
ARHITECTURĂ METABOLICĂ

Structuri care cresc, se degradează și se regenerează

METABOLIC ARCHITECTURE

Structures that Grow, Decay and Regenerate

Stephany-Emma TRIF

steph.govier@gmail.com

Universitatea de Arhitectură și Urbanism „Ion Mincu”, București, RO
“Ion Mincu” University of Architecture and Urban Planning Bucharest, RO

Rezumat

Arhitectura metabolică definește sistemele construite ca entități dinamice capabile de creștere, degradare și regenerare, fiind capabile să se adapteze prin aceste mijloace la schimbările constante ale climatului. Acest articol investighează principiile designului și arhitecturii metabolice prin prisma unor prototipuri speculative: o rețea de intervenții arhitecturale create sub forma unei infrastructuri globale ce monitorizează schimbări ecologice și climatice. Prin analiza și adaptarea la dinamica unor regiuni geografice unice, aceste structuri se transformă și reacționează la schimbările din jur, contribuind în același timp la monitorizarea ecologică globală.

Acest articol analizează conceptele de arhitectură adaptivă, bazate pe teoriile lui Reyner Banham, un critic englez elogiât, Janine Benyus, biolog care a popularizat

Abstract

Metabolic architecture defines built systems as dynamic entities capable of growth, degradation and regeneration, being able to adapt through these means to climate's constant changes. This article investigates the principles of metabolic design and architecture through the lens of speculative prototypes: a network of architectural interventions created as a global infrastructure that monitors ecological and climate changes. By analysing and adapting to the dynamics of unique geographical regions, these structures transform and react to the changes of their surroundings while contributing to ecological global monitorization.

This article analyses concepts of adaptive architecture, based on the theories of Reyner Banham, an acclaimed English critic, Janine Benyus, a biologist who popularized

biomimetismul, Neri Oxman, cercetătoare recunoscută pentru integrarea biologiei, a materialelor avansate și a tehnologiilor digitale în arhitectură, Kisho Kurokawa, arhitect japonez și fondator al mișcării metabolismului, și alții. Completând prototipurile speculative propuse, exemple precum *Nakagin Capsule Tower* și *Eden Project* demonstrează integrarea principiilor metabolice în scenarii din viața reală. În mod speculativ, cercetarea se asociază cu viziunile grupului Archigram, unde proiecte precum *Walking City* sau *Plug-In City* explorează continuitatea dintre arhitectura experimentală și noi direcții sustenabile.

Prototipurile arhitecturale examinate în această lucrare reprezintă un proiect personal, dezvoltat pe perioada Masterului în Arhitectură urmat la Bartlett School of Architecture, University College London. În urma dorinței mele de a dezvolta și aprofunda această cercetare, acest articol își propune să integreze sistemul creat în tema arhitecturii metabolice, explorând aplicabilitatea acestuia și poziționându-l în domeniul cercetării științifice arhitecturale. Funcționând ca noduri într-o rețea globală, fiecare prototip se adaptează la condițiile specifice habitatului său, punând accent pe interconectivitate și efemeritate. Randărilor asociate contextualizează aceste intervenții, ilustrând relația dintre arhitectură și contextul acesteia de-a lungul timpului.

Folosind analize comparative și exploratorii, această lucrare explorează arhitectura metabolică ca un sistem de interacțiune scalabil în care prototipurile funcționează ca agenți activi ai transformării mediului. Această rețea arhitecturală, care monitorizează și contribuie la regenerarea ecologică, funcționează cu o logică similară cu cea a rețelelor biologice interconectate.

Cuvinte-cheie: metabolism, adaptabilitate, regenerare, reziliență, rețele.

biomimicry, Neri Oxman, a researcher known for integrating biology, advanced materials and digital technologies in architecture, Kisho Kurokawa, a Japanese architect and founder of the Metabolism movement, and others. Complementing the proposed speculative prototypes, examples such as the *Nakagin Capsule Tower* and the *Eden Project* demonstrate the integration of metabolic principles in real-life scenarios. Speculatively, the research relates to the visions of the Archigram group, where projects such as *Walking City* or *Plug-In City* explore the continuity between experimental architecture and new sustainable directions.

The architectural prototypes studied in this work represent a personal project, developed during my Master in Architecture at the Bartlett School of Architecture, University College London. Following a personal desire to develop and deepen this research, this article aims to integrate this system into the theme of metabolic architecture, exploring its applicability and positioning it within the field of architectural scientific research. Functioning as nodes in a global network, each prototype adapts to the specific conditions of its environment, emphasizing interconnectivity and ephemerality. Associated renderings contextualize these interventions, illustrating the relationship between architecture and its context over time.

Using comparative and exploratory analysis, this paper investigates metabolic architecture as a multi-scale system of interaction in which prototypes function as active agents of environmental transformation. This architectural network, which monitors and contributes to ecological regeneration, operates with a logic similar to that of interconnected biological networks.

Keywords: metabolism, adaptation, regeneration, resilience, networks.

