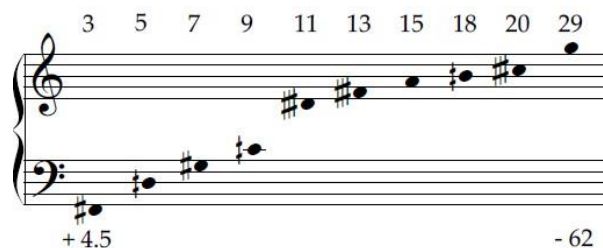
³⁷ Murail: *Allégories*. i.m., 190.

³⁸ Murail: *Allégories*. i.m., 191.

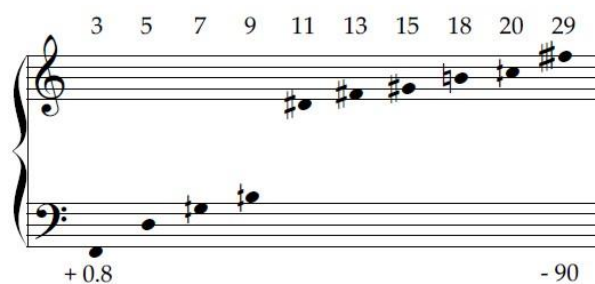
2.4 Az Allégories formai felépítése



21. ábra. A „B” szakasz harmóniai szekvenciájában található akkordok kiinduló spektruma. Kontra Bé alapú harmonikus spektrum. T. Murail ábrája.



22. ábra. A B szakasz harmóniai szekvenciájában lévő egyik akkord hangjaihoz használt spektrum. T. Murail ábrája.



23. ábra. A B szakasz harmóniai szekvenciájában lévő egy másik akkord hangjaihoz használt spektrum. T. Murail ábrája.

A spektrumtorzítások felhasználásnak oka a következő, a „C” szakasz elején található harmonikus spektrum fokozatos elérésének megvalósítása. Murail célja itt egyértelműen egy irány érzetének kialakítása volt, amely eléggé észrevehető ahhoz, hogy a darab nagyívű formájának is szerves része legyen. A „B” szakasz teljes egészében arra szolgál, hogy ennek a fejlődésnek helyet adjon. A torz spektrumból a harmonikus spektrumba vezető vonal azonban nem lineáris:

Egy élő, folyamatosan megújuló harmóniát akartam, amely egy pontos cél felé orientálódik, de a kérlelhetetlen csúszó hatás nélkül, amelyet a torzulások tisztán lineáris fejlődése okozott volna. Itt egy adott cél felé tartunk, de szeszélyes útvonallal.³⁹

³⁹ Murail: *Allégories*, i. m., 192.

A harmadik és a huszonkilencedik összetevő manipulálását a 24. ábra mutatja. Látható, hogy a harmadik összetevő útvonala csekély mértékben változik, a huszonkilencedik összetevő viszont nagy kilengéseket produkál.⁴⁰ Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy visszatérnek azokhoz a pontokhoz, amelyeken már keresztülmentek. Ez annak az igénynek a bizonyítéka, amelyet a szerző fogalmaz meg a harmóniai fejlődés megvalósításával kapcsolatban:

Ezek a hangszín-harmónia aggregátumok gyakran önmagukban is nagyon érdekesek; azonban ismét csak az elemek közötti kapcsolatok a legfontosabbak. A kihívás tehát az, hogy kielégítő módon szervezzük meg az előrehaladást. Erre nincs pontos szabály: ez egy összetett dolog, különösen az ilyen gazdag, mikrotonális aggregátumok esetében. De a harmóniak újszerűsége ellenére a megoldandó problémák örök érvényűek: az aggregátumok megújítása vagy ismétlése, a közös hangok jelenléte vagy hiánya, a szélső hangok mozgására fordított figyelem (amit az ember általában jobban érzékel), a regiszterek játéka.⁴¹



24. ábra. A B szakaszban felhasznált spektrumok harmadik (narancs) és huszonkilencedik (kék) összetevőjének torzítási útvonala. B szakasz, 1-14 ütem. T. Murail ábrája.

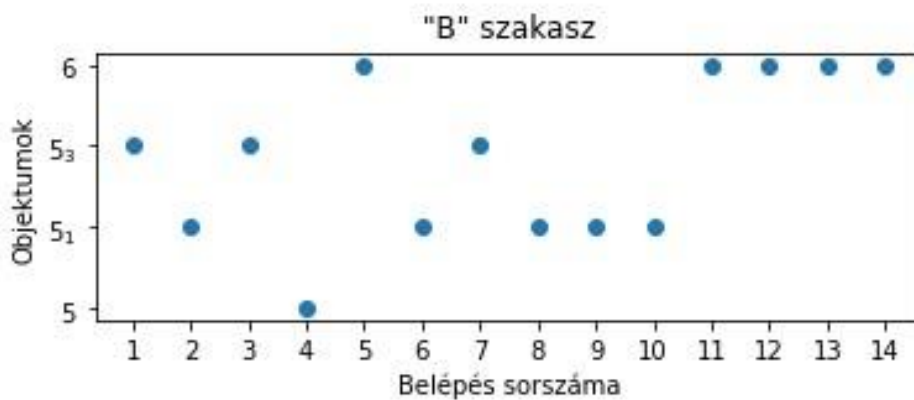
A zenei objektumok használata tekintetében azt lehet mondani, hogy az 5-ös motívumok (felfutás-akkord) uralják a „B” szakaszt (25. ábra), de a „C” szakaszba való belépés előkészítéséhez a 6-os motívumokat (akkord) alkalmazza a szerző. A zenei

⁴⁰ Meg kell jegyezni, hogy a harmadik és a huszonkilencedik összetevő változása más, mivel a spektrumon belül máshol helyezkednek el. A harmadik összetevő mélyebben van, ezért kisebb változás is hallható már, ellenben a huszonkilencedik összetevő magasabban van, így nagyobb kilengésekkel szükséges változtatni, hogy a változás hallható legyen.

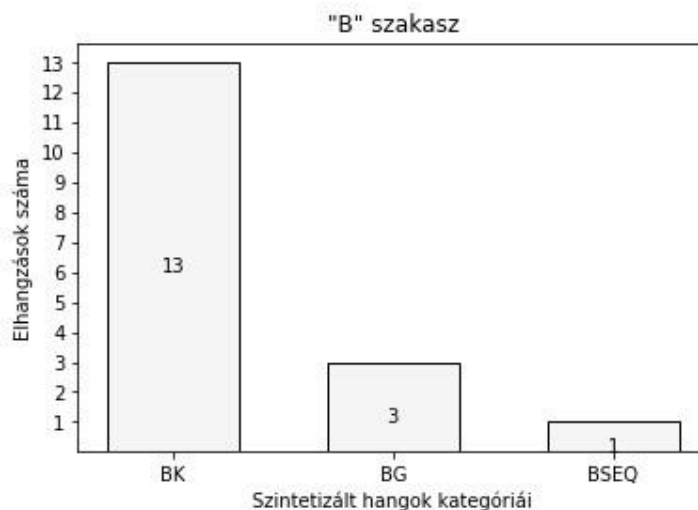
⁴¹ Murail: *Allégories*, i. m., 192.

2.4 Az Allégeries formai felépítése

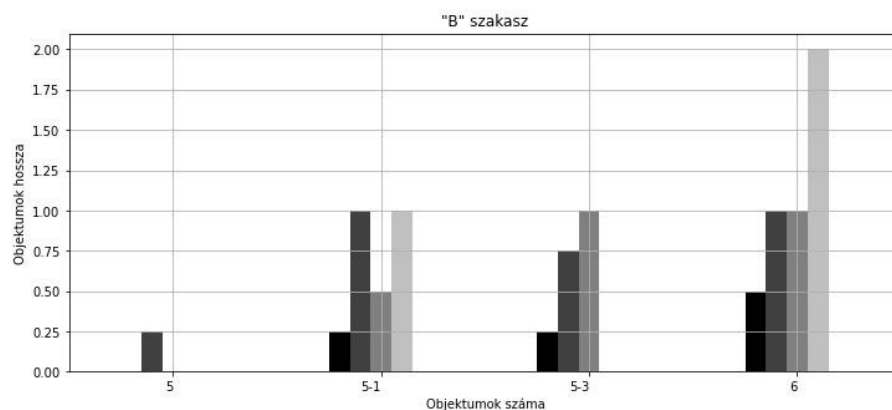
objektumok időtartama a „B” szakasz nagy részében lényegesen rövidebb, mint az előző A szakaszban (27. ábra). Ahogy közeledünk a C szakasz kezdetéhez, egyre hosszabbak lesznek a hangzások, csak a hatos motívumok ismétlődnek, a zenei folyamat fokozatosan lenyugszik. A motívumok változatossága lecsökken az előző szakaszhoz képest, de ez illeszkedik ahhoz az átvezető szerephez, amelyet a szakasz betölt. A szintetizált hangzásokból is kevesebb fajta van (26. ábra). A „bk” kategória (perkusszív hangok) hozzáisimul a hagyományos hangszerek akkordjaihoz, a másik kettő kategória („bg” és „bseq”, tam-tam spektrum és hangfelhő) lényegében színező funkciót lát el.



25. ábra. Az B szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 5 = felfutás+akkord, 51 = gesztus+akkord, 53 = esés+akkord, 6 = akkord



26. ábra. Az B szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.
K = perkusszív jellegű hangok,
G = tam-tam típusú spektrum, SEQ = hangfelhő.

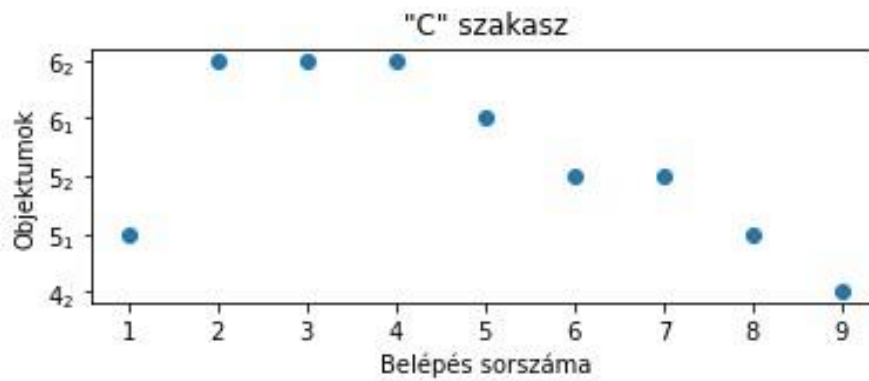


27. ábra. Az B szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve. Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.

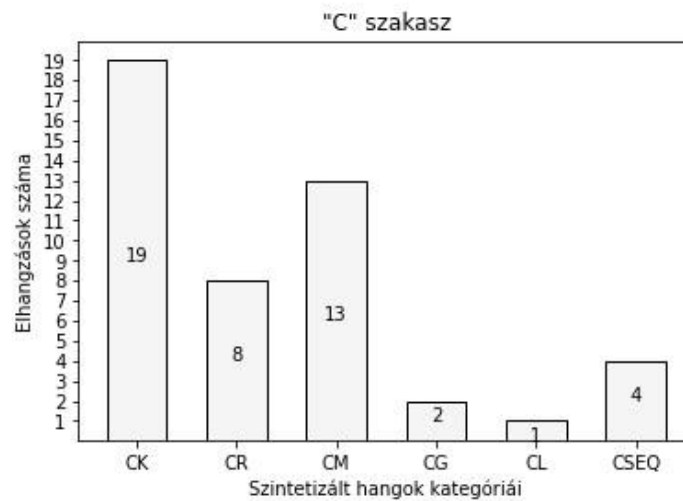
A „C” szakasz is szünet nélkül, azonnal követi a B szakaszt. A „B” szakaszban jelen lévő gyors harmóniai fejlődés, világos kontúrok és feszes ritmus ebben a formarészben az ellentétébe csap át. Az egymásra helyezett textúrák, a motívumok lassabb kifejtése egy nyugodtabb zenei folyamatot rajzol elénk. Ebben a szakaszban három osztályból, ötféle motívumot használ Murail (28. ábra, 4-5-6. objektumok). A motívumok léptéke ebben a szakaszban is változatos, de inkább a nagyobb lélegzetű motívumok szerepelnek (30. ábra). A szerző saját bevallása szerint az elektronikus szólam funkciója nem arra irányul, hogy helyettesítse a hagyományos hangszereket, hanem inkább azok hangjának gazdagítását, diffrakcióját segíti elő.⁴² Ez a szándék látható ebben a szakaszban is, viszont az A és B szakasszal ellentétben, a C szakaszban a szintetikus szólam sokkal aktívabb, mint a hangszeres szólamok. Sokféle kategóriát használ Murail (29. ábra), de a hangzásokat nem egymás után rendezi, hanem legtöbbször egymásra halmozza és kombinációkat hoz létre. Ilyenformán eddig nem hallott fúziót valósít meg a két hangszercsoport között, amivel csak fokozza az ellentétet a B és a C szakasz között, elősegítve ezzel a darab formájának fejlődését.

⁴² Murail: *Allégories*, i. m., 183.

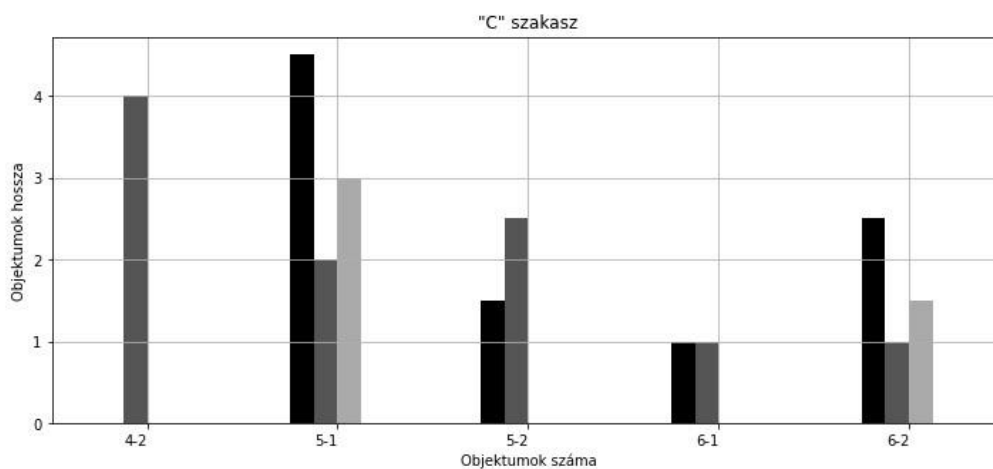
2.4 Az Allégorias formai felépítése



28. ábra. A C szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 42 = spirál fel, 51 = gesztus+akkord, 52 = akkord+gesztus, 61 = légzés akkord, 62 = kibomló akkord.



29. ábra. A „C” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma. K = perkusszív jellegű hangok, R = rezonanciapont, M = egyedüli hangmagasság, G = tam-tam típusú spektrum, SEQ = hangfelhő.



30. ábra. A „C” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve. Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.

2.4.2 A második formai egység

A második formai egység négy szakaszból áll (D, E, F, G), lásd 14. ábra. Ez számottevően rövidebb, mint az első formarész, a második hossza lényegében az első harmada. A szakaszok rövidsége azzal magyarázható, hogy Murail eredeti tervében ezek a szakaszok nem is szerepeltek. A „C” szakasz után rögtön a mostani L szakasz következett, de az L szakasz túlságosan kidolgozottnak tűnt a szerző számára és zavarta, hogy ilyen közel van a darab elejéhez.

Az ilyen döntéseket nehéz tisztán racionálisan megmagyarázni. Talán szükség volt arra, hogy a darabnak ebben a szakaszában továbbra is az alapobjektum kevésbé torz formáit halljuk. Másrészt a felhőszerkezet jól működött egyfajta zárójelként, így beillesztettem a leendő L szakasz rövidített változatát, amelyből a D szakasz lett.⁴³

Murail a felhőszerkezettel arra utal, hogy a G szakasz kivételével a teljes formai egység elektronikus szólamában a „seq” (hangfelhő) szintetizált hangzás kategória van a leginkább jelen. A „D” szakaszban a hangszeres szólamok rövid, pontszerű hangokat játszanak, ilyenformán a két hangzáscsoport hatásosan egészíti ki egymást. Ez a szakasz a 3₂-es motívum (felhő) három variációjából áll. Ezt a motívumot a szerző eddig csak egyszer használta, az A szakasz közepén.

A „D” szakasz végén megjelenik az „sm” kategória, az összetevőit kibontó spektrum motívuma, amely az E szakasz előfutára. Az E szakaszban az elektronikus szólamban a „seq” (hangfelhő) kategória kiegészül az „sm” kategóriával (az összetevőit kibontó spektrum), a szerző egymásra rétegi a hangzásokat. A hagyományos szólamok váltanak és az „sm” kategóriához hasonló, elnyújtott, tartott és egymáshoz képest eltolt hangmagasságokat játszanak. Ez a kombináció nem más, mint a 3₁-6₂-es objektum (felhő+kibomló akkord), amelynek három példánya teljesen kitölti a szakaszt. Ahogy a D szakasz az L szakasz előfutára, az E szakasz a későbbi M szakasz megelőlegezése. A szakaszok közötti kapcsolatokat megfigyelhetjük a korábban bemutatott formai ábrán is, amely a makrostruktúrát írja le (14. ábra).

Az F szakasz egy önálló szekció abban az értelemben, hogy nem utal semmire. A hangszercsoportok közötti bensőséges kapcsolat megmarad, de a hagyományos hangszerek elkezdnek trillázni és tremolózni. Az eredmény az E szakaszhoz képest egy érdekesebb

⁴³ I. m., 189.

2.4 Az Allégories formai felépítése

hangzás lesz, amely egyrészt világosan jelzi a közeledő változást, másrészt bevezeti a kettes zenei objektum (felfutás+trilla) megjelenését, amelynek egy példánya a G szakaszt indítja el.

A „G” szakasz egyértelmű visszaütés az A szakaszra. Ezt bizonyítja a kettes osztályba tartozó zenei objektum három példányának megjelenése,⁴⁴ a tam-tam tremolója és a tam-tam hangszínét kiegészítő, az A szakasz elején található inharmonikus FM spektrum többszöri felbukkanása. Ebben a szakaszban pontosan azt a spektrumot használja Murail, amivel a darabot elindította.

A második formai egység átvezetés az első és a harmadik nagy formarész között. Hangzásokat ismét, ugyanakkor megelőlegez későbbi konfigurációkat. Az első formai egységben a motívumok döntő része egymással szoros kapcsolatban, szinte egymásra halmozva jelentek meg, a második formai egység viszont egy letisztult, szellősebb szervezési formát mutat és egyre ismétli a darab komplex hangzásait, így módon erősíti a hangszín formaképző erejét.

2.4.3 A harmadik formai egység

A harmadik formai egység ugyancsak négy szakaszból áll (H-I-J-K). A „H” szakasz és az előző G szakasz váltásánál különös esemény történik a darabban, tudniillik egymásnak feszül két különböző inharmonikus FM spektrum. A „G” szakasz utolsó akkordja a darab legelején használt spektrum, amíg a H szakasz elején megjelenő hangfürt egy „k” kategóriába tartozó, perkusszív FM hangzás (7. kottapélda). A hatást fokozza a két szakasz közötti rövid szünet, mivel a szakaszok eddig folyondárként, egymásba karolva követték egymást. A szakasz első részében egy, a B szakaszhoz hasonló harmonikus torzítási fejlődést hallhatunk.

⁴⁴ A három példány egyenlő a szakasz teljes hosszával.

26

3 $\text{♩} = 67$ **$1\frac{1}{2}$** ($\text{♩} = 67$) hk 1 $3-3,5''$ **3** $\text{♩} = 100$ **2^a**

Effect

Synth. (13)

Action

Fl.

Cl. sib.

Cor

Vl.

Vlc.

Perc. (F-Tam grave)

Vibraphone

baguettes dures vitesse lent

Ped.

7. kottapélda. A „G” szakasz és a „H” szakasz kapcsolódása.