Introducere. Arhitectura ca sistem viu

Arhitectura metabolică reprezintă un model conceptual în care construcțiile nu sunt entități statice, ci dinamice, capabile de creștere, degradare și regenerare, un concept care compară clădirile și orașele cu procesele energetice ale tuturor vietăților (Kurokawa, 1977). Această abordare este influențată și de biomimetism, un domeniu popularizat de Janine Benyus (1997), care explorează modalitățile prin care procesele naturale pot inspira inovație în diverse științe și în tehnologie. În domeniul arhitecturii, astfel de idei au fost discutate și cercetate de oameni precum Michael Pawlyn (2016) și Neri Oxman (citată în Antonelli & Burckhardt, 2020), care au studiat integrarea materialelor și proceselor biologice în designul sustenabil. Această lucrare analizează astfel modurile prin care arhitectura își poate transcende rolul tradițional și poate deveni un agent activ în procesele schimbărilor ecologice. În acest context, articolul propune o rețea de prototipuri arhitecturale speculative, create ca infrastructuri care monitorizează și se adaptează la schimbările ecologice globale. Spre deosebire de alte abordări ale arhitecturii durabile care se concentrează pe eficiența energetică sau pe reducerea amprentei de carbon, acest model explorează posibilitatea structurilor arhitecturale de a interacționa cu schimbările de mediu, influențând ecosistemele prin adaptabilitate, monitorizare, stocare de date și co-evoluție cu mediul înconjurător. Acest concept se regăsește în principiile formulate în cadrul mișcării Metabolice, care a promovat o arhitectură modulară flexibilă și capabilă de schimbare, reflectând astfel diverse procese de creștere care pot fi recunoscute și în natură (Kurokawa, 1977). Cercetarea propusă se bazează pe literatura de specialitate și pe analiza unor proiecte arhitecturale care reflectă principiile arhitecturii adaptive. Printre altele, cercetarea include lucrări ale lui Reyner Banham (1969), care a redefinit relația dintre arhitectură și tehnologie, Neri Oxman (citată în Antonelli & Burckhardt, 2020), care analizează ecologia materialelor și integrarea biologiei în procesul de proiectare, Kisho Kurokawa (1977) fără de care ideea arhitecturii metabolice posibil să nu ar

Introduction. Architecture as a Living System

Metabolic architecture represents a conceptual model in which constructions are not static entities but dynamic ones which are capable of growth, decay and regeneration, a concept that compares buildings and cities to energy processes found in all life forms (Kurokawa, 1977). This approach is also influenced by biomimicry, a domain popularized by Janine Benyus (1997), who explores the ways in which natural processes can inspire innovation in various sciences and technology. In the field of architecture, such ideas were discussed and researched by people such as Michael Pawlyn (2016) and Neri Oxman (as cited in Antonelli & Burckhardt, 2020) who have investigated the integration of materials and biological processes in sustainable design. This research paper analyses the modes in which architecture can transcend its traditional role and become an active agent of ecological change. In this context, this article proposes a network of speculative architectural prototypes, created as infrastructures that monitor and adapt to global ecological changes. Unlike other approaches of sustainable architecture which concentrate on energy efficiency or the reduction of carbon footprint, this model explores the possibility of architectural structures to interact with environmental changes, influencing ecosystems through adaptability, monitoring, data storage and co-evolution with given environment. This concept places itself in the principles formulated within the Metabolic movement, which promoted a modular architecture which was flexible and capable of change, reflecting as such various processes of growth which can also be recognized in nature (Kurokawa, 1977). The proposed research is based on the literature review and the analysis of architectural projects that reflect the principles of adaptive architecture. Among others, the research includes work by Reyner Banham (1969), who redefined the relationship between architecture and technology, Neri Oxman (as cited in Antonelli & Burckhardt, 2020), who investigates the ecology of materials and the integration of biology in the design process, Kisho

fi existat și alți cercetători precum Natasha Chayaamor-Heil et al. (2024) care explorează relația dintre natură și arhitectură. Pentru a exemplifica principiile modularității și integrării arhitecturii în ecosisteme ecologice, proiectul *Nakagin Capsule Tower* de Kisho Kurokawa și *Eden Project* de Grimshaw Architects au fost și ele incluse în acest studiu.

Din punct de vedere metodologic, acest articol utilizează analize comparative și explorative ale surselor teoretice și trei studii de caz bazate pe rețeaua speculativă de prototipuri arhitecturale, care se află în trei climate extreme și diverse, cu altitudini diferite și pe continente diferite. Ca atare, cercetarea explorează modul în care aceste legături arhitecturale ar putea funcționa ca sisteme interconectate, distribuite la scară planetară. Această abordare propune așadar o viziune extinsă asupra arhitecturii metabolice, în care structurile funcționează în mod activ în cadrul unui metabolism ecologic global. Chiar dacă aplicabilitatea unui astfel de concept este dificilă din cauza limitărilor tehnologice, a costurilor mari de implementare sau a incertitudinii cu privire la scalabilitatea unor astfel de tehnologii, alte proiecte precum *Climate for Culture* (European Commission, 2015) sau proiectul mai recent al lui Neri Oxman *Aguahoja* (citată în Antonelli & Burckhardt, 2020) sugerează o abordare graduală a acestei viziuni. Așadar, arhitectura metabolică rămâne o temă de cercetare promițătoare, cu potențialul de a transforma modul în care proiectăm și interacționăm cu mediul construit. Lucrarea de față contribuie astfel la dezvoltarea discursului în relația arhitectură - natură - biologie, o hibridizare a unor domenii care continuă să crească. Perspectiva propusă este astfel una teoretică, orientată spre analiza dinamicii structurilor arhitecturale, construind un cadru conceptual pentru analiza proceselor temporale în arhitectură dar și pentru nuanțarea unor practici capabile să integreze procese de regenerare ca parte a relației mediului cu arhitectura.

Kurokawa (1977) without whom the idea of metabolic architecture might have not existed, and other researchers such as Natasha Chayaamor-Heil et al. (2024) who explore the relationship between nature and architecture. To exemplify the principles of modularity and the integration of architecture in ecological ecosystems, project *Nakagin Capsule Tower* by Kisho Kurokawa and *Eden Project* by Grimshaw Architects have also been included in this study.

From a methodological point of view, this article uses comparative and explorative analyses of theoretical references and three case studies based on the proposed, speculative network of architectural prototypes which are located in three extreme and diverse climates, with different altitudes and on different continents. As such, the research explores how architectural links could function as distributed and interconnected systems, at a planetary scale. This approach proposes, as a result, an extended vision upon metabolic architecture, in which structures function actively within an ecological global metabolism. Even though the applicability of such concept is difficult due to technological limitations, high implementation costs or the uncertainty regarding scalability of such technologies, other projects such as *Climate for Culture* (European Commission, 2015) or Neri Oxman's (as cited in Antonelli & Burckhardt, 2020) more recent *Aguahoja* project suggest a gradual approach to this vision. As such, metabolic architecture remains a promising research theme with the potential to transform the way we built and interact with our built environment. This paper contributes as such towards expanding the discourse in the architecture-nature-biology relationship, a hybridization of fields which continues to grow. The proposed perspective is thus a theoretical one, oriented towards the analysis of architectural structural dynamics. Moreover, it builds a conceptual framework for the analysis of temporal processes in architecture, while highlighting practices capable of integrating the regeneration process as part of the relationship between architecture and the environment.

Prototipuri speculative în perspectivă

Pornind de la o perspectivă planetară, există nenumărate locații posibile pentru intervențiile arhitecturale speculative discutate, denumite în continuare *markeri*, subliniind ca atare adaptabilitatea acestora și rolul lor de a documenta schimbarea. Aceste locații, odată alese, creează un cadru conceptual pentru explorare, funcționând ca puncte de interacțiune între sistemele construite și mediile lor. Distribuți strategic în regiuni cu climă specială, arii protejate sau ecosisteme fragile, acești markeri care cresc, se degradează și se regenerează, reacționează la condițiile locale și înregistrează schimbările ecologice.

Banham (1969) redefinește arhitectura prin prisma interacțiunii dintre tehnologie și mediul construit, sugerând că sistemele de control ale climei ar trebui recunoscute ca o parte integrată a arhitecturii și nu doar ca o tehnică auxiliară. Ca atare, el propune o abordare care vede clădirile ca sisteme deschise capabile să interacționeze cu contextele înconjurătoare cu ajutorul soluțiilor și tehnologiei din domeniul ingineriei.

Această perspectivă a fost extinsă mai recent prin cercetarea biomimetismului. Pawlyn (2016) analizează arhitectura ca un domeniu care poate învăța direct din natură și propune principii precum „Eficiența resurselor prin formă”, inspirată din eficiența materială, optimizarea resurselor și capacitatea de adaptare observată în mod clar în organismele vii. În mod similar, Benyus (1997) introduce biomimetismul ca o metodă interdisciplinară care poate fi aplicată în mai multe domenii, inclusiv în arhitectură, subliniind în același timp potențialul structurilor biologice de a ghida proiectarea durabilă. Chiar dacă Benyus nu a dezvoltat în mod specific un model pentru arhitectura adaptivă, principiile sale de biomimetism sunt încă relevante în procesul de înțelegere a interacțiunii dintre procesele naturale și designul durabil.

Speculative Prototypes in Perspective

Starting from a planetary perspective, there are millions of possible locations for the discussed speculative architectural interventions, hereafter referred to as ‘markers’, emphasizing as such their adaptability and their role of documenting change. These locations, once chosen, create a conceptual framework for exploration, functioning as points of interaction between built systems and their environments. Distributed strategically in regions with special climates, protected areas or fragile ecosystems, these markers which grow, degrade and regenerate, react to local conditions and archive ecological changes.

Banham (1969) redefines architecture through the lens of the interaction between technology and the built environment, suggesting that climate control systems should be recognized as an integrated part of architecture and not just as an auxiliary technique. As such, he proposes an approach which sees buildings as open systems capable of interaction with their surrounding contexts with the help of engineering solutions and technology.

This perspective has more recently been extended through the research of biomimicry. Pawlyn (2016) analyses architecture as a domain which can learn directly from nature and proposes principles such as the “Resource Efficiency through Form” which is inspired by material efficiency, resource optimization and the capacity of adaptation observed clearly in natural organisms. Similarly, Benyus (1997), introduces biomimicry as an interdisciplinary method which can be applied in multiple domains, including architecture, while highlighting the potential of biological structures to guide sustainable design. Even though Benyus did not specifically develop a model for adaptive architecture, her biomimicry principles are still relevant in the process of understanding the interaction between natural processes and sustainable design.

Pe de altă parte, Kisho Kurokawa (1977) a fondat principiile arhitecturii metabolice într-o direcție complementar, promovând modularitatea, flexibilitatea și regenerarea ca strategii esențiale pentru dezvoltarea unui mediu construit capabil să răspundă dinamic la schimbare. Conceptele sale au fost explorate mai recent, în contextul hibridizării cunoștințelor științifice în practica arhitecturală, evidențiind ca atare intersecția dintre biologie, materialitate și arhitectură. Chayaamor-Heil et al., (2024) analizează integrarea organismelor vii precum miceliul în procesul de proiectare, evidențiind modul în care strategiile biologice adaptative pot contribui la dezvoltarea soluțiilor arhitecturale durabile.

Această abordare nu definește doar relația dintre arhitectură și ecologie, ci propune și noi metode prin care arhitectura poate funcționa ca un sistem metabolic capabil să reacționeze la mediul înconjurător. Un exemplu clar al acestui concept interdisciplinar de materialitate ecologică este cel propus de Neri Oxman, prin care cercetează posibilitățile de utilizare a materialelor programabile în arhitectură (Antonelli & Burckhardt, 2020). Pavilionul ei denumit *Silk Pavilion* (pavilionul de mătase), bazat pe coordonarea digitală a proceselor de țesut ai viermilor de mătase, ilustrează relația dintre biologie și design. În mod similar, proiectul său, *Aguahoja*, prezintă materiale biodegradabile precum celuloza și chitosanul, care creează structuri ce se degradează în mod natural, reintegrându-se în ecosistem și, ca atare, expunând un model de design auto-susținut, care este și regenerativ.

Aceste explorări arată potențialul arhitecturii de a evolua dincolo de o simplă structură statică și de a deveni un sistem capabil de a interacționa activ cu contextul său. Ca atare, markerii introduși în această lucrare propun o rețea arhitecturală interconectată, capabilă să arhiveze și să analizeze schimbările climatice. Această direcție se aliniază la inițiativele recente precum proiectul *Climate for Culture*, finanțat de Comitetul European pentru a investiga impactul schimbărilor climatice asupra unor

In a complementary direction however, Kisho Kurokawa (1977), has founded the principles of metabolic architecture, promoting modularity, flexibility and regeneration as strategies which are essential for the development of a built environment which is capable to respond dynamically to change. His concepts have more recently been explored, in the context of hybridization of scientific knowledge in architectural practice, highlighting as such the intersection between biology, materiality and architecture. Chayaamor-Heil et al., (2024) analyse the integration of live organisms such as mycelium in the design process, highlighting the way in which adaptive biological strategies can contribute to the development of sustainable architectural solutions.