A „H” szakasz elején 5₂-es motívumok (akkord -gesztus sorakoznak, ezeket világosan tagolja az akkordokat megjelenítő „k” (perkusszív jellegű hangok) szintetikus-spektrum kategória. A gyors akkordfejlődés ezután fokozatosan lassul, mindkét hangszercsoport zenei anyaga átalakul hosszan kitartott hangokká, illetve lassan kibomló hangfürtökké. A fuvola, a klarinét és a hegedű egy-egy kifejező motívuma inkább csak serkenti azt a felismerést, hogy az akkordok fokozatosan spektrumokban oldódnak fel. A szakasz közepén kezd el a zene ébredni, itt a hagyományos hangszerek aktívabbá válnak, kiemelnek fragmentumokat, amelyek sűrűsödnek és egyre hosszabbak lesznek. Mindeközben elindul egy nagydobtremoló, ami majdnem a szakasz végig kitart. Az elektronikus szólamban folytatódik a spektrumkibontás a „h” (spektrum részlet, amelyből hangsor fejlődik) és az „sm” (összetevőit kibontó spektrum) kategóriákkal. Főleg az „sm” kategóriát használja a szerző, amelyekhez hozzáilleszti az eddig ritkán halott „q” (erőteljes alaphang) kategóriát. A sűrűsödés egy erőteljes fokozásba csap át a szakasz végén. Most már nem csak a hangszerek szólamai lesznek dúsabbak, hanem a tempó is gyorsul, illetve kialakul egy akkordfejlődés, erőteljes irányultsággal.⁴⁵ A két hangzáscsoport között szinte

⁴⁵ Vélhetően Murail itt is a spektrumtorzítás manipulálásából nyeri az akkordokat.

2.4 Az Allégories formai felépítése

teljes a szinkron, ami újabb kontrasztot képez a szakasz ezt megelőző részével, megteremtve így az előrehaladás érzetét (8. kottapélda).

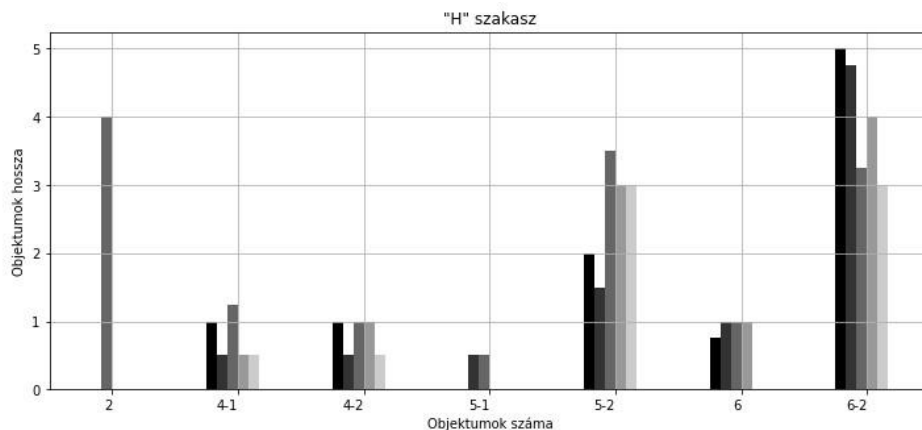
8. kottapélda. H szakasz vége, 47-52 ütem.

A motívumok felsorolása (31. ábra) jól mutatja, hogy ez a szakasz visszautalás a C szakaszra. Ugyanakkor a szakasz végén világosan elkülöníthető négy pont, ahol az elektronikus szólamban a 6-os (akkord), a hangszeres szólamokban pedig a 4-es osztályok (felfutás+trilla+spriál le) példányai szerepelnek együtt. A motívumok hosszúságaiból azt láthatjuk, hogy nincs átmenet: vagy rövid, vagy hosszú motívumot használ a szerző (33. ábra). Ebben a szakaszban Murail összesen hétféle szintetikus hangzást alkalmaz, amelyeket több ponton egymásra is helyez (32. ábra). Eddig itt szerepel a legtöbbféle szintetikus kategória, emiatt itt hallhatjuk a legsűrűbb elektronikus hangzásokat is.⁴⁶

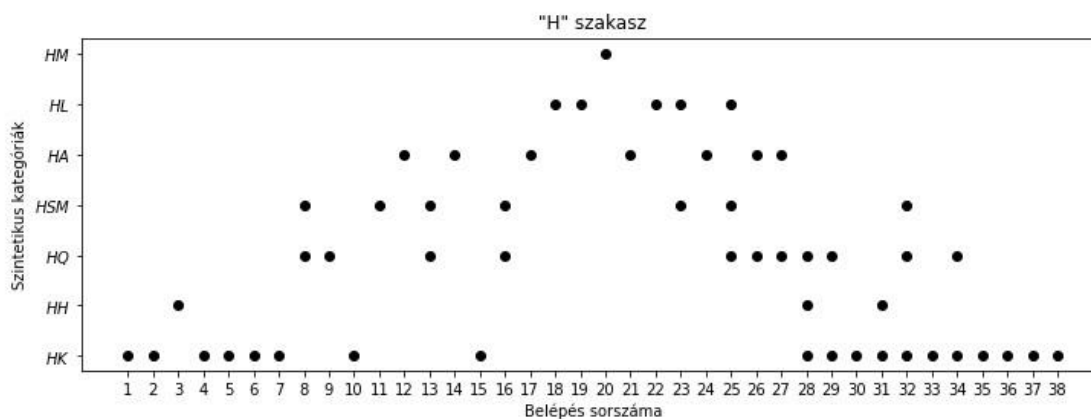
⁴⁶ Az A szakaszban öt, a B szakaszban három, a C szakaszban hat, az E szakaszban kettő, az F szakaszban három, a G szakaszban pedig ugyancsak kettő típusú kategória szerepel.



31. ábra. A „H” szakasz zenei objektumának belépési sorrendje. 2 = felfutás+trilla, 4₁ = spirál le, 4₂ = spirál fel, 5₁ = gesztus+akkord, 5₂ = akkord+gesztus, 6 = akkord, 6₂ = kibomló akkord.



33. ábra. A „H” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve. Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.



32. ábra. A „H” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma. K = perkusszív jellegű hangok, H = spektrum-részlet, amelyből hangsor fejlődik, Q = erőteljes alaphang, SM = az összestevőit kibontó spektrum, A = arpeggio, M = egyedüli hangmagasság.

Az I szakasz az A szakasszal van párban (lásd 14. ábra). A kapcsolatot egyfelől az igencsak aktív, rengeteg egymásba futó folyamat illetve a motívumok hasonlósága bizonyítja. Az „I” szakaszt is érdemes több részre bontani. A szakasz első részében az 5-ös osztály (felfutás+akkord) motívumai vannak a főszerepben (34. ábra), amelyet mindkét hangzáscsoport egymást kiegészítve hoz létre. A magasból a mélybe ugró, majd a mélyből

2.4 Az Allégories formai felépítése

fokozatosan visszatérő építkezés jól kivehető a kottát nézve (9. kottapélda). Ezeket az ugrásokat a 3₁-es (esés+trilla+felhő) zenei objektum zárja le, amelynek ez az első megjelenése a darabban.



34. ábra. Az I szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2₁ = felfutás+esés+trilla, 3₁ = esés+trilla+felhő, 4₂ = spirál fel, 5 = felfutás+akkord, 5₁ = gesztus+akkord, 5₂ = akkord+gesztus, 5₃ = esés+akkord, 6 = akkord.

9. kottapélda. I szakasz, 1-3 ütem.

Az „I” szakasz második részét a 3₁-es zenei objektum indítja (a 34. ábrán a tizenegyedik belépés, I szakasz, 20 ütem), amely sok mélyösszetevőt tartalmazó, érdes

hangszínt tartalmaz. A hagyományos hangszerek szólamai egyszer az akkordokkal együtt megjelenő kitartott hangokkal, máshol az akkordokra rávezető, fel- lefutásokkal segítik a folyamatot. A második rész közepén, az ingamozgással párhuzamosan elindul egy, a B szakaszból már ismert akkordfejlődés (az I szakasz, 27-ik ütemtől, a 34. ábrán a tizenharmadik belépés),⁴⁷ amelyek megjelenítésére az ötös osztály (felfutás+akkord) példányait használja Murail. Ez a folyamat aztán egy időre háttérbe szorul, azonban a szakasz vége felé, a harmadik részben előtérbe kerül (I szakasz, 45 ütem) és a formai folyamat fő motorjává válik. Itt az 5-ös osztály kiegészül a 6-os osztály (akkord) zenei objektumaival, amelyek sűrű egymásutánban torlódnak össze. Ha megfigyeljük a sorozat szélső hangjainak szekvenciáját, két széles hangtartományt bejáró, mozgalmas szólamot látunk, amelyek egy ideig együtt mozognak, majd szétválnak és önállóbbak lesznek (35. ábra).

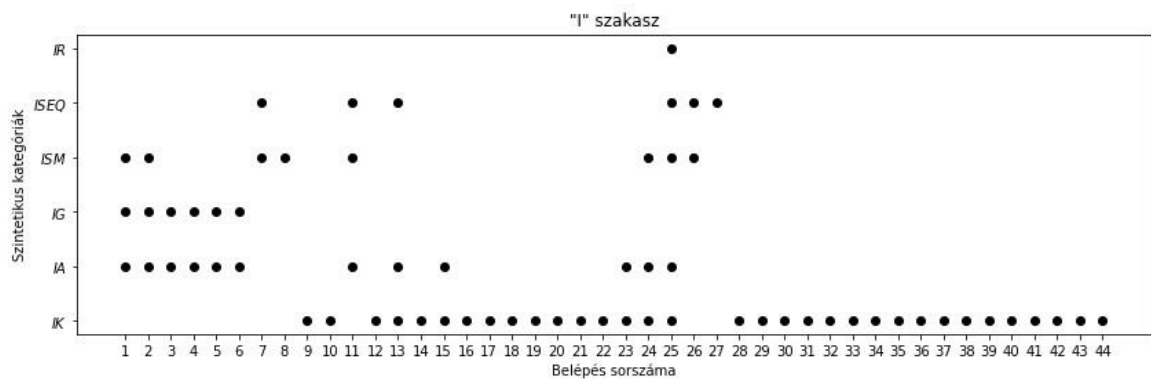


35. ábra. Az I szakasz 27 ütemtől a szakasz végéig tartó, a „k” (perkusszív jellegű hangok) kategória használatával megjelenő akkordok legmélyebb és legmagasabb hangjainak szekvenciája.

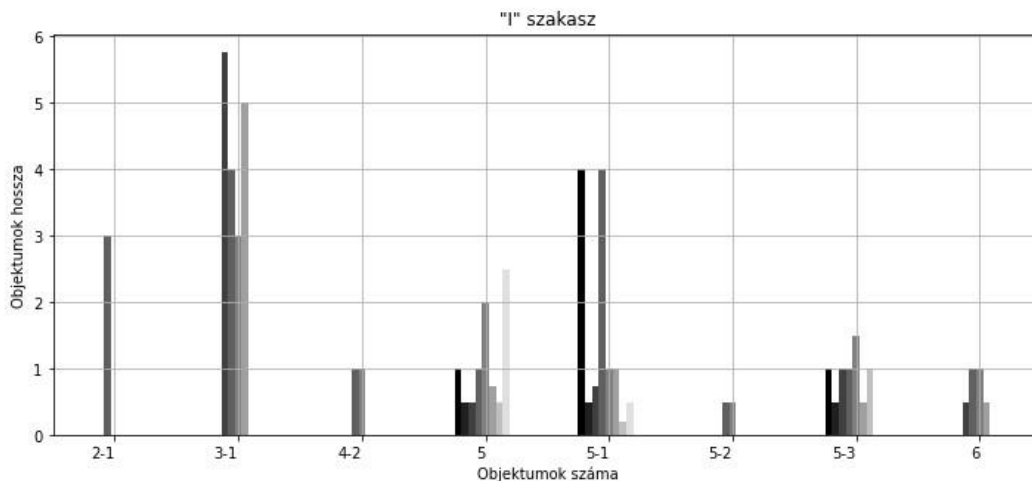
A szintetikus hangzások eloszlásából (36. ábra) feltűnik, hogy a szakasz elején a szerző a kategóriákat kombinálja, majd fokozatosan egyre több akkordsorozatot illeszt be a folyamatba. Ehhez a sorozathoz ezúttal is a „k” (perkusszív jellegű hangok) kategóriát használja. A teljes szakaszra jellemző az elektronikus és hangszeres szólamok nagyfokú integritása, ugyanakkor a több „k” kategória egymás után való szerepeltetése kevésbé sűrű hangzást ad, ellentétben azzal, amit a H szakaszban hallhatunk. A motívumok inkább rövidebbek (37. ábra), kivéve a 3₁-est (esés+trilla+felhő), valamint két 5₁-est (gesztus+akkord), amelyeket ilyenformán egyfajta viszonyítási pontként foghatunk fel.

⁴⁷ Bizonyára ez az akkordfejlődés is spektrumtorzítások eredménye.

2.4 Az Allégories formai felépítése

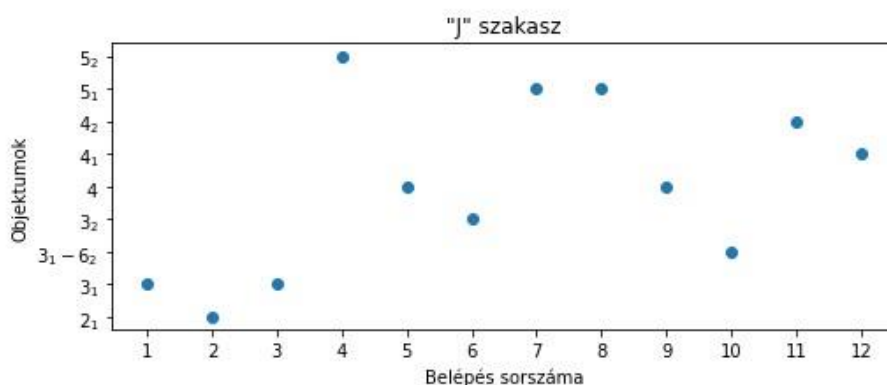


36. ábra. Az I szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.
K = perkusszív jellegű hangok, *A* = arpeggio, *G* = tam-tam típusú spektrum,
SM = az összetevőit kibontó spektrum, *SEQ* = hangfelhő, *R* = rezonanciapont.



37. ábra. Az I szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.
 Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.

A soron következő, J szakaszban összetett, minden hangszert foglalkoztató hangszíneket alkalmaz a szerző. Az egymásra halmozott le- és felfutások mellett, hosszú, kiterjesztett trillák jellemzik a szakaszt. A 3₁-es motívum (esés+trilla+felhő) indítja a szakaszt (38. ábra), ezután meglehetősen sokféle motívum bukkan fel. A hagyományos hangszerek közül a kürt szólama az, amelyik egyfajta szólisztikus szerepre tör, nem csatlakozik a motívumok megjelenéséhez, hanem egy, a többtől világosan elváló szólamot játszik. Kitarított hangokkal, nagyívű crescendo-decrescendo párokkal indít, majd fokozatosan kibontja a dallamát. A többi hangszer javarészt színez, emellett minden hangszernek állandó jelenléte van (10. kottapélda).

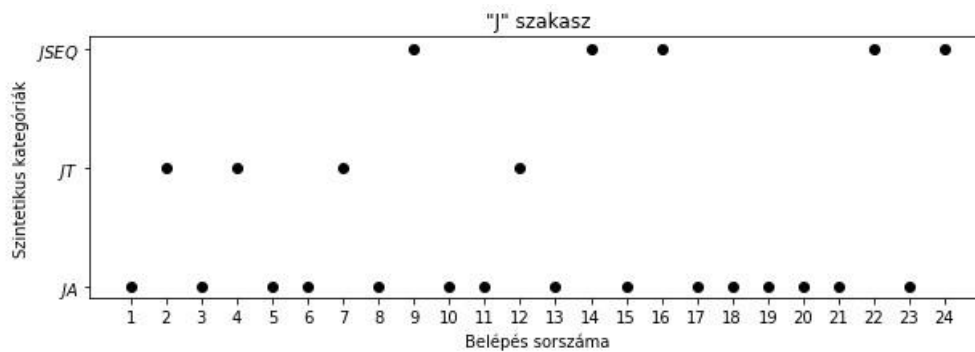


38. ábra. A „J” szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2₁ = felfutás+esés+trilla, 3₁ = esés+trilla+felhő, 3₁₋₆₂ = felhő+kibomló akkord, 3₂ = felhő, 4 = felfutás-trilla-spirál le, 4₁ = spirál le, 4₂ = spirál fel, 5₁ = gesztus+akkord, 5₂ = akkord+gesztus,

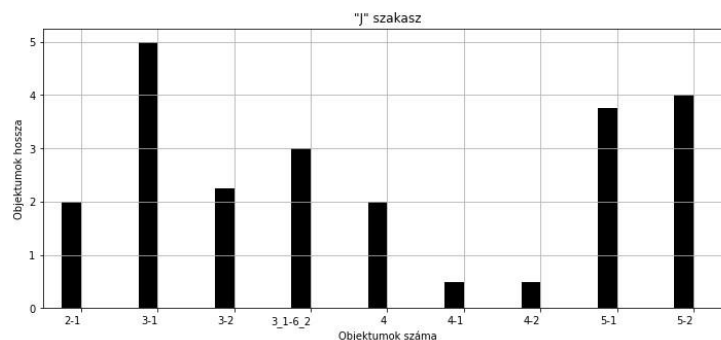
10. kottapélda. J szakasz, 19-23.

Az elektronikus szólam az „a” (arpeggio) kategóriával indul (39. ábra), amelyhez csatlakozik a darabban először megjelenő, „t” (egymásra helyezett trillák) kategória. A két kategória duója később a „seq” (hangfelhő) kategóriával trióra bővül. A szakasz végén egy hosszú, feltűnő glissando vezet át a K szakaszba. A „J” szakaszban a motívumok hossza (40. ábra) kiegyenlített, legnagyobb részük terjedelmes (ellentétben az I szakasszal), csupán a szakasz végén található két 4-es osztályba (felfutás+trilla+spirál le) tartozó példány rövid.

2.4 Az Allégories formai felépítése

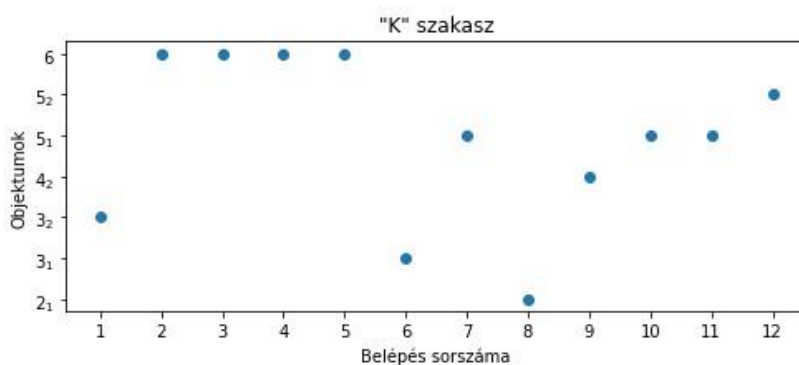


39. ábra. A „J” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma. A = arpeggio, T = egymásra helyezett trillák, SEQ = hangfelhő.



40. ábra. A „J” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve. Az egymás mellett lévő oszlopok az elhangzások számát jelölik.

A „K” szakasz szinte berobban. Szigorú, feszes ritmusa azonnal különbözteti meg a J szakasztól. Elég rövid, tehát átvezetésnek tekinthető. A zenei objektumok közül a rövid gesztusokra eddig is alkalmazott változatokat szerepelteti Murail (41. ábra). A mogorva ostinatokat statikus akkordok ismétlései szakítják meg. A szintetikus kategóriák közül csupán kétfélét, az „sm” (az összetevőit kibontó spektrum) és az „r” (rezonanciapont) típust használja a szerző. Az utóbbi kategória eddig csupán a C szakaszban szerepelt számottevően. A szakasz minden képlete mély hangtartományban van, amely markáns ellentétet képez a következő szakasz magas, csilingelő hangtartományával.



41. ábra. A „K” szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2_1 = felfutás+esés+trilla, 3_1 = esés+trilla+felhő, 3_2 = felhő, 4_2 = spirál fel, 5_1 = gesztus+akkord, 5_2 = akkord+gesztus, 6 = akkord.