This approach does not only define the relationship between architecture and ecology but also proposes new methods through which architecture can function as a metabolic system capable of reacting to its surrounding context. A clear example of this interdisciplinary concept of ecologic materiality is one proposed by Neri Oxman, where she investigates the possibilities of utilizing programable materials in architecture (Antonelli & Burckhardt, 2020). Her *Silk Pavilion*, based on the digital coordination of the weaving processes of silkworms, illustrate the relationship between biology and design. Similarly, her *Aguahoja* project showcases biodegradable materials such as cellulose and chitosan, creating structures which can naturally degrade, reintegrating in the ecosystem and as such exhibiting a model of a self-sustaining design which is also regenerative.

These explorations showcase the potential of architecture to evolve beyond a mere static structure and become a system which is capable of interacting actively with its context. As such, the markers introduced in this paper, propose an interconnected architectural network, capable of archiving and analysing climatic change. This direction aligns with recent initiatives, including the *Climate for Culture* project, financed by the European Committee to investigate the impact of climatic change on certain

situri de patrimoniu din Europa (European Commission, 2015). Metodologia respectivă poate fi adaptată și aplicată arhitecturii viitorului, unde clădirile devin infrastructuri active în procesul de interpretare și gestionare a datelor ecologice.

O astfel de infrastructură ar putea fi creată prin integrarea unor senzori de mediu și materiale bio-reactive care monitorizează factori precum temperatura, umiditatea și poluarea, ajustând parametrii în timp real. Spre exemplu, fațadele dinamice ar putea reacționa la condițiile exterioare prin modificarea permeabilității lor la lumină și aer, optimizând astfel și consumul de energie. Mai mult, utilizarea materialelor inteligente din celuloză sau chitosan, ca și în proiectele lui Oxman, ar putea crea structuri care sunt complet biodegradabile. Dacă acești markeri ar fi conectați la o arhivă de date climatice, aceștia ar putea contribui activ la strategii de rezistență climatică, anticipând și influențând în același timp condițiile climatice. Ca atare, astfel de prototipuri ar putea fi un început al unui model aplicabil, demonstrând că arhitectura metabolică ar putea avea implicații practice asupra climei.

Analizând mai îndeaproape sistemul propus, acesta capătă o dimensiune mai accesibilă. Dacă la scară planetară markerii funcționează ca o rețea invizibilă de noduri interconectate, la scară regională, fiecare dintre acești markeri este integrat într-un context specific din punct de vedere ecologic și climatic, în care arhitectura se adaptează, interacționând activ cu mediul înconjurător. Ca atare, în cadrul studiului de față au fost selectate trei regiuni distincte pentru a explora potențialul comportament al acestor markeri speculativi. Prima locație este *Volcan Cayambe* din Ecuador, America de Sud, situat la 78° vest de meridianul Greenwich, locație aleasă pentru altitudinea sa mare și pentru unicitatea prezenței zăpezii la Ecuator. A doua este Pădurea Tropicală a Bazinului Congo din Africa, situată la 18° est de meridianul Greenwich, poziție aleasă pentru biodiversitatea sa bogată într-un climat tropical umed. În final, a treia locație este Kepulauan Riau din

heritage sites across Europe (European Commission, 2015). This methodology can be adapted and applied to the architecture of the future, where buildings become active infrastructures in the process of interpreting and managing ecological data.

Such an infrastructure could be created through the integration of environmental sensors and bio-reactive materials which monitor factors such as temperature, humidity and pollution, adjusting parameters in real time. For example, dynamic facades could react to exterior conditions through changing their permeability to light and air, thus also optimizing energy consumption. Moreover, the use of smart materials made of cellulose or chitosan as in Oxman's projects could create structures which are completely biodegradable. If these markers would be connected to an archive of climate data, they could contribute actively at strategies of climate resilience, while also anticipating and influencing climate conditions. As such, these prototypes could be a start of an applicable model, demonstrating that metabolic architecture could have practical, climate implications.

Analysing the proposed system more closely, it takes on a more accessible dimension. If at a planetary scale these markers function as an invisible network of interconnected nodes, at a regional scale, every one of these markers is integrated within an ecological and climate specific context, where the architecture adapts and interacts actively to its surroundings. As such, within this paper, three distinct regions have been selected to explore the potential behaviour of these speculative markers. First location is *Volcan Cayambe* in Ecuador, South America, situated at 78° west of the Greenwich meridian, chosen for its high altitude and the unique case of snow presence at the Equator. Second location is Congo Basin Rainforest in Congo, Africa, situated at 18° east of the Greenwich meridian, chosen for its rich biodiversity within a tropical, wet climate. Lastly, the third location is Kepulauan Riau in Indonesia, Asia, situated at 104° east of the Greenwich

Indonezia, Asia, situat la 104° est de meridianul Greenwich, poziție aleasă pentru recifele sale extinse de corali și locația sa pe apă.

Aceste locuri au fost alese pentru a investiga modul în care arhitectura poate funcționa ca sistem metabolic în condiții extreme, urmărind în același timp identificarea contextelor relevante pentru tehnologiile arhitecturale adaptive. Deși limitați la trei locații în această lucrare pentru claritatea cercetării, acești markeri speculativi ar putea fi plasați în orice locație de pe glob. Alegerea primei locații, Volcan Cayambe din Ecuador, s-a datorat în primul rând altitudinii mari și temperaturile scăzute, ceea ce ridică întrebări privind managementul termic și disponibilitatea resurselor. În acest caz, principiile biomimetice ale lui Benyus (1997) sunt relevante, deoarece organismele care trăiesc în condiții atât de extreme își optimizează consumul de energie și utilizează resursele locale pentru a supraviețui. Aplicând aceste principii în arhitectură, acest marker ar putea integra sisteme care valorifică energia termică a solului sau folosesc zăpada și gheața ca resurse, inspirându-se din strategiile adaptative ale regiunilor muntoase.