2.4.4 A negyedik formai egység

A negyedik formai egység hat szakaszból áll (L-M-N-O-P-Q). Mint a darab struktúrájának ábrájából látható (korábbi 14. formai ábra), az L szakasz a D szakasz párja. Hasonlóan rövid, a hangzását az elektronikus szólamban a „seq” (hangfelhő) illetve a hagyományos szólamokban a glockenspiel szólama határozza meg. A többi hagyományos hangszer egy-egy felfutással, beszúrt hangokkal cizellálja a hangzást. Négy darab 3_2 -es (felhő) motívumból áll a szakasz, ezekből az első kettő két ütemes, a második kettő három ütemes.

Az M szakasz ugyancsak rövid. A formai ábra szerint az E szakasz párja, amit alátámaszt a 3_1 - 6_2 -es motívum kizárólagos használata, valamint a „seq” (hangfelhő) szintetikus kategóriát kiegészítő „sm” (az összetevőit kibontó spektrum) kategória alkalmazása is. Az „sm” kategória már a K-L szakaszokban is megjelent, de az M szakaszban előtérbe kerül. A szintetikus kategóriák tagolják a szakaszt a hagyományos hangszerek tartott hangjai alatt. A hagyományos hangszerek kitarított hangmagasságai úgy bújnak ki a spektrumból, mintha rezonanciapontok volnának. A spektrumok belső tere ebben a szakaszban kitisztul. Az L szakasz tekinthető egyfajta - meglehetősen drámai - rávezetésnek a J-K szakaszok és az M szakasz között, hiszen ha az M szakasz azonnal követné a K szakaszt, akkor a váltás erőszakosnak, kontextusidegennek tűnhetne. Ellenben az L szakasz jelenlétével az M szakasz nyugodt és bensőséges jellege még jobban előtérbe kerül.

Az N szakasz észrevétlenül bomlik ki az M szakaszból, átmenetről itt nem is beszélhetünk. Meg lehet ismerni azonban a szakasz elején található Á-alapú harmónikus spektrumot, amely már pislákol az M szakasz végén is. Az Á alaphang egészen a szakasz

2.4 Az Allégories formai felépítése

közepéig kitart, amelyet először a fuvola, majd a klarinét, végül a kürt szólaltat meg.⁴⁸ A spektrum fokozatosan tolódik el inharmonikus irányba. Murail a 4-es osztályt rendeli ehhez a szakaszhoz,⁴⁹ amely a szakasz közepétől ismerhető fel (42. ábra), ahol a hagyományos szólamok aktívabbak lesznek és apró motívumokat kezdenek el játszani. Itt jelenik meg az elektronikus szólamban az első „n” (fejlődő spektrum, ami gyorsul) szintetikus kategória (43. ábra), amely nagyon is illik a zenei anyaghoz és szép kontrasztot képez a hagyományos hangszerek szólamaival. A szakasz vége felé a zenei anyag egyre harciasabb lesz, akcentusok és hosszú, hangos trillák jelennek meg, majd a fokozás beletorkollik az alapobjektumra legjobban hasonlító zenei objektum megjelenésébe (11. kottapélda).⁵⁰

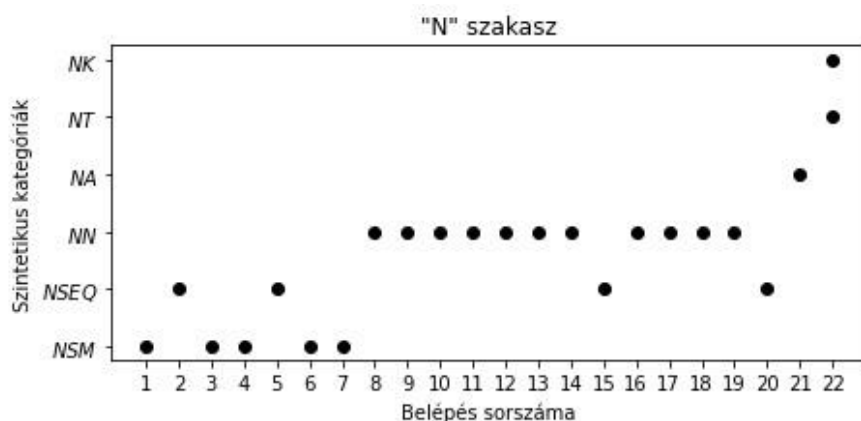


42. ábra. Az N szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 31-62 = felhő+kibomló akkord, 4 = felfutás+trilla+spirál le, 41 = spirál le, 6 = akkord.

⁴⁸ Ez az átalakulás is alátámasztja Murail azon igényét, hogy ne csak az elektronikus szólamot használja hangszínefejlődésre és hangszínátmenetre, hanem a hagyományos hangszereket is (illetve ahol teheti, mind a kettőt egyszerre alkalmazza).

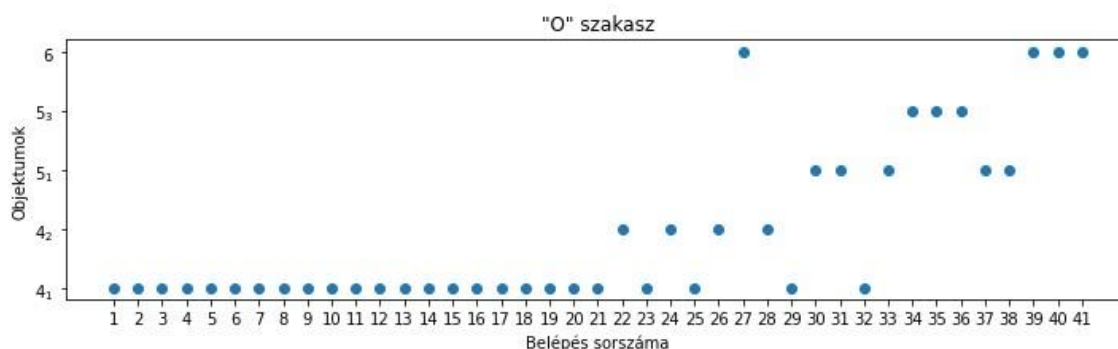
⁴⁹ Murail: *Allégories*, i.m., 185.

⁵⁰ Mivel a szakasz huszonkettedik üteme után van egy subito piano, az indulás világosan elválik az ütemben található trillától. Ezidáig a darabban az alapobjektumra illő formulákat mindig megelőzte egy hosszú, kitartott hang vagy trilla (ami a kettes motívum). Egyedül ezen a ponton találtam egy olyan megjelenést, ahol ez az előzmény leválik és ilyenformán nem tekinthető minden kétséget kizáróan kettes osztályú motívumnak, ellenben nem olyan elszigetelt megjelenés, ami bizonyítaná az alapobjektum felbukkanását. Emiatt ezt a motívumot a kettes osztályba soroltam.



43. ábra. Az N szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.
 SM = az összetevőit kibontó spektrum, SEQ = hangfelhő, N = feljövő spektrum, ami gyorsul,
 A = arpeggio, T = egymásra helyezett trillák, K = perkusszív jellegű hangok.

Az építkezés és fokozás nem volt véletlen, mert az O szakasz hangulata igencsak eltér az L-M-N szakaszoktól. Az O szakasz gyors, forte és szinte kiszámíthatatlan. Murail az itt található motívumokat spiráloknak nevezi és az A szakasz akkordokat lebontó kisimulásaiból eredezteti.⁵¹ Ez a szakasz valóban örvényszerű, a sodrása erős. A spirálok megjelenítésére a 4-es osztályt használja (44. ábra). A felhő („seq” kategória) az elektronikus szólamban jelenik meg, míg a lefutó spirálok (4₁) a hangszeres szólamokban mutatkoznak meg. A kürt szólama jár megint saját úton, elnyújtott hangokat játszik, amelyek egyfajta viszonyítási pontként, a megjelenő hangfürtök alaphangjaként szolgálnak. A zene fokozatosan lecsendesül, az 5-ös (felfutás+akkord), majd 6-os (akkord) motívumok hoznak álló akkordokat. A szakasz végén a mozgás teljesen megáll egy elbűvölő inharmonikus spektrumon. A zenei objektumok hosszúsága fél és egy ütem között váltakozik, csak az utolsó 6-os példány két ütem hosszú.



44. ábra. Az O szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 4₁ = spirál le, 4₂ = spirál fel
 5₁ = gesztus+akkord, 5₃ = esés+akkord, 6 = akkord.

⁵¹ Murail: *Allégories*, i. m., 188.

2.4 Az Allégories formai felépítése

11. kottapélda. N szakasz, 23-25 ütem.

A „P” szakasz elején úgy tűnhet, hogy a darab lecsendesül, és vége lesz. Az első ütem azonban éppen egy olyan kitartott hangzás, amely a darabot is elindította. Ez ugyan akkord, nem egy hangmagasság, viszont a szerepe hasonló. A formai ábrán is jelzi a szerző, hogy van kapcsolat a P és az A szakasz között. Az akkordból fokozatosan kifejlődik egy kettes motívum. Emlékezzünk, hogy az O szakaszt éppen egy hasonló motívum megjelenése vezette fel. A spirál két oldaláról mintha szembe nézne ez a két motívum. A felfutás elindul és rálép egy „k” (perkusszív jellegű hangok) kategóriás szintetikus akkordra. A tartott akkord alatt viszont rögtön indul is egy újabb kettes zenei objektum, Murail tehát egymásra csúsztatja a motívumokat. A cselló elkezd tremolózni, erre pedig egy arpeggiót („a” szintetikus kategória) helyez a szerző. Kialakul egy 4 akkordból álló folyamat⁵², amely előkészíti a Q szakaszt (12. kottapélda).

A Q szakasz egy jól kinyújtott 4₂-es (spirál fel) motívum. Mindazonáltal érdemes megjegyezni, hogy ez a hosszú 4-es motívum sok apró fel- és lefutásból (4₁-es és 4₂-es motívumokból) tevődik össze, ami utal az önzonosságra. Az elektronikus szólamban a „g” (tam-tam típusú spektrum) kategória eddig nem látott sűrűségben hallható. A „g” hangzást

⁵² Vélhetően ez a záró akkordsor is harmonikus torzítással készült.

az „a” (arpeggio) hangzás váltja fel, amely kiegészül a darabot záró „seq” (hangfelhő) kategóriával. A hangszeres szólamok kifejező frázisokat játszanak, egymás után lépnek be a fokozásban. A lassú építkezésű felfutás egyre hangosodik, amely a hallható spektrum mélyéről szóló nagydob tremoloval és 36 Hz-es szinuszhanggal a tetejére ugrik, ahol a hagyományos szólamokban a chimes spektruma és a piccolo négyvonalas C-je (2093 Hz) zárja a felemelkedést, az elektronikus szólam pedig egy felhővel legalább 10 kHz-ig felszökik.⁵³ A szólamok egymás után elrepülnek.



12. kottapélda. A P szakaszt lezáró négy akkord. P szakasz, 6-13 ütem.

2.5 Az *Allégories* káosz szemlélete

Az *Allégories* elemzése után világosan látszik, hogy a darab szerkezete, formai világa, hangszíneinek összetétele nem alkalmaz szigorú értelemben vett fraktálmódellet, nem ír le dinamikus rendszert és nem alapozza a zenei folyamatokat formalizált szerkezetre. Ugyanakkor úgy vélem, bizonyítható, hogy a szerző gondolkodását és kompozíciós módszereit nagyon is inspirálták a káoszelmélet eredményei illetve olyan ötletcsírák, amelyeket egy dinamikus rendszer működésének elképzeléséből fakadó intuitív felismerések tápláltak.

Eszünkbe juthat a darab formai felépítésének megvalósítása. A zenei objektumok, amelyek alakíthatóságuk révén közvetítik a formát, önmagukban létező, önálló entitások, ilyenformán számos értelmezési tartománnyal rendelkeznek, amelyek állandó kölcsönhatásban vannak egymással. Ezek a tartományok az éppen használt spektrum

⁵³ Hallás után tettem a megállapítást, pontos mérést nem végeztem.

2.5 Az Allégories káosz szemlélete

paramétermezőjéről leolvasott adathalmazok. A származási helyük (az objektum maga) tehát ugyanaz, viszont a belső összefüggéseik eltérőek, hiszen minden példány más. A tartományokat tekinthetjük különböző szinteknek, amelyek viszont ránközelítéssel fedik fel egymással összefüggő szerkezetüket. A fraktál is hasonlóan működik, mindazonáltal az ön hasonlóság mértékében jócskán eltér az *Allégories*-ban használt zenei objektumtól.

Ez a különbség többek között abból fakad, hogy Murail számára fontos kitétel egy folyamat zenei valósága, illetve az érzés, ami visszatükröződik a zenei folyamat hatása alatt:

Úgy tűnik számomra, hogy az én hangzó anyagom nem a hangjegy [la note], de mégcsak nem is a zenei hang [son musical], hanem az érzés illetve benyomás (az érzékelt, a hallott és előadott értelmében), amelyet ez a hangjegy vagy ez a hang kelt. A hangzóanyag nem a harmónikus spektrum (nem a tárgy [l'objet]), hanem ennek a spektrumnak az összetétele [harmonicité du spectre] (azaz az érzés, benyomás) és még inkább a benne rejlő változás lehetőségei.⁵⁴

Ebből az következik, hogy zeneszerzőként a saját kompozíciós elképzeléseit fogja előnyben részesíteni egy formalizált modell elvű követésével szemben. Nyitott szemmel néz a felhasználandó hangra, amelyből a darab zeneiségének szükségletei szerint vonja ki az adott konfigurációt:

Szükségessé válik egy globális megközelítés, amely megpróbálja megérteni a hangot a maga teljes komplexitásában, teljes szabadságában, és amely megközelítés megszabja, meghatározza azokat a szervezési szabályokat, amelyeket minden kompozíciós munka megkövetel.⁵⁵

Ehhez hozzátartozik még az is, hogy ellenáll mindenféle axiómának és tudatosan kerüli azokat a helyzeteket, amelyek beszorítják a hangra válaszként érkező érzet által kialakult zenei ötlet felhasználásának lehetőségeit:

Ha tehát valamit elutasítok, az mindenekelőtt az a priori felállított tilalom fogalma vagy az axiómaként felállított (elvi) kompozíciós rendszer fogalma. Ez nem azt jelenti, hogy minden lehetséges lesz, hanem azt, hogy a lehetőségek közötti választásnak pozitív

⁵⁴ Tristan Murail: „Questions de cible”. In: Pierre Michel (szerk.): Tristan Murail: Modèles & artifices. (Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004.) 45-73. 46.

⁵⁵ I. m., 47.

módon kell megtörténnie, a kreatív folyamatok következményeként, nem pedig a cezúra és a kizárás eljárásai révén.⁵⁶

Mindemellett az a szemléletmód, ahogy Murail egy spektrum globális megfigyelésétől halad a részletek kidolgozásáig arra utal, hogy egyrészt elutasítja a sejtekből való építkezést, másrészt magáévá teszi a tudományos elméletek kialakításának mechanizmusát, tudniillik a megfigyelésből, paraméterezésből, majd egy modell felállításából álló folyamatot.

Murail zeneszerzői gyakorlatában a hangszínek vizsgálata és manipulálása jelenti az egyik alappillért. Ha a hangszínt egy komplex rendszernek tekintjük, ahol minden komponens összefügg egymással, akkor a kezdeti irányok, induló pontok változtatása egymástól eltérő végeredményre vezethetnek anélkül, hogy a kiindulásként használt rendszerből ki kellene lépni. Így tehát a hangszín úgy viselkedik, mint egy dinamikus rendszer, ami ugyancsak érzékeny a kezdőfeltételekre. Murail kontinuum gyanánt tekint a hangszíntre és a spektrumok felhasználásánál felismeri, hogy ha bármit is megváltoztat egy paraméteren, az kihathat az egész rendszer működésére:

A spektrális megközelítésben ideális esetben mindennek össze kellene kapcsolódnia, és egy dimenzió vagy nagyságrend [grandeur], egy időtartam, egy gyakoriság (frekvencia), egy textúra-sűrűség stb. bármilyen elmozdulása szükségszerűen kell, hogy módosítsa az általános egyensúlyt.⁵⁷

Murail számára kiemelkedően fontos a hangok közötti esemény (történés), a jelenségek közötti összefüggés, amelyre folyamatként tekint.⁵⁸ A folyamatokat tekinti az *Allégories* fő alkotóelemeinek és a szerzői honlapján leírt ismertetés fontos összefüggésekre világít rá:

Az *Allégories* koncepciója az, hogy a forma kibontakozásában nagymérvű rugalmasságra, mobilitásra törekedjünk. A „folyamat” fogalma (az egyik hangzó állapot fokozatos átmenete egy másikba) így kibővül: minden hangzó esemény processzusnak tekinthető. E folyamatokat addig sűrítjük, mígnem azok egyetlen gesztussá vagy hanggá nem válnak, vagy létrehozhatunk olyan processzusokat, amelyek a folyamatok kibontakozását irányítják. [...] A folyamatok olykor éppen csak

⁵⁶ I.m., 48-49.

⁵⁷ I. m., 52.

⁵⁸ I. m., 50.

2.5 Az Allégories káosz szemlélete

vázlatosak, kivonatoltak, felgyorsítottak, jelképesek, ilyenkor a zene a lappangó vagy rejtett folyamat allegóriájaként működik. Az idő végül nem lineárisan halad: a zenei anyag arra törekszik, hogy örökösen visszatérjen önmagához, mindeközben a folyamatjátékban folytonosan változtatja a formáját. Így aztán a kezdeti megszólalások (jeladások [appels]) tulajdonképpen már teljes egészében magukban foglalják a darabot.⁵⁹

Ha azt várnánk el magunktól, hogy elképzeljünk egy olyan formát, amely folytonosan visszatér önmagához és egy része tartalmazza az egészet, vélhetően a fraktálev jutna eszünkbe először. Ha nem ismernénk behatóan az *Allégories* felépítését és szerkezeti logikáját, ez a kijelentés is elegendő volna bizonyosságot kapni arról, hogy a szerzőt hatása alá vonták a káosz (a fraktálgeometria) tanulmányozása során felbukkanó különös eredmények és azok elemzése.

⁵⁹ <https://www.tristanmurail.com/fr/oeuvre-fiche.php?cotage=28228>. (T. Murail szerzői honlapja). Grabócz Márta fordítása.

III. RÉSZ

3. Lindenmayer-rendszerek a zeneszerzésben

Az algoritmikus zeneszerzéssel foglalkozó könyvek és tanulmányok többsége a dinamikus rendszerek és a fraktálok mellett a Lindenmayer-rendszerek (röviden: L-rendszerek) zenei használatát is a káoszelmélet témakörébe sorolja. Az L-rendszerek támogathatják kompozíciók létrehozását, interaktív szoftverek vezérlését, vagy szintetikus hullámformák előállítását. Ez a fejezet az L-rendszereken alapuló kompozíciós döntések vizsgálatára fókuszál, elsősorban a zenei hozzárendelések gyakorlatán keresztül.¹

A Lindenmayer-rendszerek egy gyűjtőnév, amely számos, egyedi rendszert foglal magában. Az elnevezés a magyar származású, holland botanikus-matematikus Lindenmayer Aristid nevéből származik, aki 1968-ban kifejlesztett egy formális grammatikát az algák fejlődésének reprezentálására.² Ez a matematikai elmélet közel állt az absztrakt automatákhoz és más formális nyelvekhez, ezért rögtön felkeltette a számítógép-tudomány területén dolgozó elméleti szakemberek figyelmét.³ Eredetileg nem volt elég részletes ahhoz, hogy bonyolultabb növények fejlődését is le lehessen írni vele, mert a hangsúly a szomszédos sejtek közötti kapcsolatok megfigyelésén volt.⁴ Pár évvel később azonban lehetővé vált a rendszerek vizuális megjelenítése, ami lendületet adott a grammatika további fejlesztéséhez.⁵

Lindenmayer munkája a többsejtű, élő rendszerekre jellemző emergencia jelenségén valamint a morfogenezis⁶ elméletén alapul.⁷ Az emergencia fogalmát számos tudományos diszciplínában alkalmazzák. Arra utal, hogy interakcióba kerülő egységek kölcsönhatása eredményezhet olyan újszerű tulajdonságokat, amelyek nem vezethetők vissza

¹ Zenei hozzárendelésen azt az eljárást értem, amely során egy algoritmus kimenetét felhasználva tudatos döntések alapján a zenei paramétereket manipulálom.