Materialitatea joacă un rol crucial în acest context. Inspirat de materialele ecologice ale lui Neri Oxman, acest marker are potențialul de a deveni adaptativ, reacționând la îngheț, zăpadă și fluctuații de temperatură, modificându-și ca urmare permeabilitatea, masa termică sau capacitatea de regenerare. Fig. 1 este o reprezentare a acestei schimbări, o randare care arată caracterul schimbător al unei părți din cadrul markerului, pe măsură ce trece prin schimbările climatice de pe Volcan Cayambe.

Această inserție arhitecturală evidențiază astfel ciclurile de degradare și regenerare prin transformări vizibile – topirea gheții, formarea crăpăturilor, etc. Cele trei etape ilustrate (inițială, de tranziție și de acumulare) nu sunt doar descriptive, cât mai degrabă performative, marcând în timp modificările ecosistemice și acumulând o memorie fizică

meridian, chosen for its extensive coral reefs and its location on water.

These locations have been chosen to study the way in which architecture can function as a metabolic system within extreme conditions, while following the identification of relevant contexts for adaptive architectural technologies. Although limited to three locations within this paper for clarity of research, these speculative markers could be placed in any location around the globe. The choice of Volcan Cayambe in Ecuador came mostly due to high altitudes and low temperatures which raise questions of thermal management and resource availability. Here, Benyus's biomimicry principles (1997) are relevant as organisms which live in such extreme conditions optimize their energy consumption and utilize local resources to survive. Applied in architecture, this marker could integrate systems which harness the soil's thermal energy or use snow and ice as resources, drawing inspiration from the adaptive strategies of mountain regions.

Materiality plays a crucial role here, within this context. Inspired by Neri Oxman's ecological materials, this marker could become adaptive, reacting to frost, snow and temperature fluctuations, modifying as a result its permeability, thermal mass or capacity to regenerate. Fig. 1 is a representation of this change, a render showing the changing character of a piece within the marker, as it goes through climate changes on Volcan Cayambe.

This architectural insertion thus highlights the cycles of degradation and regeneration through visible transformations such as melted ice or crack formations. The three stages illustrated (initial, changing and accumulation or new recordings) are not only descriptive, but also performative, marking ecosystem changes over

a mediului schimbător. Astfel, monumentul funcționează atât ca o instalație arhitecturală tip senzor, cât și ca o arhivă ecologică, reflectând ideea arhitecturii metabolice a acestei lucrări.

Apoi, în cazul pădurii tropicale din bazinul Congo, markerul va trebui să răspundă unui mediu total diferit: un context cu umiditate ridicată și cu o biodiversitate excepțională, în care vegetația este densă și interacțiunile dintre diferitele

time and accumulating a physical memory of the changing environment. Thus, the marker functions both as a sensor-type architectural installation and also as an ecological archive, reflecting the idea of metabolic architecture presented within this paper.

Moving forward to the Congo Basin Rainforest, here, the marker would have to respond to a totally different environment: a high humidity context of exceptional biodiversity, where vegetation is dense and interactions

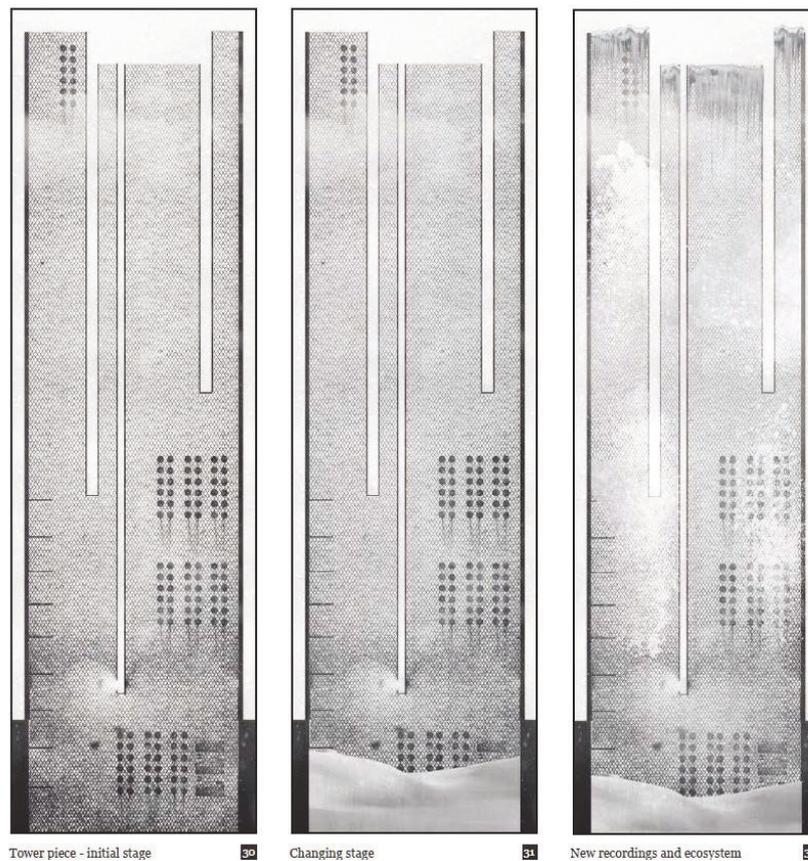


Fig. 1. Martor ecologic – randare realizată de autor în cadrul proiectului de teză intitulat *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* la Bartlett School of Architecture / Ecological witness marker – render made by author within thesis project entitled *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* at the Bartlett School of Architecture
Sursa/ Source: The author, 2020

specii creează un echilibru complex. În acest context, arhitectura poate imita principii observate în natură precum eficiența structurilor plantelor sau capacitatea de auto-regenerare a ecosistemelor tropicale. Materialele biodegradabile ar putea permite o integrare armonioasă în ecosistem evitând ca atare orice impact negativ asupra biodiversității locale. Fig. 2 exprimă această schimbare în timp ce prezintă, pe aceeași structură, efectele unei locații diferite.

between various species creates a complex equilibrium. Within this context architecture can imitate principles observed in nature such as the efficiency of plant structures or the self-regeneration capacity of tropical ecosystems. Biodegradable materials could allow a harmonious integration within the ecosystem avoiding as such any negative impact on local biodiversity. Fig. 2 expresses this change while also showcasing, on the same structure, the effects of a different location.