² Nierhaus, Gerhard: *Algorithmic Composition. Paradigms of Automated Music Generation*. (Wien: Springer-Verlag, 2009.) 137.

³ Prusinkiewicz, Hammel, Hanan, Mech: „L-systems: from the theory to visual models of plants.” In: M. T. Michaelwicz (szerk.): *Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences*. (Clayton: CSIRO Publishing, 1996). 1-32. 2.

⁴ Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A.: *The Algorithmic Beauty Of Plants*. (New York: Springer-Verlag, 1990.) 1.

⁵ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 138.

⁶ Waddington, C. H.: „Towards a Theoretical Biology”. *Nature*. 218 (1968. 05): 525-527. 525. emellett René Thom: *Stabilité structurelle et morphogénèse*. (Paris: InterEditions, 1972).

⁷ Taylor, Charles: „Fleshing Out.” In: Ch. Langton, Ch. Taylor, J. D. Farmer, S. Rasmussen (szerk.): *Artificial Life II*. (Redwood City: Addison-Wesley, 1992). 25-38. 27.

3.1 Az algoritmus kialakulása

egyértelműen az egyes egységekre.⁸ A morfogenezis vagy formaképződés a sejtek, szövetek, szervek, vagy a szervezetek formájának és alakjának kialakulását modellezi.⁹

Lindenmayer figyelmét elsősorban az a tény keltette fel, hogy a sejtek növekedése olyan módon megy végbe, ami teljes egészében nem magyarázható meg a helyi kölcsönhatások megfigyelésével. A kifejlett állapotban lévő növények elágazási struktúrái például igencsak összetett, önhasonló mintázatokat mutatnak, annak ellenére, hogy helyi szinten (egy elágazás pontjában) nem létezik egyértelmű tervrajz egy efféle mintázathoz.¹⁰ Lindenmayer mindemellett azt az alapelvet is szem előtt tartotta, amely szerint az organizmusok növekedése diszkrét időpillanatokban, valamint párhuzamos lépésekben történik.¹¹ A tudós olyan modellt akart kifejleszteni, amely úgy képes a növekedési viselkedést utánozni, hogy nem kell figyelembe vennie a szóban forgó növény fajtát, ilyenformán le tudja írni egy organizmus fejlődését, különös tekintettel az organizmus alakjára.¹²

3.1 Az algoritmus kialakulása

Az L-rendszerek központi eleme az átírás. Az átírás során szabályok segítségével összetett objektumokat definiálhatunk egy kiindulási objektum részeinek cseréjével.¹³ A legismertebb átíró rendszerekben ezek az objektumok karaktersorozatok (más néven sztringek). Az első formális definíciót a sztringeket alkalmazó rendszerekről Axel Thue írta le a XX. század elején, de igazán nagy figyelmet az 50-es évek végén kapott, a Chomsky-féle formális grammatika megjelenésével.¹⁴ Noam Chomsky az átírás koncepcióját többek között arra alkalmazta, hogy leírja a természetes nyelvek elsősorban szintaktikai tulajdonságait azzal a céllal, hogy érvényes nyelvi modelleket hozzon létre.¹⁵ Pár évvel később John Backus, majd Peter Naur bevezettek egy átíráson alapuló jelölési rendszert az ALGOL programozási nyelv nyelvtanának leírására.¹⁶ Az ebből megszülető Backus-Naur forma és a Chomsky-féle nyelvtanok kontextus-független osztályainak hasonlóságát hamar

⁸ David J. Chalmers: „Az emergencia változatai.” *Világosság*. XLIV évfolyam (2003. 3-4): 43-52. 43.

⁹ Molnár István és Horfer, Tim: „A biológiai formák evolúciója”. *Természet Világa*. 126 évfolyam. (1995. I. különszám). 32-41. 35.

¹⁰ DuBois, Roger Luke: *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*. DLA/PhD disszertáció. New York: Columbia University, 2003. (Kézirat). 7.

¹¹ I.m., 8.

¹² Prusinkiewicz, Hammel, Hanan, Mech: *L-systems: from the theory to visual models of plants*. i.m., 3.

¹³ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 1.

¹⁴ Chomsky, Noam: *Syntactic Structures*. (The Hague: Mouton, 1957). 26.

¹⁵ Manousakis, Stelios: *Musical L-Systems*. DLA/PhD disszertáció. The Hague: Sonology, 2006. (Kézirat). 18.

¹⁶ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 1.

felismerték, ezután a szintaxisokkal és nyelvtanokkal való kísérletezés aktív korszaka kezdődött. A célkeresztben karaktorsorozatok halmazai¹⁷ valamint a generálásukra, felismerésükre és átalakításukra használt eljárások álltak.

Lindenmayer ebben a szellemi közegben hozott létre egy új típusú átíró mechanizmust, amelyekből szárbá szökkentek az L-rendszerek. A Chomsky-féle nyelvtan és az L-rendszerek közötti lényeges különbség az átírás során alkalmazott szabályok kivitelezésében áll. Míg az előbbi az átíró szabályokat egymás után, sorosan végzi el (tehát csak bizonyos karaktereket cserél le egy sztringben, a többit változatlanul hagyja), az L-rendszerekben ezeket a szabályokat párhuzamosan érvényesítjük, ilyenformán egy adott sztringben egyszerre cseréljük ki az összes karaktert (tehát egy szabály alkalmazása során az egész karaktorsorozat megváltozik).¹⁸ A különbözőség oka abban keresendő, hogy az L-rendszerek az organizmusokban lezajló sejtosztódást hivatottak modellezni, amely során számos osztódás egyidejűleg következik be.¹⁹

Az L-rendszerek tipológiája tehát inkább hasonlít a karakterlánc-helyettesítéshez, mint az átíráshoz.²⁰ Mindebből az is következik, hogy az L-rendszerek kiválóan alkalmazhatók önazonos struktúrák létrehozására.²¹ Meggyőződésem, hogy ez a tulajdonság az egyik fő oka annak, hogy az algoritmikus zeneszerzéssel foglalkozó alkotók előszeretettel használják zenei leképezésekre az L-rendszereket. Az önazonosság zenei vetületét létrehozni meglehetősen bonyolult feladat, amiben ezek az algoritmusok hatékonyan tudják segíteni a zeneszerzőket.

3.2 Az algoritmus leírása

A Lindenmayer-rendszerek tehát egy karaktorsorozat átírását végrehajtva működnek.²² Konvenció szerint a karaktereket az ABC betűi illetve egyéb ASCII szimbólumok reprezentálják, noha a rendszer bármilyen szimbólummal használható. Nézzük először az L-rendszerek legegyszerűbb osztályát, amelyet determinisztikus, kontextus-független rendszernek, rövidítve DOL-rendszernek neveznek. A kiindulásnál először meg kell határozni a karakterkészletet, ezután egy kezdő karaktert kell megadni, amelyet axiómának vagy csíráállapotnak nevezünk. Ezt legtöbbször ómega jelöli (ω).²³

¹⁷ Ezek a halmazok képezték a formális nyelvek alapjait.

¹⁸ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 3.

¹⁹ I.h.

²⁰ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 9.

²¹ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 138.

²² DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 9.

²³ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 138.

3.2 Az algoritmus leírása

Az axióma megadása után meg kell határozni azokat a szabályokat, amelyek végrehajtják az átírási műveleteket. Ezeket nevezzük produkcióknak illetve átírási szabályoknak, amelyek létrehozzák az axióma szabályszerű metamorfózisait.²⁴ Egy produkció két tagból áll, az elődből és az utódból. Ha egy karakter megegyezik az előddel, akkor a rendszer kicseréli a produkciós szabály által meghatározott utódra. Ha az aktuális karakter és bármely előd nem egyezik meg, akkor a rendszer az elődöt bemásolja a kimeneti sorozat megfelelő helyére. Fontos felhívni a figyelmet arra, hogy a mindenkori sztring összes karakterét a rendszer egyszerre írja át. Miután elkészült az új karaktersorozat, a következő iterációban átveszi az axióma helyét, így az előző folyamat megint lefut egy újabb karaktersorozatot eredményezve.²⁵

Vegyük azt a példát, amelyben az axióma és a produkciós szabályok meghatározása a következő:

$$\begin{aligned}\omega &= B \\ \text{pr1} &= B \rightarrow A \\ \text{pr2} &= A \rightarrow AB\end{aligned}$$

A kiindulási pont tehát B. Az első produkciós szabály szerint a B-t ki kell cserélni A-ra. A második szabály viszont kimondja, hogy az A-t ki kell cserélni AB-re. Az axiómát is tartalmazó első öt iteráció a következő karaktersorozatokat adja ki:²⁶

B
A
AB
ABA
ABAAB
ABAABABA

²⁴ Botzheim Bálint: „Morphogenezis mint stratégia az építészeti formakutatásban”. *Utóirat*. VIII. évfolyam. (2008/4, 45. szám). 46-48. 46.

²⁵ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 10.

²⁶ A DOL rendszerek formális leírását lásd: Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 4.

Ez nem más, mint Lindenmayer eredeti rendszere, amely egy alga növekedését írja le.²⁷ Itt újra felhívom a figyelmet az L-rendszerek fontos tulajdonságára, tudniillik az adott sztring minden karakterére alkalmazni kell a produkciós szabályokat. Ebből az is következik, hogy a kimeneti sorozat minden iteráció kezdetén egy karakter nélküli, üres sor lesz, ellentétben a Chomsky-féle rendszerrel, amelyben a helyén írják át a sorozatot,²⁸ így a produkciós szabályok az alkalmazott sorrend függvényében befolyásolhatják egymást.²⁹

Roger L. DuBois hasznos megállapításokat tesz erről az L-rendszerről, amelyek további szempontokat adhatnak más L-rendszer vizsgálatához is:³⁰

- Ez az L-rendszer determinisztikus, tehát pontosan meg lehet határozni, hogyan fog futni bármely bemeneti sztring használata esetén.
- A most tárgyalt rendszer nem ismeri a kontextust, tehát B-ből minden esetben AB lesz, függetlenül attól, hogy milyen karakterek előzik meg vagy követik B-t.
- A visszacsatolás miatt az eredményül kapott sorozat könnyen válik önhasznóvá. Ez a tulajdonság teszi lehetővé, hogy egyszerű szabályokból komplex fraktálok létrehozására adjunk parancsot.
- Általában a produkciós szabályokban az utód egy szó (egyszerre több karakter), aminek egyenes következménye az eredményül kapott sorozatok állandó növekedése. Ha a szabályok közös karaktereken osztoznak, ez a növekedés exponenciális lesz.
- Azok a rendszerek, amelyekben az előd több karaktert tartalmaz, mint az utód, nem tartoznak a klasszikus L-rendszerek közé. Ezt a megoldást inkább a fizikai dinamikus rendszerek modellezésére használják.

3.3 Teknős interpretátor

Mielőtt a zenei leképzéseket ismertetem, szükségesnek tartom az L-rendszerek vizuális leképzésének népszerű gyakorlatát is bemutatni. Egyrészt az átláthatóságot segítem, másrészt a képi megjelenítés és a zenei leképzés eltérő voltára hívom fel a figyelmet.

²⁷ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 4.

²⁸ Tehát a sztring a helyén marad, egy-egy karaktert úgy írnak át, hogy közben a többi karakter is jelen van és nem változik.

²⁹ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 11.

³⁰ I. m., 12, saját fordítás.

3.3 Teknős interpretátor

Annak érdekében, hogy az L-rendszereket fejlettebb növények alakjának modellezésére használják, szükség volt kifinomult grafikai ábrázolás megalkotására.³¹ A kutatókat az érdekelte, hogyan tudják interpretálni az egyes karakter sorozatokat. Az első megjelenítési kísérleteket Frijters és Lindenmayer végezte el, amelyek során az L-rendszereket alapvetően a törzs és az ágak tipológiájának modellezésére használták. A geometriai feltételeket, mint az ágak hossza és a törzsre bezárt szögek, az utómunka során határozták meg.³² Számos próbálkozás után³³ Przemyslaw Prusinkiewicz a LOGO programozási nyelv teknős-grafika (Turtle Graphics) modulját használva az eddigi legjobb megoldást találta az L-rendszerek grafikai megjelenítésére.³⁴

A teknős-grafika modulját a mesterséges intelligencia egyik úttörője, Seymour Papert fejlesztette ki és implementálta a LOGO nyelvbe.³⁵ A vásznon lévő teknős helyzetét három paraméter határozza meg (x, y, α) , amelyek közül az (x, y) koordináta-párokat jelent, az α pedig az elfordulási szöveget. Prusinkiewicz a LOGO instrukcióit adaptálta az L-rendszer által létrehozott karaktersorozat elemeire.³⁶ Például vegyünk négy karaktert és határozzuk meg a hozzájuk tartozó parancsot:³⁷

F → Haladj előre a lépésmagyság szerint és a teknős előző pozíciójától rajzolj egy egyenes vonalat.

f → Haladj előre a lépésmagyság szerint rajzolás nélkül.

+ → Fordulj balra egy szögnövekmény szerint úgy, hogy a helyeden maradsz.

- → Fordulj jobbra a szögnövekmény szerint úgy, hogy a helyeden maradsz.

Ha megadjuk a lépésmagyságot („d”, általában pixelben meghatározva) és egy szögnövekményt („ δ ”, fokban meghatározva), máris indíthatjuk a teknőst. Tegyük fel, hogy egy négyzetet akarunk rajzolni, 50 pixeles oldalhosszúsággal. Megadjuk a kezdőértékeket ($d = 50, \delta = 90^\circ$), ezután pedig a parancsot (F-F-F-F), amelyben a „+” karakternél balra, a

³¹ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 6.

³² Frijters, D., Lindenmayer, A.: „A model for the growth and flowering of aster novae-angliae on the basis of table <1.0> L-systems. In: Rozenberg, G., Salomaa, A. (szerk.): *Lecture Notes in Computer Science*. (Heidelberg: Springer, 1974). 24-52. 26.

³³ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 6.

³⁴ Prusinkiewicz, Przemyslaw: *Graphical Applications of L-systems*.

<http://algorithmicbotany.org/papers/graphical-applications-of-l-systems.html> (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 04. 04.).

³⁵ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 14.

³⁶ Prusinkiewicz, Przemyslaw: *Graphical Applications of L-systems*, i. m., 5.

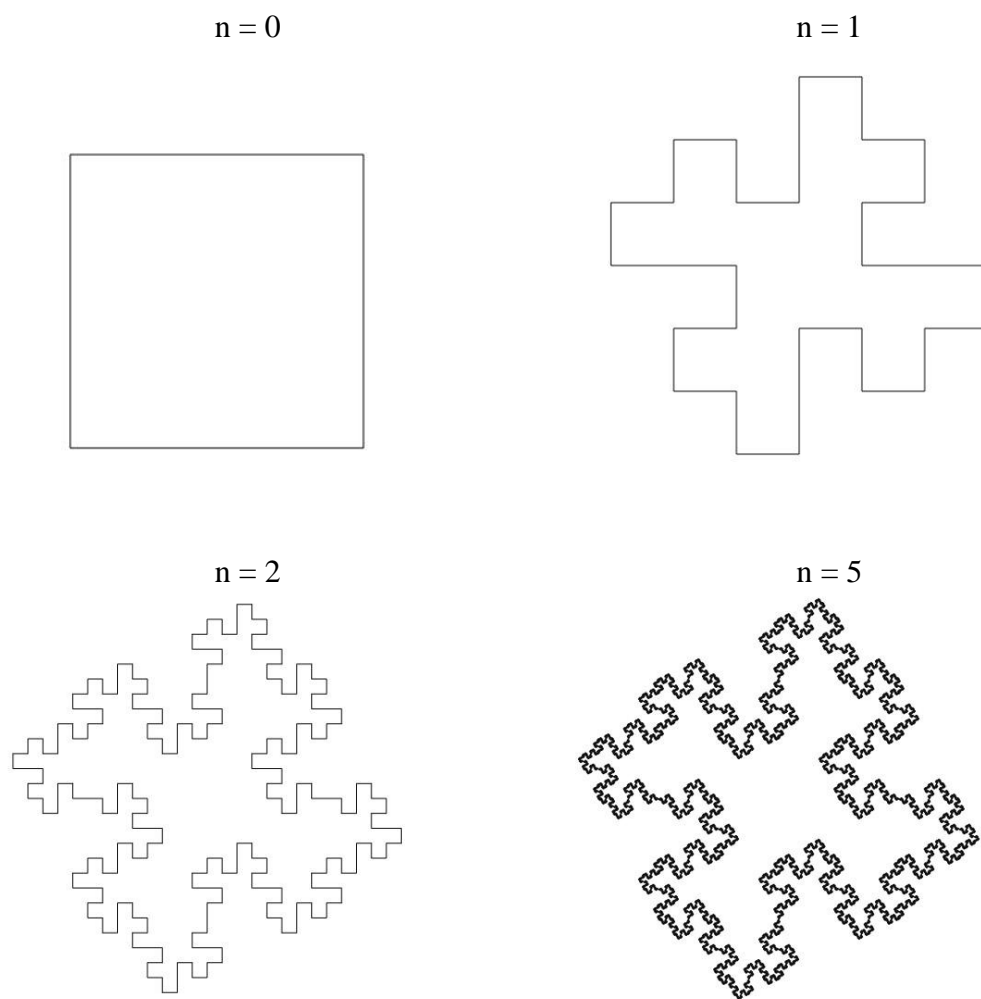
³⁷ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 14.

„-,„ karakternél jobbra fordul a teknős. A teknős grafika használatának előnye, hogy kevés erőforrást igényel és egyszerűen paraméterezhető.³⁸

Most interpretáljuk ezzel az eljárással azt a karaktersorozatot, amelyet az L-rendszerrel készítettünk. Az alábbi látható L-rendszerrel a Koch-görbe kvadratikus típusát (1. ábra) rajzolhatjuk meg.³⁹

$$\omega \rightarrow F-F-F-F$$

$$F \rightarrow F-F+FF-F-F+F$$



1. ábra. A kvadratikus Koch-görbe nulladik, első, második és ötödik iterációja.

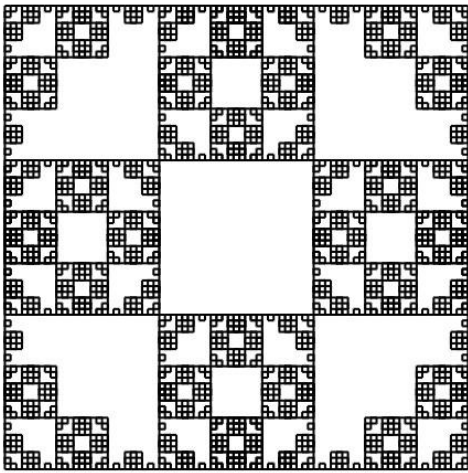
Az 1. ábra a nulladik, az első, a második és az ötödik iterációt mutatja. Mivel az axiómát és a produkciós szabályokat is könnyedén tudjuk változtatni, jól láthatjuk az L-rendszerek alkalmasságát új Koch-görbék generálására (2. ábra-3. ábra-4. ábra-5. ábra).⁴⁰

³⁸ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 15.

³⁹ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 7.

⁴⁰ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 10.

3.3 Teknős interpretátor



$$n = 4, \delta = 90^\circ$$

$$\omega = F-F-F-F$$

$$F \rightarrow FF-F-F-F-F$$

2. ábra. Koch-görbe az $F \rightarrow FF-F-F-F-F$ produkciós szabályt alkalmazva.

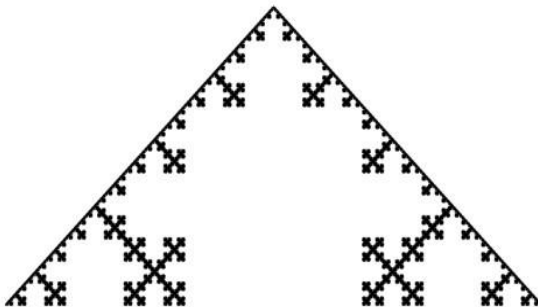


$$n = 4, \delta = 90^\circ$$

$$\omega = F-F-F-F$$

$$F \rightarrow FF-F-F-F-F+F$$

3. ábra. Koch-görbe a $FF-F-F-F-F+F$ produkciós szabályt alkalmazva.

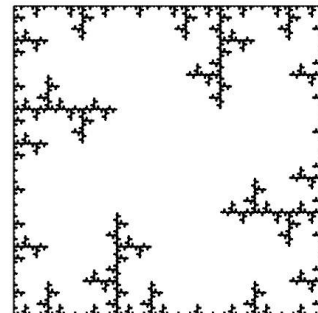


$$n = 6, \delta = 90^\circ$$

$$\omega = -F$$

$$F \rightarrow F+F-F-F+F$$

4. ábra. Koch-görbe az $F+F-F-F+F$ produkciós szabályt alkalmazva.



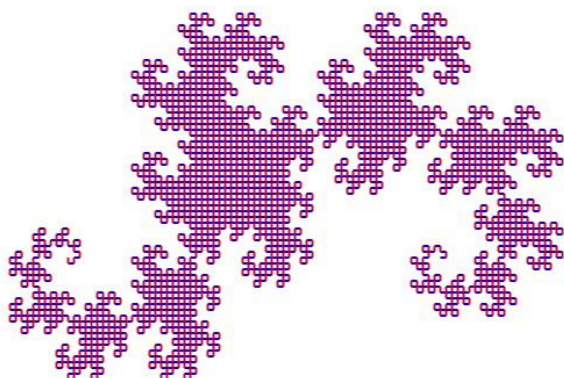
$$n = 5, \delta = 90^\circ$$

$$\omega = F-F-F-F$$

$$F \rightarrow FF-F--F-F$$

5. ábra. Koch-görbe az $FF-F--F-F$ produkciós szabályt alkalmazva.

Az axióma, a szögnövekmény és a szabályok további módosításaival különféle érdekes, szebbnél szebb alakzatokat tudunk rajzolni, mint a Sárkány-görbe (6. ábra), Sierpinski-háromszög (7. ábra) és a Koch-hópehely (8. ábra).



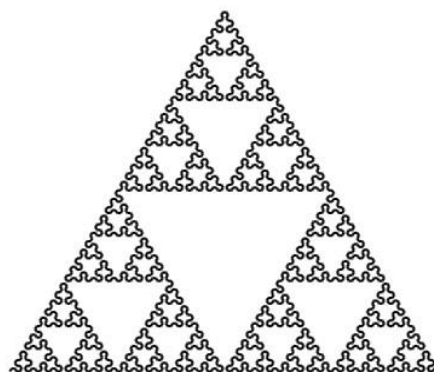
$$n = 12, \delta = 90^\circ$$

$$\omega = F_1$$

$$F_1 \rightarrow F_1 + F_r +$$

$$F_r \rightarrow -F_1 - F_r$$

6. ábra. Sárkány-görbe.



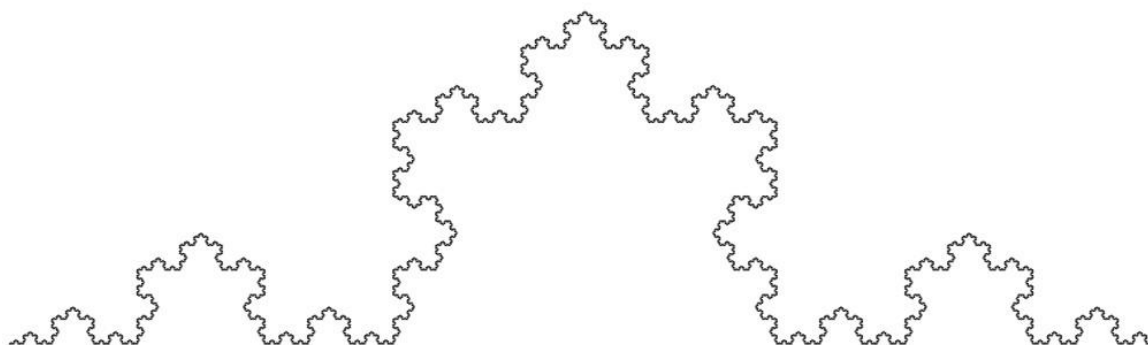
$$n = 7, \delta = 60^\circ$$

$$\omega = F_r$$

$$F_1 \rightarrow F_r + F_1 + F_r$$

$$F_r \rightarrow F_1 - F_r - F_1$$

7. ábra. Sierpinski-háromszög.



$$n = 6, \delta = 60^\circ$$

$$\omega = F$$

$$F \rightarrow F + F - - F + F$$

8. ábra. Koch-hópehely.

3.4 Elágazások

Ahhoz, hogy pontosan modellezni tudjuk egy kifejlett növény alakját, az eddig ismertetett megjelenítési eljáráshoz hozzá kell adni egy olyan koncepciót, amely reprezentálni tudja a törzs és ágak közötti viszonyt.⁴¹ Két további karakterrel („[” és „]”) kell kibővítenünk az alap karakterkészletet, amelyek az ágak kezdő- és végpontját fogják jelezni. Ha egy

⁴¹ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 21.

3.4 Elágazások

ágszerkezetnek vége, a teknős visszaugrik a kezdőpontra, ahol az ág kezdődött és folytatja az alakzat szerkezetének rajzolását.⁴² Nézzük például az „ $F[+F]F[-F]F$ ” szabályból alkotott alakzatot (9. ábra):



9. ábra. Az $F[+F]F[-F]F$ szabály ábrázolása a teknős interpretátorral.

Miután a teknős interpretátor felrajzolta a törzs alsó részét ($d = 80$ pixel), a teknős balra fordul ($\delta = 27.5^\circ$), lerajzol egy 80 pixel hosszúságú vonalat, majd visszaugrik a kiindulópontra. Ezután tovább rajzolja a törzs közepét, majd jobbra fordulva ugyancsak egy ágat rajzol le, végül lerajzolja a törzs harmadik részét. Ezzel a megoldással hatékonyan és egyszerűen tudjuk megjeleníteni az ágak rendszerét (10. ábra – 11. ábra) és, ahogy majd látni fogjuk, ez az eljárás az L-rendszerek zenei interpretációjában is hasznos eszköz.



$n = 3, d = 22, \delta = 20^\circ$

$\omega = F$

$F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$

10. ábra. Az $F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$ szabály ábrázolása.



$n = 4, d = 7, \delta = 22.5^\circ$

$\omega = F$

$FF[-F+F+F][+F-F-F]$

11. ábra. Az $FF[-F+F+F][+F-F-F]$ szabály ábrázolása.

⁴² DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 16.

3.5 Az L-rendszerek típusai

A Lindenmayer rendszereknek különböző típusai léteznek, amelyeket a produkciós szabályok eltérő meghatározásával tudunk megkülönböztetni. Jelen kutatás szempontjából az L-rendszereket két alapvető típus szerint lehet csoportosítani:⁴³

- Kontextusfüggő és kontextusfüggetlen L-rendszerek.
- Determinisztikus és sztochasztikus L-rendszerek.

3.5.1 Kontextusfüggő és kontextusfüggetlen L-rendszerek

Az eddig bemutatott L-rendszerek mindegyike kontextusfüggetlen volt, mert a produkciós szabályokat minden esetben alkalmazni kellett az egyes karakterekre attól függetlenül, hogy az adott karaktert milyen karakterek vették körül.⁴⁴ Ha azonban figyelembe vesszük a kontextust, akkor többek között képesek leszünk a növények részei közötti interakciót jobban modellezni.⁴⁵ Mindemellett a kontextus beépítése egy zenei leképzésbe szintén hasznos, hiszen segíthet a kompozíció kisebb illetve nagyobb részei közötti összefüggéseket megteremteni.

A kontextusfüggő L-rendszereket általában IL-rendszereknek jelölik.⁴⁶ Az IL-rendszerek osztályán belül az 1L jelöli azokat a rendszereket, amelyek egy szomszédos karaktert vesznek figyelembe, illetve 2L reprezentálja azokat a rendszereket, amelyek kettő szomszédos karakter jelenlétének függvényében alkalmazzák a produkciós szabályokat.⁴⁷ Egy egyszerű kontextusfüggő 1L rendszert a következőképpen írhatunk fel:

$$\omega = xaaaa$$

Produkciós szabályok:

$$x < a \rightarrow x$$

$$x \rightarrow a$$

⁴³ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 139.

⁴⁴ Máshogyan fogalmazva mindegy volt, hogy egy adott karakter előtt vagy után milyen karakter áll, így a kontextus teljes egészében ki lett zárva.

⁴⁵ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 30.

⁴⁶ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 140.

⁴⁷ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 30.

3.5 Az L-rendszerek típusai

A produkciós szabályok szerint, ha „a” előtt „x” található, akkor „a”-t át kell írni „x”-re, illetve az „x”-et mindig át kell írni „a”-ra. Amennyiben egyik szabály sem alkalmazható, az interpretátor változatlanul hagyja a karaktert. Ilyenformán „a” akkor és csak akkor változik át „x”-re, ha a kontextus ezt lehetővé teszi. Az iterációk eredménye az lesz, hogy „x” balról jobbra vándorol a karaktersorozatban:

xaaaaa

axaaaa

aaxaaa

aaaxaa

3.5.2 Determinisztikus és sztochasztikus L-rendszerek

Egy determinisztikus L-rendszerben minden karakterhez egy produkciós szabály tartozik.⁴⁸ Ez könnyen vezethet azonos, mesterségesnek tűnő megjelenítési formákhoz.⁴⁹ Ezt a hatást úgy kerülhetjük el, hogy a karakterekhez rendelt produkciós szabályokat egy bizonyos fokú szabadsággal választjuk meg. A produkciós szabályok megválasztásának lehetősége a sztochasztikus L-rendszer ismérve.⁵⁰ A választás szabadságát úgy érhetjük el, hogy valószínűséget rendelünk a produkciós szabályokhoz. Egy karakterhez tehát több produkciós szabály fog tartozni és egy valószínűségi változó alapján rendeli a rendszer az egyik szabályt a karakterhez a generálás során.⁵¹ Egy sztochasztikus L-rendszert a következőképpen írhatunk fel:

$$\omega = X$$

$$d = 1.5, \delta = 33.5$$

Balra tartó ágak valószínűsége (P): 0.3

Produkciós szabályok:

$$X \rightarrow (P) F[+X]F[-X]+X$$

$$(1-P) F[-X]F[-X]+X$$

$$F \rightarrow FF$$

Az „F” karakter az előrehaladást jelenti, a „+” a balra fordulást, a „-” a jobbra fordulást, a „[” és „]” pedig az elágazás kezdetét illetve végét jelöli.

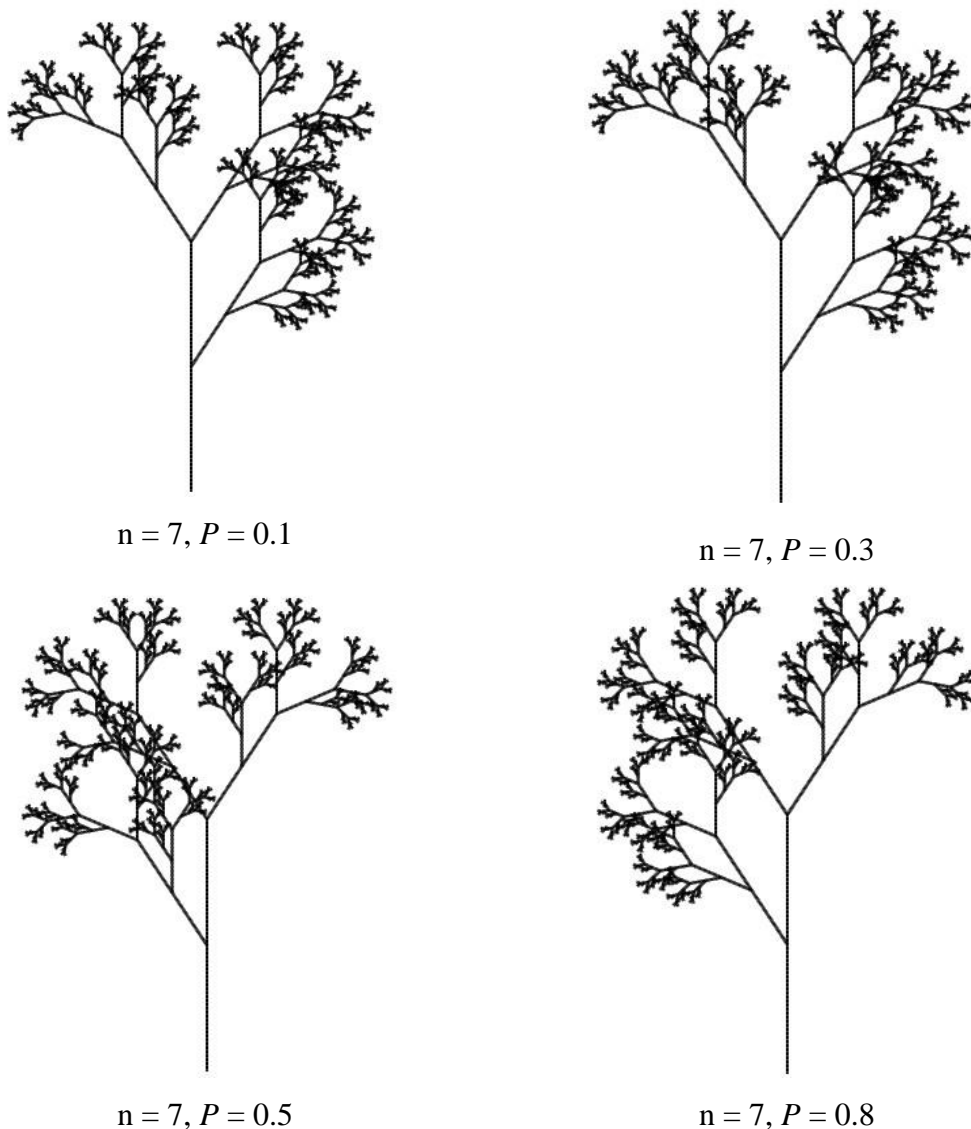
⁴⁸ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 142.

⁴⁹ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 28.

⁵⁰ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 142.

⁵¹ Prusinkiewicz, Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty Of Plants*, i.m., 28.

Ez a rendszer tartalmaz egy új karaktert (X), amely fontos szerepet tölt be a karaktersorozatok fejlődésében,⁵² de a teknős interpretátor nem veszi figyelembe.⁵³ Az X karakterhez tehát két, különböző produkciós szabály tartozik és a P értéke dönti el, hogy ezeket a szabályokat milyen valószínűség szerint használja a rendszer. A 12. ábra négy lehetséges iterációját mutatja a fentebb tárgyalt sztochasztikus L-rendszernek. Meg kell azonban jegyezni, hogy mivel a produkciós szabályokat valószínűségi esemény is befolyásolja, azonos P értékek esetén is kaphatunk eltérő mintázatokat.



12. ábra. A sztochasztikus L-rendszer hetedik iterációinak ábrázolása különböző valószínűségi értékek (P) használatával.

⁵² DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 16.

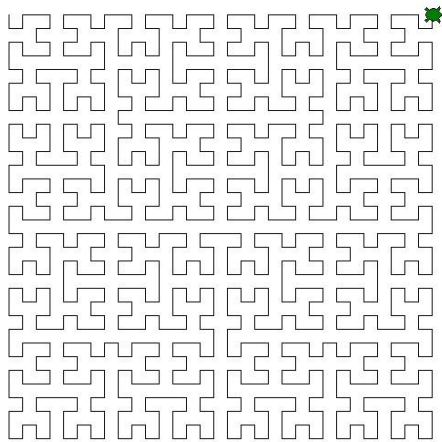
⁵³ Ez a jelenség gyakran előfordul az L-rendszerek tervezésénél, azonban ennek vizsgálata túlmutat a disszertáció keretein.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Megfigyelhetjük, hogy a P értékének növelésével egyre több ág és hajtás jelenik meg a bal oldalon. A sztochasztikus megközelítés meggyőzően imitálja a természetes folyamatokban véletlenszerűen megjelenő eltéréseket, tökéletlenségeket.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Az L-rendszerek első, jelentős és számos zeneszerzőt inspiráló zenei hozzárendelését Przemyslaw Prusinkiewicz készítette el.⁵⁴ Ez a hozzárendelés az L-rendszerek térbeli megjelenítéséből indul ki, felhasználva a teknős-grafika interpretátorának kimeneti értékeit.⁵⁵ Prusinkiewicz azt a Hilbert-görbét használta fel az eljárás bemutatására. David Hilbert német matematikus 1891-ben alkotta meg a nevét viselő, tér-kitöltő fraktál alakzatot⁵⁶, amely az egy évvel korábban, Guiseppe Peano által felfedezett görbe egy változata (13. ábra).⁵⁷



13. ábra. Hilbert-görbe.

Miután a teknős-interpretátor elkészítette a grafikus reprezentációt, Prusinkiewicz az alakzat térbeli dimenzióit zenei paraméterekhez rendelte, amely során az „x” tengelyen létrejött mozgás egy előre meghatározott hanghosszúságot eredményezett,⁵⁸ míg az „y” tengelyen való lépdelés a hangmagasságot változtatta egy adott zenei skála szerint.⁵⁹ Az 1.

⁵⁴ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 148.

⁵⁵ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 18.

⁵⁶ A görbe elkészíthető L-rendszerrel is. Axióma: $A, \delta = 90^\circ$. Hozzárendelési szabályok: 1. $A \rightarrow -BF+AFA+FB-$, 2. $B \rightarrow +AF-BFB-FA+$. $F \rightarrow$ előrehaladás, $+$ \rightarrow balra fordulás, $- \rightarrow$ jobbra fordulás.

⁵⁷ Hayes, Brian: „Crinkly Curves”. <https://www.americanscientist.org/article/crinkly-curves> (Utolsó megtekintés dátuma: 2024. 03. 04.).

⁵⁸ Ha egymás után több elmozdulást volt az x tengelyen, a kiindulásként használt ritmusérték minden elmozdulás után egységnyi hosszúsággal növekedett.

⁵⁹ Prusinkiewicz, Przemyslaw: „Score generation with Lsystems”. In: Gary S. Kendall: *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference* (1986): 455-457. 456.

kottapélda a szerző által közölt eredményt, a Hilbert-görbe egy lehetséges értelmezését mutatja:⁶⁰



1. kottapélda. Prusinkiewicz Hilbert-görbe interpretációja a C-dúr skála hangjait használva.

Prusinkiewicz úttörő elképzelése után további zeneszerzők követték a példáját, elsősorban Gary Nelson⁶¹ és Jon McCormack.⁶² Az L-rendszerek zenei felhasználása szempontjából fontos darabokat írtak, ugyanakkor Prusinkiewicz eredeti elképzelését, tudniillik a teknős interpretátor által adott térbeli koordináták zenei paraméterekhez való csatolását nem hagyták el. Mivel az L-rendszerekből származó karakter sorozatokat nem közvetlenül alkalmazták a zenei paraméterekre, nem kapcsolták ki a térbeli megjelenítéshez kötött szabályokat és hozzárendeléseket, ezzel óhatatlanul torzítva és korlátozva a zenei leképzést.⁶³

Roger Luke Dubois volt az első, aki egy olyan rendszert épített, amely közvetlenül a zenei paraméterekhez csatolta az L-rendszerek karakter sorozatait.

3.6.1.1. Roger Luke Dubois rugalmas hozzárendelési megoldásai

Roger Luke Dubois 2002-ben írt disszertációjában új hozzárendelési elképzeléseket vázolt fel.⁶⁴ Egyrészt leválasztotta a teknős-interpretátort a hozzárendelési láncról, ezzel pedig megszabadította a zenei kimenetet a térbeli asszociáció kényszerétől, ilyenformán a sztringeket mint semleges adatokat teljes mértékben a zenei megvalósítás szolgálatába tudta állítani. Másfelől egy olyan rendszert épített, amely lehetővé tette az interakciót, ezzel pedig élő zenei környezetbe tudta helyezni a hozzárendelési stratégiákat. Ezen kívül beépített egy kottakövető modult a rendszerbe, illetve ennek folyamányaként a kezdeti axiómák halmazát felcserélte az emberi előadó által megadott szimbolikus információkkal.⁶⁵ A zeneszerző/előadó így megadhat egy kottát, improvizációs irányelveket illetve bármilyen

⁶⁰ I.m., 457.