Fig. 2. Martor ecologic 2 – randare realizată de autor în cadrul proiectului de teză intitulat *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* la Bartlett School of Architecture / Ecological witness marker 2– render made by author within thesis project entitled *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* at the Bartlett School of Architecture
Sursa/ Source: The author, 2020

Structura sa, gândită ca o prezență verticală discretă, este realizată dintr-un material poros, capabil să absoarbă umiditatea și să se transforme odată cu mediul. Structura condensează și transpiră, devenind un mediu de interacțiune între vegetație, apă și atmosferă. Secvența de imagini urmărește această transformare în timp, de la forma sa inițială, la o stare aproape complet încorporată în peisajul vegetal. Markerul devine așadar o suprafață de înregistrare biologică ce se acoperă treptat cu straturi de materie. Fuziunea dintre obiect și mediu pune în evidență caracterul permeabil și adaptabil al arhitecturii în relație cu ecosistemul ecuatorial.

Nu în ultimul rând, a treia locație, Kepulauan Riau din Indonezia, a fost aleasă datorită ecosistemului său marin complex în care recifele de corali joacă un rol crucial în echilibrul ecologic. În acest mediu, adaptabilitatea arhitecturală trebuie să țină cont de interacțiunea cu apa, curenții și biodiversitatea, explorând materiale care sunt capabile să reziste la astfel de habitate acvatice, sprijinind și regenerarea ecosistemelor coraligene. Aici, markerul ar beneficia de cercetarea în biomimetism care analizează structurile de corali ca modele pentru materiale poroase și regenerative prin tehnologii avansate care sunt utilizate în prezent pentru a restabili recifele de corali și a îmbunătăți funcțiile lor ecologice (Margheritini et al., 2021).

Materialele utilizate pot imita structura coralului pentru a crea suprafețe care favorizează creșterea acestora și susțin formarea recifelor. Fig. 3 prezintă această transformare cu ajutorul unei randări bazate pe aceeași structură arhitecturală. Markerul, devine un martor al transformărilor marine. Într-un mediu cu presiune joasă, organismele vii îl colonizează, formând un strat viu pe suprafața sa. Spre deosebire de celelalte două exemple, acest marker accentuează permeabilitatea granițelor fizice ale arhitecturii în cadrul unui mediu fluid și instabil.

Its structure, conceived as a discreet vertical presence, is made of a porous material, capable of absorbing moisture and transforming together with the environment. The structure condenses and transpires, becoming a medium of interaction between vegetation, water and atmosphere. The sequence of images follows the transformation over time, from its initial form to a state almost completely incorporated into the landscape. The marker becomes as such a biological recording surface that is gradually covered with layers of matter. The fusion between object and environment highlights the permeable character of architecture in relation to the equatorial ecosystem.

Last but not least, the choice of Kepulauan Riau in Indonesia was made due to its complex marine ecosystem where coral reefs play a crucial role in ecologic equilibrium. Within this environment, architectural adaptability needs to take account of the interaction with water, currents and biodiversity, exploring materials which are capable of resisting to such aquatic habitats while also supporting the regeneration of coralliferous ecosystems. Here, the marker would benefit off the research in biomimicry which analyzes coral structures as models for porous, regenerative materials through advanced technologies that are currently being utilized to restore coral reefs and improve their ecological functions (Margheritini et al., 2021).

The utilized materials can as such mimic the coral's structure to create surfaces which favour coral growth and support the formation of reefs. Fig. 3 showcases this transformation with the help of a render of the same architectural structure. The marker becomes a witness to marine transformations. In a low-pressure environment, it becomes colonized by living organisms, forming a living layer on its surface. Unlike the other two examples, this marker emphasizes the permeability of architecture's physical boundaries within a fluid, unstable environment.

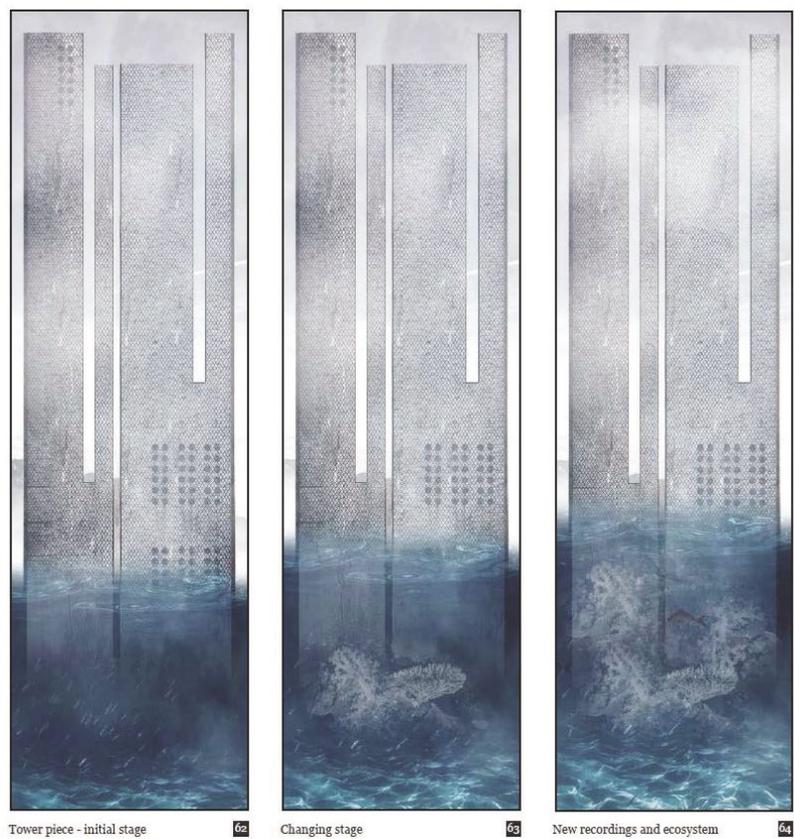


Fig. 3. Martor ecologic 3 – randare realizată de autor în cadrul proiectului de teză intitulat *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* la Bartlett School of Architecture / Ecological witness marker 3– render made by author within thesis project entitled *Earth-as-sensor, Building-as-sensor* at the Bartlett School of Architecture
 Sursa/ Source: The author, 2020

Fiecare dintre acești trei markeri este considerat ca parte integrală a unui sistem global, care, în același timp, rămâne adaptat în mod specific la condițiile sale locale. Structurile nu sunt izolate, ci reprezintă mai degrabă elemente active care monitorizează schimbările climatice, interacționează cu mediul înconjurător și colectează datele necesare pentru strategiile de adaptare ecologică. Această strategie evidențiază potențialul arhitecturii de a deveni un instrument activ în monitorizarea schimbărilor climatice, oferind o abordare integrată care combină analiza ecologică locală cu ajutorul fiecărui marker, cu tehnologii predictive prin materiale inteligente și principii metabolice. Ca atare, rețeaua propusă nu doar documentează schimbările climatice, ci contribuie și la crearea unor strategii de adaptabilitate care pot fi aplicate într-o varietate de contexte, de la ecosisteme vulnerabile până la dezvoltarea de principii urbane durabile.

Lecții din realitate și din imaginație

Prototipurile speculative analizate în prezenta lucrare servesc drept explorări conceptuale ale unui cadru de design adaptiv și o arhitectură metabolică la scară planetară. Cu toate acestea, aceste idei nu sunt total detașate de realitate, ci își au rădăcinile în precedente istorice și teorii arhitecturale care au influențat direcțiile contemporane.

Arhitectura metabolică își are originile în mișcarea metabolică japoneză, fondată în 1960 de Kisho Kurokawa împreună cu alți arhitecți. Principiul central al mișcării a fost ideea că orașele și clădirile ar trebui să evolueze organic, precum sistemele vii. Comparând structurile arhitecturale cu procesele metabolice ale organismelor, Metabolismul a propus modele urbane capabile de schimbare, regenerare și adaptare la condițiile sociale și tehnologice (Kurokawa, 1977).

Un exemplu notabil al acestei mișcări a fost *Nakagin Capsule Tower*, proiectat de Kurokawa în 1972, o clădire

Each of these three markers it thought of as part of a global system but that at the same time remains specifically adapted to its local conditions. The structures are not isolated but are rather active elements which monitor climatic changes, interact with their surroundings and collect data needed for ecological adaptation strategies. This strategy highlights the potential of architecture to become an active instrument in monitoring climate change, offering an integrated approach which combines local ecological analysis with the help of each marker, predictive technologies through smart materials and metabolic principles. As such, the proposed network does not only document climate changes but also contributes to the creation of adaptability strategies which can be applied in a variety of contexts, from vulnerable ecosystems to sustainable urban development.

Lessons from the Real and the Imagined

The speculative prototypes analysed in this paper, serve as conceptual explorations of a framework for adaptive design and metabolic architecture at the planetary scale. However, these ideas are not totally detached from reality, but have their roots in historic precedents and architectural theories which have influenced contemporary directions.

Metabolic architecture has its origins in the Japanese Metabolism movement, founded in 1960 by Kisho Kurokawa together with a few other architects. The movement's central principle was the idea that cities and buildings should evolve organically, like living systems. Comparing architectural structures with the metabolic processes of organisms, Metabolism proposed urban models capable of change, regeneration and adaptation to social and technological conditions (Kurokawa, 1977).

A notable example of this movement was the *Nakagin Capsule Tower*, designed by Kurokawa in 1972, a modular

modulară creată pentru a permite înlocuirea unităților sale individuale. În practică însă, această flexibilitate nu a fost exploatată și turnul a fost demolat în 2022, cu un total de 23 de capsule fiind salvate și răspândite în întreaga lume pentru a continua să reprezinte Metabolismul în viitor (Florian, 2023). Discrepanța rezultată între teorie și aplicabilitate ilustrează limitele arhitecturii modulare ca strategie durabilă, pe termen lung, în absența unei infrastructuri care să poată facilita întreținerea și actualizarea periodică a componentelor. Astăzi, arhitectura contemporană explorează din ce în ce mai des integrarea proceselor biologice în cadrul proiectelor de construcție prin tehnologii emergente precum fațade bio-adaptative, materiale receptive și simulări digitale.

Această direcție de proiectare reflectă o schimbare în modul în care arhitectura interacționează cu biologia, nu doar ca sursă de inspirație formală, ci și ca domeniu științific activ care influențează direct proiectarea arhitecturală. Chayaamor-Heil & Vitalis (2021) analizează modul în care integrarea biologiei în domeniul arhitecturii modifică gândirea și procesele tehnologice, determinând arhitecții să adopte modele analitice și computaționale, incluzând în același timp colaborări interdisciplinare pentru a traduce clar cunoștințele legate de biologie în soluții arhitecturale aplicabile. De exemplu, studiul Chayaamor-Heil et al. (2024) evidențiază modul în care co-proiectarea cu organisme vii și utilizarea materialelor receptive contribuie la un nou cadru ecologic în domeniul arhitecturii, îndepărtându-se de principiile metabolice standard ale unui oraș ca entitate modulară. Aceste cercetări evidențiază importanța hibridizării cunoștințelor arhitecturale pentru ca aceasta să poată răspunde provocărilor climatice actuale, dezvoltând totodată structuri care nu doar se adaptează, ci și colaborează cu mediul atât din punct de vedere organic, cât și sustenabil.