⁶¹ Nelson, Gary Lee: „Real Time Transformation of Musical Material with Fractal Algorithms”. *Computers & Mathematics with Applications*. 32/1 (1996, July): 109-116. 112.

⁶² McCormack, Jon: „Grammar Based Music Composition.” In: R. Stocker (szerk.): *Complex Systems Conference 96: From Local Interactions to Global Phenomena*. (Amsterdam: ISO Press, 1996.) 320-336. 331.

⁶³ S. Manousakis kiváló disszertációja is az L-rendszerekkel foglalkozik, mivel azonban nem kottaalapú megoldásokat vizsgált, így nem kötődik szorosan ehhez a kutatáshoz. További információért lásd: Manousakis, Stelios: *Musical L-Systems*. DLA/PhD disszertáció. The Hague: Sonology, 2006. (Kézirat).

⁶⁴ Nierhaus, *Algorithmic Composition*, i.m., 149.

⁶⁵ DuBois, *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*, i.m., 23.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

szabályrendszert, amelyek aztán az algoritmus értelmezési tartományát adják. Ezekkel a megoldásokkal egy lényegesen rugalmasabb rendszert nyert.

3.6.1.2. Külső és belső hozzárendelés

Az algoritmikus zeneszerzés eszközeit használó zeneszerző legfontosabb döntése a komponálási folyamatban kétség kívül a helyes hozzárendelési stratégia kiválasztása. A számsorozatokat zenei motívumokká, formarészekké, harmóniává alakító módszer van a legnagyobb hatással a megszülető darab szinte teljes zenei, esztétikai mibenlétére. Éppen ezért nagyon fontos tisztázni, hogy egy adott algoritmikus eljárás hogyan adhat zenei szempontból kielégítő eredményt.

Dubois két alapvető hozzárendelési stratégiát különböztet meg, a külső (ergonomikus) és a belső (átkódoló) hozzárendelést.⁶⁶ Az külső hozzárendelés során fizikai eseményeket fordítunk olyan parancsokra, amelyeket a számítógép megért. Ilyen lehet például az a megoldás, amely során bizonyos hangmagasságok megjelenéséhez kötjük egyes események elindítását. Ennek a megoldásnak jelentős hátránya, hogy a fizikai bemenetnek lényegében tökéletesnek kell lennie ahhoz, hogy ne okozzon zavart az algoritmus működésében. Jellemző példa erre a hangmagasságfelismerés kérdése. Ugyan az elmúlt évtizedekben jelentős mértékben fejlődött ez a technológia⁶⁷, minden kétséget kizáró eredményt nem tud nyújtani, főleg akkor, ha nem egyedi hangmagasság, hanem akkordok felismeréséről van szó.

A belső hozzárendelés akkor valósul meg, ha egy ismert szimbólumokkal rendelkező adathalmazt (mint amilyen egy L-rendszer) rendelünk hozzá egy vagy több kimeneti paraméterhez.⁶⁸ Mivel a bejövő adatokat és a kimenő információt egyaránt tudjuk szabályozni, ezzel a megoldással könnyebb előre megjósolható eredményeket elérni. Dubois munkájában elsősorban a belső hozzárendeléssel foglalkozik, azokkal a megoldásokkal, amelyek a Lindenmayer karaktersorozat szimbolikus információit úgy alakítják át zenei szemszögből értékes eredményekre, hogy mindeközben igyekeznek megőrizni a sorozatra jellemző tulajdonságokat és összefüggéseket.

⁶⁶ I. m., 25.

⁶⁷ Elsősorban az adott hangszer összes hangmagasságát tartalmazó buffer-könyvtár és a spektrális elemzést használó algoritmusok adnak megbízható eredményt (FluCoMa eszközök).

⁶⁸ I. m., 26.

3.6.1.3. Események egyértelmű hozzárendelése

Dubois állítása szerint a legkézenfekvőbb módja egy L-rendszer zenei paraméterekhez történő hozzárendelésének, ha a sztring minden egyes karakterét egy diszkrét zenei eseményként kezeljük. Ilyenformán hűen megőrizzük a karaktersorozat egy dimenziós jellegét.

Vegyünk a már bemutatott, egyszerű L-rendszert:

$$\begin{aligned}\omega &= B \\ \text{pr1} &= B \rightarrow A \\ \text{pr2} &= A \rightarrow AB\end{aligned}$$

Ha lefuttatunk nyolc iterációt, a következő karaktersorozatot kapjuk (14. ábra):

ABAABABAABAABABAABABAABABAABAAB

14. ábra. A most tárgyalt, két produkciós szabályt alkalmazó L-rendszer nyolcadik iterációja.

Dubois javaslata szerint legyen az „A” karakter egy tizenhatod hang, a „B” karakter pedig egy tizenhatod szünet.⁶⁹ A hozzárendelés után a következő eredményt kapjuk (2. kottapélda):⁷⁰



2. kottapélda. Az "A" = tizenhatod hang, a "B" = tizenhatod szünet hozzárendelés eredménye.

Dubois a következő megállapításokat teszi:

- A „B” karakter soha nem fordul elő kétszer, ami azt jelenti, hogy a szünet soha nem lesz hosszabb, mint a hozzárendelés során megadott érték.
- Az „A” karakter soha nem fordul elő több mint kétszer egymás után. Az „AA” konfiguráció soha nem jön kétszer egymás után, mivel a „BAB” vagy a „BAAB” konfiguráció ékelődik közbe ilyen esetekben.

⁶⁹ I.m., 29.

⁷⁰ Az egyszerűség kedvéért a metrumot hagyjuk figyelmen kívül.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

- A fentiekből következik, hogy csupán két, egymást követő (nem egymásra halmozott) ritmikus egység jelenik meg a hozzárendelésben (3. kottapélda).



3. kottapélda. A hozzárendelésben megfigyelt, egymást követő ritmikus egységek.

Egy fokkal érdekesebb eredményt kapunk, ha bővítjük a produkciós szabályokat és az ABC-t:

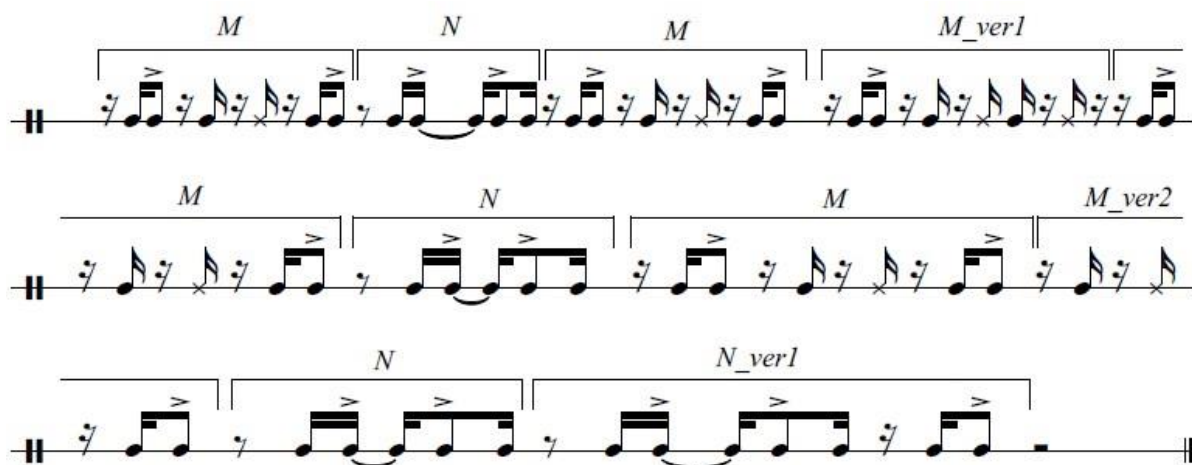
$$\begin{aligned} \omega &= B \\ \text{pr1} &= B \rightarrow BAC \\ \text{pr2} &= A \rightarrow B \\ \text{pr3} &= C \rightarrow ABX \\ \text{pr4} &= X \rightarrow CA \end{aligned}$$

Legyen az „A” karakter egyenlő egy tizenhatod hanggal, a „B” karakter egy tizenhatod szünettel, a „C” karakter egy nyolcad hanggal, amelyen van egy akcentus és az „X” karakter egy olyan tizenhatod hanggal, amelynek „x” hangjegyeje van. A hatodik iterációnál már egy hosszabb sorozatot kapunk (15. ábra):

BACBABXBACBBACCABACBABXBACBACBABXABXBBACBABXBACBBACC
 ABACBABXBACBABXBACBBACCABBACCABACBACBABXBACBBACCABAC
 BABXBACBACBABXABXBBACBABXBACBBACCABACBABXBACBBACCABA
 CBABXBACBACBABXABXBBACBACBABXABXBBACBABX

15. ábra. A most tárgyalt, négy produkciós szabályt alkalmazó L-rendszer hatodik iterációja.

Mivel most már használunk akcentust, illetve kétféle hangszínt (az egyik legyen a hagyományos kottafej, a másik az x alakú), képzeljük el az eredményt egy ütőhangszeren (4. kottapélda):



4. kottapélda. Az "A" = tizenhatod hang, "B" = tizenhatod szünet, "C" = nyolcad hang akcentussal, "X" = tizenhatod hang x hangjegyfejjel hozzárendelés eredménye.

Ez az eredmény két motívumot tartalmaz,⁷¹ ugyanakkor mind a kettő mellé keletkeznek variációk. Egy variáció lehet azonos hosszúságú (M_ver1), csonkított (M_ver2) vagy bővítménnyel rendelkező (N_ver1). Mivel nem változik az akcentus helye illetve a motívumok kiszámíthatóan követik egymást, a szakasz könnyen felismerhető. Érdekes a 15. ábrán megfigyelni, hogy a két M motívum variációja egy-egy „ABA” csokor után található.

Ugyan az eredmény figyelemre méltó és a produkciós szabályok változtatásával egy darab nagyformája szerint ezek az L-rendszerek eltérő eredményeket hozhatnak, a limitált eszköztár és a hozzárendelés visszafogott módja azonban nem mutat túl pár motívikus figura ismétlődésén. Ahhoz, hogy összetett eredményt kapjunk, másik L-rendszer típust, bővített ABC-t és rafináltabb produkciós szabályokat kell alkalmaznunk.

3.6.1.4. Akkordikus hozzárendelés

Ebben a típusú leképzésben Dubois egy L-rendszer mindegyik iterációját elválasztott hanggi eseményként kezeli és akkordokat hoz létre. Az eddig bemutatott hozzárendelésekben egy adott iterációt alkalmazott Dubois. Ebben a hozzárendelésben azonban a megvalósításhoz egy olyan eljárást használ, amely a hanggi események és az L-rendszer egymást követő iterációi közötti interpretációra fókuszál.⁷² A már korábban tárgyalt kontextusfüggő L-

⁷¹ A két motívum „M” és „N”. A teljes sztringben „M”-et jelöli a „BACBABXBAC”, amíg „N”-et jelöli a „BBACCA” sorozat.

⁷² I.m., 34.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

rendszerek kiválóan alkalmasak a feladatra. Vizsgáljuk meg a következő kontextusfüggő L-rendszert:

$$\begin{aligned}\omega &= \text{BAB} \\ \text{pr1} &= \text{A}\langle\text{B}\rangle\text{B} \rightarrow \text{AB} \\ \text{pr2} &= \text{A}\langle\text{A}\rangle\text{B} \rightarrow \text{BA} \\ \text{pr3} &= \text{A}\langle\text{A}\rangle\text{A} \rightarrow \text{B} \\ \text{pr4} &= \text{B}\langle\text{A}\rangle\text{B} \rightarrow \text{AA} \\ \text{pr5} &= \text{B}\langle\text{A}\rangle\text{A} \rightarrow \text{AB}\end{aligned}$$

Az L-rendszer első öt iterációja a következő sorozatokat adja (16. ábra):

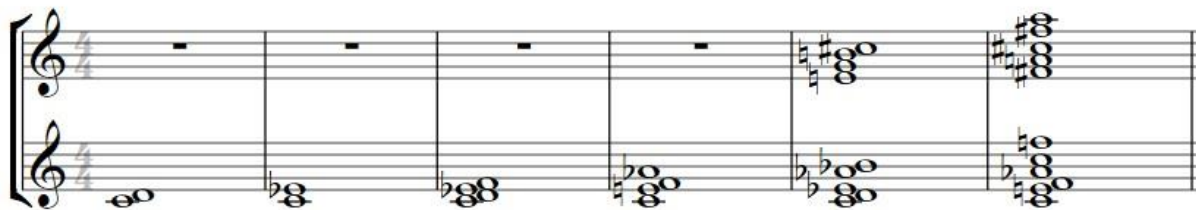
BAB
BAAB
BABBAB
BAAABBAAB
BABBBAABBABBAB
BAAABBBABBAABBAAABBAAB

16. ábra. A most tárgyalt kontextusfüggő L-rendszer első öt iterációja.

A rendszer kiindulópontja a „BAB” axióma. Az „A” karaktert többféleképpen is kicserélheti az interpretátor. Ha az „A” előtt „A” van és utána „B”, akkor a kimenet „BA” lesz, ellenben ha „A” előtt „A” és utána is „A” van, akkor a kimenet „AA” lesz. Ugyanakkor, ha „A” előtt „B” van és utána „A” vagy „B”, akkor a kimenet „AB” lesz. A „B”-re egy szabály vonatkozik, amelynek értelmében ha „B” előtt „A” van és utána „B”, akkor a rendszer az „AB” szimbólumpárt illeszti a „B” helyére. Használjuk most Dubois egyszerű, mégis hatékony hozzárendelését egy kis változtatással.⁷³

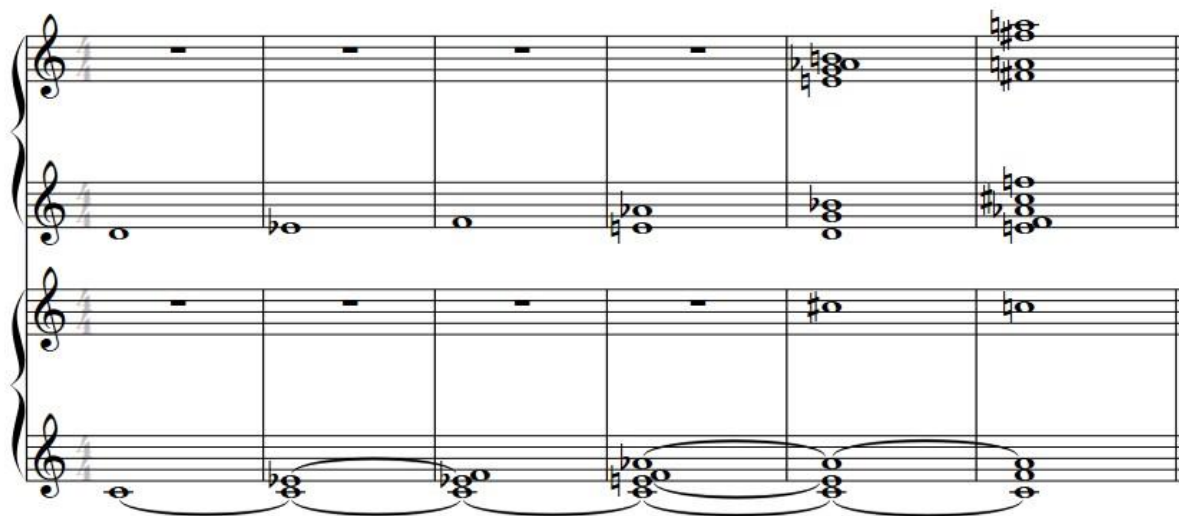
Legyen a kis H hangmagasság a kiindulópont. Minden „B” karakter emelje fel egy kisszekunddal a kurrens hangmagasságot és hozzon létre egy hangot. Az „A” karakter ugyancsak emelje meg a kurrens hangmagasságot egy kis szekunddal, de ne hozzon létre hangot. Az eredményt az 5. kottapélda mutatja.

⁷³ I.m., 35.



5. kottapélda. Az akkordikus hozzárendelés eredménye.

Ha megfigyeljük a sztringet, pár érdekes tulajdonság jelenik meg. Az első kettő karakter mindig „BA”, az utolsó kettő karakter pedig mindig „AB”. Minden iterációban a harmadik karakter helyén váltakozik az „A” és „B”, az axióma és az első iteráció (BAB és BAAB) rendre megjelenik a későbbi iterációkban ráadásul úgy, hogy mindig B karakterek veszik körül, kivéve a széleken. Ha külön vesszük az ismételt hangokat az újonnan megjelenő hangoktól (6. kottapélda), látható f-moll terckvart akkord fokozatos megjelenése.⁷⁴



6. kottapélda. Az akkordikus hozzárendelés eredményében az ismételt és nem ismételt hangok szétválasztása.

3.6.1.5. Paraméteres hozzárendelés

Az akkordikus leképzés kivételével az eddig bemutatott példákban minden karaktert közvetlenül értékeltünk ki. Az előző hozzárendelésben ellenben olyan leképzést hoztunk létre, amelyben a zenei interpretátor az „A” szimbólumot metaadatként értelmezte, azaz

⁷⁴ I.m., 37.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

olyan parancsként, amely a soron következő zenei eseményeket nem kialakítja, hanem befolyásolja. Ezzel az eljárással bizonyos karaktereket nem a zenei eseményekhez kötjük hozzá, hanem különböző, a zenei paraméterekre vonatkozó instrukciót rendelünk mellé. Dubois ezen a helyen kiemeli, hogy egyrészt ezzel az eljárással egy szimbólum valódi jelentése akkor válik világossá, ha figyelembe vesszük a kontextusát. Másrészt egy karakterlánc korábbi karakterei befolyásolják a karakterlánc későbbi karaktereit, tehát egy karaktert a hozzá vezető karakterek együttesen határozzák meg.⁷⁵

Vegyünk egy L-rendszert, amely a következő szabályokat tartalmazza:

$$\omega = F$$

$$\text{pr1} = F \rightarrow K+D$$

$$\text{pr2} = D \rightarrow H\text{-FF}$$

$$\text{pr3} = K \rightarrow +\text{FD-}$$

$$\text{pr4} = H \rightarrow -\text{DF+}$$

Ez egy kontextusfüggetlen, determinisztikus L-rendszer, amelynek az ABC-je az eddig bemutatott példákhoz képest több szimbólummal rendelkezik.⁷⁶ Az első öt iteráció kiértékelése után a következő eredményeket kapjuk (17. ábra):

1. iteráció: K+D
2. iteráció: +FD-+H-FF
3. iteráció: +K+DH-FF-+-DF+-K+DK+D
4. iteráció: ++FD-+H-FF-DF+-K+DK+D-+-H-FFK+D+-+FD-+H-FF+FD-+H-FF
5. iteráció: ++K+DH-FF-+-DF+-K+DK+D-H-FFK+D+-+FD-+H-FF+FD-+H-FF-+-
DF+-K+DK+D+FD-+H-FF+-+K+DH-FF-+-DF+-K+DK+D+K+DH-FF-+-DF+-
K+DK+D

17. ábra. A most tárgyalt kontextusfüggetlen, determinisztikus L-rendszer első öt iterációja.

Dubois nyomán alkalmazzuk a következő hozzárendelést, ezúttal a metaadatokat is használva (18. ábra):

⁷⁵ I.m., 42.

⁷⁶ A szimbólumok a következők: „F”, „D”, „K”, „H”, „+” és „-”.

F → A jelenlegi hangmagasságon és a jelenlegi hanghosszt alkalmazva hozz létre egy hangot.

D → A jelenlegi hangmagasságtól nagy terccel lejjebb és a jelenlegi hanghosszt alkalmazva hozz létre egy hangot.

K → Csökkentesd a jelenlegi hanghosszúságot a felére.

H → Növedd a jelenlegi hanghosszúságot a kétszeresére.

+ → Transzponáld a jelenlegi hangmagasságot egy tiszta kvinttel feljebb.

- → Transzponáld a jelenlegi hangmagasságot egy tiszta kvinttel lejjebb.

18. ábra. Dubois első, metaadatokat is alkalmazó hozzárendelésének változata.

Fontos megemlíteni, hogy ezúttal csak két parancs fog hangot eredményezni (F és D), ezek az aktív parancsok. A többi parancs inaktív, ugyanakkor megváltoztatja a hangmagasságot és a hanghosszúságot. Ezekkel a megoldásokkal bevezetünk egy paramétereken alapuló hozzárendelési eljárást, amely jelentős mértékben kibővíti a lehetőségeket, emellett egy-egy L-rendszer különböző iterációinak jelentősen eltérő végeredményt adhat. A kiinduló hangmagasság egy kétvonalas C, a kiinduló hanghosszúság pedig egy nyolcad ritmusérték. A kiinduló hangmagasságot és a hanghosszúságot elraktározza a rendszer és azokat relatív módon változtatja a hozzárendelési parancsok függvényében. Az öt iteráció realizálását a 7. kottapélda mutatja.

7. kottapélda. Az első, metaadatokat alkalmazó hozzárendelés öt iterációja.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Nyilvánvaló, hogy ha megengedjük a hozzárendelési eljárás parametrikus bővítését, nagyfokú rugalmasságot kapunk, ami elfedheti az alkalmazott Lindenmayer karaktorsorozat eredeti tulajdonságait. Dubois is felhívja erre a figyelmet és ugyan konkrét metódusokat nem fogalmaz meg arra vonatkozóan, hogy milyen biztos formulákkal lehet dolgozni a kompozíciós munka során, néhány támpontot adó ötletre rávilágít.⁷⁷

Dubois két alapvető tulajdonságot nevez meg, amelyeket érdemes megőrizni egy L-rendszerből, tudniillik a növekedést és az önazonosságot.⁷⁸ A két tulajdonság mibenlétét az határozza meg, hogy milyen módon alkalmazzuk a produkciós szabályokat, a használt ABC többé-kevésbé független ettől. Különösen fontos az a tény, hogy az előd aktív, vagy inaktív az interpretátor kontextusában.⁷⁹ Mindezt figyelembe véve készíthetünk egy olyan hozzárendelést, amelyben csak azokhoz a szimbólumokhoz rendelünk aktív parancsot, amelyek a produkciós szabályokban is létrehoznak új sztringet.

Mindennek fényében nézzünk most egy új hozzárendelési szabályzatot (19. ábra):

F → Növeld a jelenlegi hangmagasságot egy nagy szekunddal és hozz létre egy hangot.
D → Csökkentesd a jelenlegi hangmagasságot egy nagy terccel és hozz létre egy hangot.
K → Növeld a jelenlegi hangmagasságot egy tiszta kvarttal és hozz létre egy hangot.
H → Csökkentesd a jelenlegi hangmagasságot egy nagy szexttel és hozz létre egy hangot.
+ → Csökkentesd a jelenlegi hanghosszúságot a felére.
- → Növeld a jelenlegi hanghosszúságot a kétszeresére.

19. ábra. Dubois második, metaadatokat alkalmazó hozzárendelésének egy változata.

Ez a hozzárendelés leegyszerűsíti az előző hozzárendelést, ugyanakkor hatékonyabbá is teszi. Ezúttal a zenei idő csak akkor halad előre, ha egy aktív tag van soron. Most négy aktív tag van („F”, „D”, „K”, „H”), amelyek az előző példához hasonlóan előbb módosítják a hangmagasságot, és csak utána hoznak létre hangot, tehát például a „H” karakter minden esetben relatív módon letranszponálja a kurrens hangmagasságot. Ezt

⁷⁷ I.m., 45.

⁷⁸ Fontos megjegyezni, hogy Dubois célja az, hogy olyan algoritmikus zenét írjon, amely előtérbe helyezi az alkalmazott algoritmus tulajdonságait, illetve felismerhetővé teszi azokat a zenei kontextusban.

⁷⁹ A stochasztikus L-rendszer vizsgálatánál merült fel egy szimbólum aktív illetve inaktív volta. Abban a példában az F karakter aktív, az X karakter inaktív (az inaktív karaktert nem veszi figyelembe az interpretátor). A parametrikus adatot nyújtó szimbólumok („+”, „|” karakterek) szintén nem tartoznak a produkciós szabály törzséhez.

lehetne megfordítva is csinálni, tehát előbb létrehozni a hangot és utána transzponálni. Ebben az esetben viszont a „H” hangmagassága teljes egészében a „H”-t megelőző aktív karaktertől függene.⁸⁰ A 8. kottapélda mutatja az ötödik iterációt az új hozzárendelési stratégiával. A kiindulási hangmagasság a háromvonalas C, a kiindulási hanghosszúság egy teljes 4/4-es ütem. Az artikulációs - és dinamikai jelzések, apró hanghosszúság változtatások valamint a frazeálás utómunka eredménye.

♩ = 105-112

8. kottapélda. A 19. ábrán található hozzárendelés eredménye az ötödik iteráció (17. ábra) után.

Ez a példa már lényegesen muzikálisabb eredmény, mint az előző volt. Ennek egyik oka lehet, hogy ezúttal tudatosabban vannak elrendezve az aktív illetve inaktív parancsok. Másik ok, hogy mindegyik aktív karakterhez egy meghatározott hangmagasság változás társul, ami közvetlenebb kapcsolatot biztosít a karaktersorozattal. A sztringben létrejövő ismétlődő minták a leképzésben azonos motivikus fragmentumokat fognak eredményezni, mint például „HFFK” mindig „le nagyszext-fel kisszekund-fel kisszekund-fel tiszta kvart” fragmentumot hoz létre vagy a „DKD” újra és újra „le nagy terc-fel tiszta kvart-le nagyterc” fragmentumot generál.

⁸⁰ I.m., 47.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Ha a rendszer ABC-je több karaktert tartalmaz, üdvös lehet az egyes karakterek százalékos arányát megvizsgálni (1. táblázat). Ebből például kiderül, hogy a sok nagyszekund lépésért az „F” karakter gyakorisága felelős, illetve a kevés nagyszext ugrást a „H” karakter viszonylag ritka előfordulása okozza. A „+” és a „-” karakterek gyakorisága eredményezi a példa változékony ritmikai képleit.

	Karakterek					
	K	D	H	F	+	-
Előfordulás	10.25%	16.23%	5.98%	17.94%	27.35%	22.22%

1. táblázat. A 17. ábrán látható, ötödik iteráció után létrejött karaktersorozat karaktereinek százalékos előfordulása.

3.6.2. Hozzárendelések további megfontolásai

Egy L-rendszert kiindulópontként használó kompozíció megírásakor felmerülhetnek további megfontolások is. Láthattuk, hogy egy sztring egydimenziós mivoltát kiemelő hozzárendelés hatékonyan közvetíti az adott karaktersorozat jellegét. Ugyanakkor szükségünk lehet olyan eredményekre is, amelyek összefüggéseket, alá-, illetve mellérendeléseket teremtenek a sztring részei között. A már említett elágazások létrehozásának lehetősége sikerrel alkalmazható erre a célra. Az elágazások segítségével egyfajta viszonyrendszert alakíthatunk ki,⁸¹ amelyet szabadon értelmezhetünk bármilyen zenei paraméterek között.

Vegyük például a következő L-rendszert:

$$\omega = F$$
$$\text{pr1} = F \rightarrow F[+F]F[-F]F$$

Látható, hogy csak az „F” karakterhez rendelünk produkciós szabályt, a többi karakter a sztring formáját alakítja.⁸² Ugyanakkor ezek a karakterek nem kevésbé fontosak, hiszen a szögletes zárójel határozza meg az elágazás kezdetét-végét és mélységét,⁸³ a plusz

⁸¹ A korábbi példában ezt a viszonyrendszert egy növény törzse és ágai között határoztuk meg.

⁸² Mivel egy darab produkciós szabály van, ennek a szabálynak a mindenkor „F” karakternél történő beillesztése a sztring önhasonló arculatának kialakításáért lesz felelős.

⁸³ A mélység itt az egyes szintekre vonatkozik, tehát az elágazásokat úgy vesszük, mint különböző szinteket. A „[F]”-ben az „F” az egyes szinten van, a „[[F]]”-ben már a kettős szinten van.

és mínusz karakterek pedig különböző módon tudják befolyásolni az „F” karakter kimenetelét illetve változatos módon lehet általuk az „F”-ek előtti kurrens hangmagasságot és az időeseményt manipulálni. Szüneteket lehet beiktatni, hangmagasság ismétlést, hangmagasság emelkedést vagy csökkenést lehet előírni vagy meghatározott hangmagasság hozzárendelést lehet létrehozni a mélység függvényében.

Vegyük szemügyre a következő hozzárendelést (20. ábra). A leképzést egy Log Drum-ra képzeltem el, ilyenformán a hangmagasságok lejegyzése nemcsak a két konkrét hangmagasságot, hanem a két nyelv összesen négy különböző ütési pontját is jelöli.⁸⁴ A különböző szinteken mások a hozzárendelési parancsok az aktuális hangmagasság és a hanghossz tekintetében (2. táblázat).⁸⁵

[→ Növelj az elágazási szintet.
] → Csökkentesd az elágazási szintet.
F → Ellenőrizd a mindenkori elágazási szintet, alkalmazd a szinthez rendelt hangmagasságot és hanghosszt, majd ezeket használva hozz létre egy hangot.
- → Hozz létre egy szünetet az elágazási szinthez rendelt hanghossz értékében.
+ → Ellenőrizd a mindenkori elágazási szintet, alkalmazd a szinthez rendelt hangmagasságot és hanghosszt, majd ezeket használva hozz létre egy akcentussal megjelölt hangot.

20. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer hozzárendelése.

Szint	Hangmagasság	Hanghossz
1	egyvonalas F	tizenhatod
2	egyvonalas Á	nyolcad
3	kétvonalas C	negyed
4	kétvonalas É	pontozott negyed

2. táblázat. A 20. ábrán látható hozzárendelésben használt szintek hangmagasság- és hanghossz értékei.

⁸⁴ A Log Drum két nyelve rendelkezik egy-egy érzékelhető hangmagassággal, de az ütési pontok a hangszint nagymértékben befolyásolják. Tehát a 7. kottapéldán az „F-A” az egyik nyelv két ütési pontját, a „C-E” a másik nyelv két ütési pontját jelöli.

⁸⁵ Tehát a mindenkori hangmagasságot és hanghosszúságot eltérő mértékben változtatjuk, annak függvényében, hogy éppen hányadik szinten vagyunk.

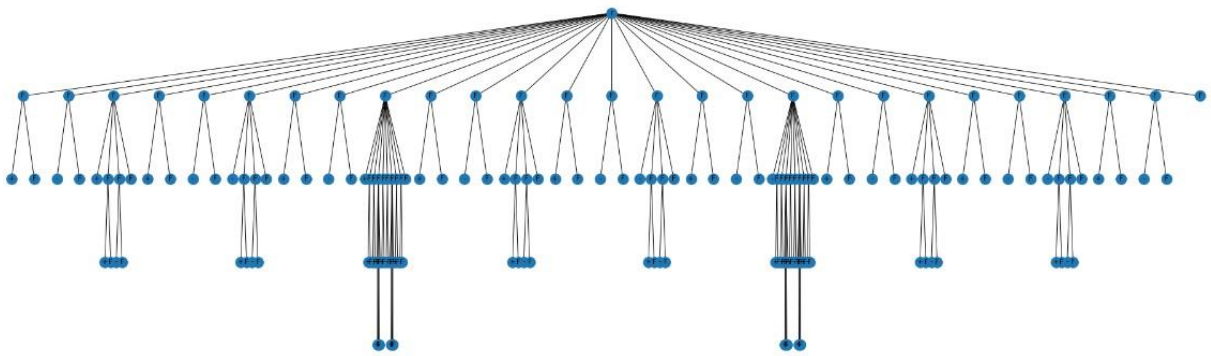
3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

A kiinduló hangmagasság az egyvonalas F, a kiinduló hanghosszúság tizenhatod érték, a metrum végig 4/4. Az alkalmazott L-rendszer második iterációját használtam (21. ábra). Mindazonáltal egy ilyen jellegű karaktersorozatból szinte lehetetlen kiolvasni a szintek növekedését és csökkenését, ugyanakkor ennek a szerkezeti felépítésnek fontos szerepe van. A sztring elágazásainak hatékony megjelenítésére egy faszerkezetben történő elrendezés az általam ismert legjobb megoldás. A 22. ábra nemcsak a szintlépések felépítését fedi fel, hanem megmutatja a karaktersorozat szinte tökéletesen szimmetrikus

F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[+F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F[-F[+F]F[-F]F]F[+F]F[-F]F

jellegét.

21. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer második iterációja.



22. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer faszerkezetben történő elrendezése.

Ha szemrevételezzük a hozzárendelés eredményét (9. kottapélda), láthatjuk, ahogy a dallamvonal követi a 22. ábra által mutatott szintlépéseket, hiszen minden szintlépés alkalmával változik a hangmagasság illetve a hanghossz. Ebben a példában ugyancsak két nagyobb frázist lehet felfedezni,⁸⁶ amelyek az „A-A-A-B-B-B-B-A-A-A-B-B-B-B-A-A-(csonka)A” mintázatot rajzolják ki. Ezek a frázisok hol azonos formában, hol ritmikai-hangmagasságbeli változásokkal jelennek meg, illetve az akcentus helyei is frázisról

⁸⁶ Éppen úgy, ahogy a 4. kottapéldán láthattuk.

frázisra váltakoznak. Emiatt a frázisok metrumhoz való viszonya módosul, ennek eredményeképpen a zenei folyamat kevésbé tűnik mechanikusnak. Mivel az eddigiekkel ellentétben a hozzárendelésben most nem relatív, azaz nem minden helyettesítési pillanatban újra számolt hangmagasságok és hanghosszok szerepelnek, hanem abszolút, azaz minden helyettesítési pillanatban pontosan meghatározott, és az idő haladásával nem változó hangmagasságok és hanghosszok szerepelnek, az eredmény kevésbé absztrakt, mint a 6. kottapéldán látható példa.

The image displays a musical score for a Log Drum, consisting of ten staves of music. The score is written in 4/4 time and features a sequence of phrases labeled 'A' and 'B'. The phrases are distributed as follows: Staff 1 (measures 1-4) contains two 'A' phrases; Staff 2 (measures 5-8) contains one 'A' and one 'B' phrase; Staff 3 (measures 9-12) contains one 'B' phrase; Staff 4 (measures 13-16) contains two 'B' phrases and one 'A' phrase; Staff 5 (measures 17-20) contains one 'A' phrase; Staff 6 (measures 21-24) contains one 'A', one 'B', and one 'B' phrase; Staff 7 (measures 25-28) contains two 'B' phrases; Staff 8 (measures 29-32) contains one 'A' phrase; and Staff 9 (measures 33-36) contains two 'A' phrases. The notation includes various rhythmic values such as eighth and sixteenth notes, rests, and dynamic markings like accents.

915. kottapélda. A 20. ábrán látható hozzárendelés eredménye.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Ez a hozzárendelés determinisztikus. Vannak benne apró változások, de nagyobb léptékben, egy több oldalas darab esetén fennáll a veszélye, hogy az eredmény egyhangúvá válik. Az egységesség részleges kiküszöbölésére érdemes a hozzárendelést sztochasztikussá alakítani. Vegyük szemügyre a következő hozzárendelést (23. ábra):

[→ Növeld az elágazási szintet.
] → Csökkentesd az elágazási szintet.
F → Ellenőrizd a mindenkori elágazási szintet, a szint alapján alkalmazd a hangmagasságot és a valószínűségi számítás függvényében alkalmazd a szinthez rendelt hanghosszt, ezután hozz létre egy hangot.
+ → Hozz létre egy szünetet az elágazási szinthez rendelt hanghossz értékében.
- → Ellenőrizd a mindenkori elágazási szintet, a szint alapján és a valószínűségi számítás függvényében vagy alkalmazd a szinthez rendelt hangmagasságot és hanghosszt és hozz létre egy akcentussal megjelölt hangot, vagy a szinthez rendelt hanghosszúsággal hozz létre egy szünetet.

23. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer második hozzárendelése.

Az előző leképzéshez képest lényeges különbségek vannak (10. kottapélda). Egyrészt az algoritmus az „F” karakterhez rendelt hanghosszúságokat két különböző táblázatból olvassa ki valószínűségi számítás alapján (3. táblázat). Minden „F” karakter megjelenésnél az elágazási szint függvényében 70% az esélye, hogy a táblázat bal oldalán látható hosszúságokat használja, illetve 30% az esélye, hogy a táblázat jobb oldalán látható hanghosszúságokat használja. Másrészt a „-” karakter hozzárendelésénél az elágazási szint függvényében 70 % az esélye, hogy létrehoz egy akcentussal megjelölt hangot, illetve 30% az esélye, hogy szünetet iktat be.

Továbbá a „+” és a „-” karakter szerepe felcserélődött. Az előzőleg bemutatott hozzárendelésben a „-” karakter szünetet hozott létre, amíg a „+” karakter hangot generált. Mivel mind a két karakter 31 alkalommal fordul elő a sztringben, ennek a változtatásnak a következménye variációnak fogható fel.

Szint	Hanghossz 70%	Hanghossz 30 %
1	tizenhatod	pontozott negyed
2	nyolcad	negyed
3	negyed	nyolcad
4	pontozott negyed	tizenhatod

3. táblázat. A 23. ábrán látható hozzárendelésben használt szintek hangmagasság- és hanghossz értékei.

Láthatjuk, hogy a frázisok mintázata nem változott, ugyanakkor megjelenéseikben számottevően nagyobb változatosságot mutatnak. Az eljárást tovább lehet finomítani az elágazás szintjeihez használt táblázatok tartalmának módosításával, további valószínűségeken alapuló lehetőségek beiktatásával. A leképzést más ütős hangszerre elképzelve bővíteni lehet a hangmagassággal jelölt hangszínparaméterek számát.

3.6 Az L-rendszerek hozzárendelési stratégiái

Log Drum

The image shows a musical score for a Log Drum in 4/4 time. The score consists of nine staves, each containing four measures, for a total of 36 measures. The first two measures of each staff are grouped together and labeled with 'A' above a bracket. The next two measures are grouped together and labeled with 'B' above a bracket. This pattern of A and B motifs repeats throughout the piece. The notation includes various rhythmic values such as eighth and sixteenth notes, rests, and accents. The key signature is one flat (B-flat), and the time signature is 4/4.

10. kottapélda. A 23. ábrán látható hozzárendelés eredménye.

3.7. Konklúzió

A Lindenmayer-rendszerek zenei kontextusba való helyezése során több problémába ütközhet a zeneszerző, amennyiben szeretné megőrizni az adott algoritmus által generált eredmény eredeti formáját, alakját és karakterét.

Az egyik ilyen probléma a sztringek alapvetően egydimenziós jellege. Monofonikus szólam írása esetén ez előny, és a metaadatokon alapuló leképzésekkel számos, zeneileg kielégítő megoldást lehet találni. Azonban, ha egy karaktersorozatot polifonikus kontextusba akarunk helyezni, pillanatok alatt szembe találjuk magunkat a sztringek egydimenziós mivoltából adódó korlátokkal. Az elágazások használata megoldást jelenthet, de több hang egyidejű megszólalásához meg kell törni a sztringet és egymás alá vagy fölé kell helyezni a részeit. Ilyenformán viszont a hozzárendelés passzív tagjainak hatását az időben előrébb hozzuk, ezzel óhatatlanul torzítva az eredeti sorozatban jelen lévő összefüggéseket.

Megoldást jelenthet a polifónia részleges megvalósítására a sztringek egyidejű használata, eltérő hozzárendelési szabályokkal, például a karakterekhez rendelt szabályok felcserélésével vagy a különböző súlyozású sztochasztikus szabályok szimultán alkalmazásával.

Egy másik probléma a sztringek hosszának exponenciális növekedése az iterációk során. Ebben a kutatásban ez a jellemző a hangmagasság szervezést akadályozta számottevően. Abszolút hangmagasságok használata során hamar zavaró ismétlések keletkeznek, relatív hangmagasság leképzés során pedig ugyancsak gyorsan kifuthatunk a használható hangmagasság tartományból. A mikrotonális hangolások illetve az oktáv több mint tizenkét részre való felosztása enyhítheti ezt a jelenséget, de a problémát nem oldja meg. Be lehet iktatni az algoritmus leírásába egy olyan szabályt, ami egy bizonyos hangmagasság elérése esetén lenullázza vagy egy előre megadott értékre módosítja a hangmagasság értéknek reprezentálására használt változót. Például, ha a hangmagasság eléri az ötvonalas C-t, a számláló visszaugrik az egyvonalas C-re. Ez a feltétel azonban ugyancsak torzítja az algoritmus eredményét, illetve beépít a zenei folyamatba egy ismétlődő jelenséget.

Ritmikus textúrák generálására illetve hangszínkombinációk létrehozására azonban kompromisszum nélkül használhatók az L-rendszerek nyújtotta eredeti karakterkombinációk. Amennyiben a hangmagasság szervezést kivesszük a hozzárendelési

3.7. Konklúzió

parancsokból, vagy a hangmagasság-jelölést hangszínparaméterek manipulálására használjuk, olyan végeredményt nyerhetünk, amely hűen tükrözi ezeknek a különleges algoritmusoknak az egyedi mintázatait.

Ábrajegyzék

I. RÉSZ

1. ábra. Fraktál	2
2. ábra. Koch-görbe	2
3. ábra. Fehér zaj dallamvonala	3
4. ábra. Brown-zaj dallamvonala.....	4
5. ábra. $1/f$ zaj dallamvonala.....	4
6. ábra. B_m , első nyomvonal.	9
7. ábra. B_m , második nyomvonal.	9
8. ábra. fB_m , Hurst-index=0.5.	9
9. ábra. fB_m , Hurst-index=0.1	9
10. ábra. fB_m , Hurst-index=0.7.	9
11. ábra. fB_m , Hurst-index=0.99.	9
12. ábra. Gesztuscsoportok, gesztusvariációk. J. L. Besada ábrája.	12
13. ábra. A főszakaszok felosztása és a gesztusvariációk hozzárendelése a [5-95] intervallumhoz. J. L. Besada ábrája.....	13
14. ábra. Szűrők sávszélességei az egyes szakaszokban. J. L. Besada ábrája.	15
15. ábra. eltérő szakaszok gesztusai. J. L. Besada ábrája.	15
16. ábra. Négy gesztus ($C = \text{Trillák}$, $D = \text{Artikulált}$) tömörül a 113-115. ütemekben.....	20

II. RÉSZ

1. ábra. Az alapobjektum reprezentációja. T. Murail ábrája.....	29
2. ábra. Az Allégories összes zenei objektuma, kapcsolataik valamint transzformációik..	31
3. ábra. A második alosztály zenei objektuma. T. Murail ábrája.	32
4. ábra. A hármas alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.	33
5. ábra. A négyes alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.	34
6. ábra. Az ötös alosztály zenei objektumának reprezentációja. T. Murail ábrája.	35
7. ábra. Az ötös és hármas zenei objektum fúziója.....	36
9. ábra. A darabot indító hangfürt vivőfrekvenciái. T. Murail ábrája.....	38
10. ábra. Az első vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.....	38
11. ábra. A második vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.	39
12. ábra. A harmadik vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.	39
13. ábra. A negyedik vivőfrekvencia oldalfrekvenciái. T. Murail ábrája.	39
14. ábra. Az Allégories egységei (római számmal) és a szakaszai (latin betűvel).	43

15. ábra. Az A szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2 = felfutás+trilla,.....	44
16. ábra. Az A szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.	44
17. ábra. Az A szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.	45
18. ábra. A zongora spektrum összetevőinek eltérése (piros) az akusztikus spektrumban található összetevőktől (kék).....	47
19. ábra. Az eredeti (akusztikus, kék) spektrum és a torzított (piros) spektrum eltérése....	47
20. ábra. A 19. ábrán látható függvények számokban. Balról jobbra: az akusztikus (eredeti)	48
21. ábra. A „B” szakasz harmóniai szekvenciájában található akkordok kiinduló spektruma . Kontra Bé alapú harmónikus spektrum. T. Murail ábrája.	49
22. ábra. A B szakasz harmóniai szekvenciájában lévő egyik akkord hangjaihoz használt spektrum. T. Murail ábrája.....	49
23. ábra. A B szakasz harmóniai szekvenciájában lévő	49
24. ábra. A B szakaszban felhasznált spektrumok harmadik (narancs) és huszonkilencedik (kék)	50
25. ábra. Az B szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 5 = felfutás+akkord,.....	51
26. ábra. Az B szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.	51
27. ábra. Az B szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.	52
28. ábra. A C szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 42 = spirál fel,	53
29. ábra. A „C” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.	53
30. ábra. A „C” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.	53
31. ábra. A „H” szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2 = felfutás+trilla, 4 ₁ = spirál le, 4 ₂ = spirál fel, 5 ₁ = gesztus+akkord, 5 ₂ = akkord+gesztus, 6 = akkord, 6 ₂ = kibomló akkord.	58
32. ábra. A „H” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.....	58
33. ábra. A „H” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.....	58
34. ábra. Az I szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 2 ₁ = felfutás+esés+trilla, 59	
35. ábra. Az I szakasz 27 ütemtől a szakasz végéig tartó, a „k”(perkusszív jellegű hangok)	60
36. ábra. Az I szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.	61
37. ábra. Az I szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.	61
38. ábra. A „J” szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. 21 = felfutás+esés+trilla, 31 = esés+trilla+felhő, 31-62 = felhő+kibomló akkord, 32 = felhő, 4 = felfutás-trilla-spirál le,	62

39. ábra. A „J” szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.....	63
40. ábra. A „J” szakaszban található zenei objektumok hossza ütemben kifejezve.....	63
41. ábra. A „K” szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. $2_1 = \text{felfutás} + \text{esés} + \text{trilla}$, $3_1 = \text{esés} + \text{trilla} + \text{felhő}$, $3_2 = \text{felhő}$, $4_2 = \text{spirál fel}$, $5_1 = \text{gesztus} + \text{akkord}$, $5_2 =$ $\text{akkord} + \text{gesztus}$,.....	64
42. ábra. Az N szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. $31-62 = \text{felhő} + \text{kibomló}$ akkord , $4 = \text{felfutás} + \text{trilla} + \text{spirál le}$, $41 = \text{spirál le}$, $6 = \text{akkord}$	65
43. ábra. Az N szakaszban szereplő szintetizált hangok elhangzásainak száma.....	66
44. ábra. Az O szakasz zenei objektumainak belépési sorrendje. $4_1 = \text{spirál le}$, $4_2 = \text{spirál}$ fel	66

III. RÉSZ

1. ábra. A kvadratikus Koch-görbe nulladik, első, második és ötödik iterációja.	78
2. ábra. Koch-görbe az $F \rightarrow FF-F-F-F-FF$	79
3. ábra. Koch-görbe a $FF-F-F-F-F-F+F$	79
4. ábra. Koch-görbe az $F+F-F-F+F$	79
5. ábra. Koch-görbe az $FF-F--F-F$	79
6. ábra. Sárkány-görbe.....	80
7. ábra. Sierpinski-háromszög.....	80
8. ábra. Koch-hópehely.	80
9. ábra. Az $F[+F]F[-F]F$ szabály.....	81
10. ábra. Az $F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$	81
11. ábra. Az $FF-[F+F+F][+F-F-F]$	81
12. ábra. A stohasztikus L-rendszer hetedik iterációinak ábrázolása különböző valószínűségi értékek (P) használatával.....	84
13. ábra. Hilbert-görbe.	85
14. ábra. A most tárgyalt, két produkciós szabályt alkalmazó L-rendszer nyolcadik iterációja.	88
15. ábra. A most tárgyalt, négy produkciós szabályt L-rendszer hatodik iterációja.	89
16. ábra. A most tárgyalt kontextusfüggő L-rendszer első öt iterációja.	91
17. ábra. A most tárgyalt kontextusfüggetlen, determinisztikus L-rendszer első öt iterációja.	93
18. ábra. Dubois első, metaadatokat is alkalmazó hozzárendelésének változata.	94
19. ábra. Dubois második, metaadatokat alkalmazó hozzárendelésének egy változata. ...	95
20. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer hozzárendelése.....	98

21. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer második iterációja.....	99
22. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer faszerkezetben történő elrendezése.....	99
23. ábra. A most tárgyalt, elágazásokat használó L-rendszer második hozzárendelése..	101
24. ábra. A 23. ábrán látható hozzárendelés eredménye.	103

Kottapéldák jegyzéke

I. RÉSZ

1. kottapélda. 1-15. ütemek, a darab kezdete.	16
2. kottapélda. A második főszakasz első fele, 25-31. ütemek.....	17
3. kottapélda. Az alapakkord első megszólalása és az odavezető folyamat.	18
4. kottapélda. A negyedik főszakasz közepe, 80-89. ütemek.	19
5. kottapélda. Az ötödik főszakasz első része, 108-111. ütemek.	20
6. kottapélda. 112-115. ütemek.....	20
7. kottapélda. Csipkézett textúra, 140-147 ütemek.	21
8. kottapélda. Az alapakkord megjelenése és átvezetés a fokozásba, 148-155. ütemek.	22
9. kottapélda. Az ötödik főszakasz vége, erőteljes fokozás.	23
10. kottapélda. A harmadik alszakasz közepe és vége, 165-174. ütemek.	24
11. kottapélda. A hatodik főszakasz eleje, 175-183. ütemek.....	24
12. kottapélda. A hetedik főszakasz eleje, 184-193. ütemek.	25
13. kottapélda. A nyolcadik főszakasz közepe, 199-203. ütemek.....	26
14. kottapélda. Kóda.....	26

II. RÉSZ

1. kottapélda. A második alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 1-3 ütem.	32
2. kottapélda. A hármas alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 36-40 ütem.	33
3. kottapélda. A négyes alosztály zenei objektumának egy példája. A szakasz, 8-10 ütem.	34
4. kottapélda. Az ötös alosztály zenei objektumának egy példája. P szakasz, 10-12 ütem.	35
5. kottapélda. Az ötös és hármas zenei objektum fúziójának egy példája. J szakasz, 15 ütem.	36
6. kottapélda. Az A szakaszt lezáró harmóniasor. A szakasz, 48-53 ütem.....	45
7. kottapélda. A „G” szakasz és a „H” szakasz kapcsolódása.	56

8. kottapélda. H szakasz vége, 47-52 ütem.....	57
9. kottapélda. I szakasz, 1-3 ütem.....	59
10. kottapélda. J szakasz, 19-23.....	62
11. kottapélda. N szakasz, 23-25 ütem.	67
12. kottapélda. A P szakaszt lezáró négy akkord. P szakasz, 6-13 ütem.....	68

III. RÉSZ

1. kottapélda. Prusinkiewicz Hilbert-görbe interpretációja a C-dúr skála hangjait használva.....	86
2. kottapélda. Az "A" = tizenhatod hang, a "B" = tizenhatod szünet hozzárendelés eredménye.....	88
3. kottapélda. A hozzárendelésben megfigyeltegy mást követő ritmikus egységek.	89
4. kottapélda. Az "A" = tizenhatod hang, "B" = tizenhatod szünet, "C" = nyolcad hang akcentussal, "X" = tizenhatod hang x hangjeggyfejjel hozzárendelés eredménye.....	90
5. kottapélda. Az akkordikus hozzárendelés eredménye.....	92
6. kottapélda. Az akkordikus hozzárendelés eredményében az ismételt és nem ismételt hangok szétválasztása.....	92
7. kottapélda. Az első, metaadatokat alkalmazó hozzárendelés öt iterációja.	94
8. kottapélda. A 19. ábrán található hozzárendelés eredménye az ötödik iteráció (17. ábra) után.	96
9. kottapélda. A 20. ábrán látható hozzárendelés eredménye.....	100

Bibliográfia

- Anderson, John D.: „Varèse and the Lyricism of the New Physics.” *The Musical Quarterly*. 75/1. (1991/1): 31-49.
- Besada, José L.: *Metamodels in Compositional Practices*. Paris: Édition Delatour/IRCAM, 2017.
- Botzheim Bálint: „Morphogenezis mint stratégia az építészeti formakutatásban”. *Utóirat*. VIII. évfolyam. (2008/4, 45. szám). 46-48.
- Chalmers, David J.: „Az emergencia változatai.” *Világosság*. XLIV évfolyam (2003. 3-4): 43-52.
- Chomsky, Noam: *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton, 1957.
- Dodge, Charles and Bahn, Curtis R.: „Musical Fractals.” *Byte*. 11/6, (1986/6): 185-199.
- Dr. Borsa Béla: „A fraktálok”. *Élet és Tudomány*. 48/6 (1993/5): 163-166.
- Dr. Mukli Péter: *Spontán agyi hemodinamikai fluktuációk komplexitásának multifraktális elemzése*. PhD disszertáció. Budapest: Semmelweis Egyetem. 2019. (Kézirat).
- Dr. Sas Elemér: „Nyáron minden nagyobb”. *Élet és Tudomány*. 45/19. (1990/15): 598.
- DuBois, Roger Luke: *Applications of Generative String-Substitution Systems in Computer Music*. DLA/PhD disszertáció. New York: Columbia University, 2003. (Kézirat).
- Farkas Zoltán: „Spekuláció nélkül nincs intuíció – „Jób Könyvé”-től a fraktálokig. Jeney Zoltánnal beszélget a „Halotti szertartás”-ról Farkas Zoltán.” *Holmi*, 18/7 (2006. 07): 869 – 902. 872.
- Fokasz Nikosz: „Nemlineáris idősorok – a tőzsde káosza?” *Magyar Tudomány*. 109/10. (2002/10): 1312-1329.
- Frijters, Dinnus, Lindenmayer, Aristid: „A model for the growth and flowering of aster novae-angliae on the basis of table <1.0> L-systems. In: Rozenberg, G., Salomaa, A. (szerk.): *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 1974. 24-52.
- Grisey, Gérald: „Did You Say Spectral?” *Contemporary Musical Review*. 19/3. 2000/3: 1-3.
- Hayes, Brian: „Crinkly Curves”. <https://www.americanscientist.org/article/crinkly-curves> (Utolsó megtekintés dátuma: 2024. 03. 04.).
- Hsü, Kenneth and Hsü, Andrew: „Self Similarity of the 1/f Noise Called Music.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 88/8. 1991/8: 3507-3509.
<https://www.tristanmurail.com/fr/oeuvre-fiche.php?cotage=28228>. (T. Murail szerzői honlapja).

- Karlin, Samuel és Taylor, M. Howard: *Sztochasztikus folyamatok*. Ford.: Michaletzky György. Budapest: Gondolat kiadó, 1985. 335.
- Kovács D. Lehel István, Sergyán Szabolcs, Nyékyné Gaizler Judit: „Objektumorientált programozás.” In: Nyékyné Gaizler Judit (szerk.): *Programozási nyelvek*. Budapest: Kiskapu Kft., 2003. 391-459.
- Lévy, Paul: *Processus stochastiques et Mouvement Brownien*. Paris: Éditions Jacques Gabay, 1965.
- Ligeti György: „A számítógépek alkalmazásáról a zeneszerzésben.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010. 259-261.
- : „Études pour piano – Premier livre.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010. 430-433.
- : „Zongoraverseny.” In: Kerékfy Márton (szerk.): *Ligeti György válogatott írásai*. Budapest: Rózsavölgyi és Társa, 2010. 435-439.
- Mandelbrot, Benoit, Van Ness, John W.: „Fractionals Brownian Motions, Fractional Noises and Applications”. *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*. 10/4. (1986/4): 422-437.
- Mandelbrot, Benoit B.: *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Paris: Flammarion, 1975.
- Manousakis, Stelios: *Musical L-Systems*. DLA/PhD disszertáció. The Hague: Sonology, 2006. (Kézirat).
- McCormack, Jon: „Grammar Based Music Composition.” In: R. Stocker (szerk.): *Complex Systems Conference 96: From Local Interactions to Global Phenomena*. Amsterdam: ISO Press, 1996. 320-336.
- McLean, Alex, Dean. Roger: *The Oxford Handbook of Algorithmic Music*. (New York: Oxford University Press, 2018).
- Mende Jenő: „A Brown-féle mozgás.” *Uránia*. 17/5. (1916/5): 160-165.
- Miller Puckette: *The Theory and Technique of Electronic Music*. Singapore: World Scientific Printers, 2007. 267.
- Miranda, Eduardo: *Computer Sound Design*. Oxford: Focal Press, 1998.
- Molnár István és Horfer, Tim: „A biológiai formák evolúciója.” *Természet Világa*. 126 évfolyam. (1995. I. különszám). 32-41.
- Murail, Tristan: „Désintégration pour ensemble et bande magnétique: la section I”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004. 127-154.

- : „Allégories”. In: Pierre Michel (szerk.): Tristan Murail: Modèles & artifices. Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004. 172-197.
- : „Gondwana, pour orchestre (1980)”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004. 119-127.
- : „L’objet musical”. In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & artifices*. Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004. 169-172.
- : „Questions de Cible.” In: Pierre Michel (szerk.): *Tristan Murail: Modèles & Artifices*. Strasbourg: Presses Universitaires de Strasbourg, 2004. 45-73.
- Nelson, Gary Lee: „Real Time Transformation of Musical Material with Fractal Algorithms”. *Computers & Mathematics with Applications*. 32/1 (1996. July): 109-116.
- Nierhaus, Gerhard: *Algorithmic Composition. Paradigms of Automated Music Generation*. Wien: Springer-Verlag, 2009. 137.
- Oláh-Gál Róbert: „Fraktálok”. *Korunk*. 47/8. (1988/8): 607-609.
- Posadas, Alberto: *Liturgia fractal. Cycle of five string quartets*. Vienna: Kairos, 2009. 0012932 KAI.
- Prusinkiewicz Przemyslaw, Hammel, Mark, Hanan, Jim, Mech, Radomir: „L-systems: from the theory to visual models of plants.” In: Michaelwicz M. T. (szerk.): *Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences*. Clayton: CSIRO Publishing, 1996. 1-32.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw, Lindenmayer, Aristid: *The Algorithmic Beauty Of Plants*. New York: Springer-Verlag, 1990.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw: „Score generation with Lsystems”. In: Gary S. Kendall: *Proceedings of the 1986 International Computer Music Conference* (1986): 455-457.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw: *Graphical Applications of L-systems*. <http://algorithmicbotany.org/papers/graphical-applications-of-l-systems.html> (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 04. 04.).
- Sadar, Ziauddin, Abrams, Iwona: *Introducing Chaos: A Graphic Guide*. Cambridge :Icon Books Ltd., 2008.
- Schuller, Gunther: „Conversation with Varèse”. *Perspective of New Music*. 3/2. (1965. 3): 32-37.
- Szabados László: „Glosszárium.” *Magyar Tudomány*, 100/4 (1993. 04): 524-526.
- Szalay Mihály: *Számelmélet*. Budapest: Typotex, 3 kiadás. 2009.

Székely J. Gábor: „Tört dimenziók a mikro- és makrovilágban”. *Delta*. 13/8. (1979. 8): 27-29.

Szigetvári Andrea: *A multidimenzionális hangszíntér vizsgálata*. DLA/PhD disszertáció. Budapest: Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem, 2012. (Kézirat).

Taylor, Charles: „Fleshing Out.” In: Langton, Ch., Taylor, Ch., Farmer, J. D., Rasmussen, S. (szerk.): *Artificial Life II*. Redwood City: Addison-Wesley, 1992. 25-38.

Tél Tamás: „A káosz természetrajza.” *Természet világa*. 129/9 (1998. 9): 386-388.

Tél Tamás: „Törtdimenziós rendszerek: a fraktálok.” *Természet világa*. 115/3 (1984. 3): 106-109.

Thom, René: *Stabilité structuruelle et morphogénèse*. Paris: InterEditions, 1972.

Voss, Richard F. and Clarke, John: „1/f Noise in Music and Speech.” *Nature*. 5533/258. (1975/258): 317-329.

Waddington, Conrad Hal: „Towards a Theoretical Biology”. *Nature*. 218 (1968. 05): 525-527.

Young, Robert W.: „Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings”. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 24/3 (1952. 05): 267-273.