În paralel cu Metabolismul Japonez, grupul Archigram, format în anii 1960, a propus o viziune radicală în domeniul arhitecturii adaptabile. Proiecte speculative

building created to allow its individual units to be replaced. In practice however, this flexibility was not exploited and the tower was demolished in 2022, with a total of 23 capsules being saved and spread around the world to continue representing Metabolism in the future (Florian, 2023). This discrepancy between theory and applicability illustrates the limits of modular architecture as a sustainable, long-term strategy in the absence of an infrastructure which can facilitate periodic maintenance and updating of components. Today, contemporary architecture explores more and more often the integration of biological processes within building projects through emerging technologies such as bio-adaptive facades, responsive materials and digital simulations.

This design direction reflects a change in the way architecture interact with biology, not just as a source of formal inspiration, but as an active scientific domain which directly influences projects. Chayaamor-Heil & Vitalis (2021) analyse the way in which integrating biology in the architecture field modifies thinking and technological processes, determining architects to adopt analytical and computational models, while also including interdisciplinary collaborations to clearly translate biology related knowledge to applicable architectural solutions. For example, the Chayaamor-Heil et al. (2024) study highlights how co-designing with live organisms and utilizing responsive materials contribute to a new ecological framework within the architecture field, moving away from the standard metabolic principles of a city as a modular entity. These researches highlight the importance of hybridizing architectural knowledge for it to be able to respond to current climatic challenges while also developing structures which not only adapt but also collaborate with the environment both organically and sustainably.

Parallel to Japanese Metabolism, the Archigram group, formed in the 1960s proposed a radical vision in the field of adaptable architecture. Speculative projects

precum *Walking City* și *Plug-in City* și-au imaginat orașele ca fiind modulare și mobile, capabile să răspundă atât la schimbările de mediu, cât și la cerințele utilizatorilor. Spre deosebire de proiectul Metabolism care a avut implementări parțiale, aceste concepte Archigram au rămas în imaginat, fără o aplicabilitate directă. Cu toate acestea, ideile grupului despre prefabricare, flexibilitate și tehnologie integrată au influențat gândirea contemporană în domeniul arhitecturii (Sadler, 2005).

În timp ce metabolismul japonez și Archigram au explorat adaptabilitatea arhitecturală în diferite moduri, *Eden Project* din 2001, proiectat de Grimshaw Architects oferă un exemplu contemporan de integrare arhitecturală în sistemele naturale. Situat pe un fost sit minier de argilă, proiectul transformă un peisaj degradat într-un sistem care reproduce ecosisteme variate, folosind materiale precum panourile ETFE pentru a optimiza eficiența termică (Grimshaw Architects, 2001). În comparație cu modelele speculative ale grupului Archigram, *Eden Project* demonstrează fezabilitatea arhitecturii durabile la scară largă, fără a compromite durabilitatea materialelor sau funcționalitatea acestora pe termen lung. Totuși, proiectul nu implementează în mod direct concepte metabolice, ci adoptă mai degrabă o strategie mai strâns legată de biomimetism decât cea a unei arhitecturi regenerative propuse în această lucrare.

Comparând aceste exemple, se observă că *Nakagin Capsule Tower* a eșuat în aplicarea principiului modularității, ideile grupului Archigram au fost păstrate ca un concept teoretic, iar *Eden Project* este un exemplu viabil și funcțional de integrare a arhitecturii în mediul său, însă fără caracteristici metabolice evidente. Acest contrast subliniază provocările arhitecturii adaptive dar și direcțiile necesare pentru viitorul arhitecturii metabolice. Pentru a sublinia șadar cele mai evidente avantaje ale arhitecturii metabolice moderne, se includ aici materiale adaptive care pot îmbunătăți durabilitatea arhitecturii și pot reduce impactul ecologic, strategii biomimetice

such as *Walking City* and *Plug-in City* have imagined cities as modular and mobile, capable of responding to both environmental changes and user requirements. Unlike Metabolism which had partial implementations, the Archigram concepts have remained in the imagined, without a direct applicability. However, the group's ideas about prefabrication, flexibility and integrated technology have influenced contemporary thinking in the architecture field (Sadler, 2005).

While Japanese Metabolism and Archigram have explored architectural adaptability in different ways, the 2001 *Eden Project* by Grimshaw Architects offers a contemporary example of architectural integration in natural systems. Situated on a former clay mining site, the project transforms a degraded landscape into a biome system that reproduces varied ecosystems, using materials such as ETFE panels to optimize thermal efficiency (Grimshaw Architects, 2001). In comparison to Archigram's speculative models, *Eden Project* demonstrates the feasibility of sustainable architecture at a large scale without compromising the durability of its materials or its functionality in the long run. However, the project does not directly implement metabolic concepts but rather adopts a strategy more closely related to biomimicry than that of a regenerative architecture proposed by this paper.

By comparing these examples, it is observed that the *Nakagin Capsule Tower* has failed in applying the principle of modularity, *Archigram* was left as a theoretical concept and *Eden Project* is a viable example of integrating architecture within its environment but lacks other visible metabolic characteristics. This contrast underlines the challenges of adaptive architecture but also the necessary directions for the future of metabolic architecture. To highlight as such the most evident advantages of modern metabolic architecture one would include adaptive materials which can improve architecture's durability and reduce ecological impact, biomimetic strategies

care oferă soluții inovatoare pentru construcții durabile și integrarea tehnologiilor digitale care permit structuri receptive ce reacționează la stimulii mediului în timp real. Pe de altă parte, unele limitări și provocări ale conceptului propus include implementarea la scară largă, dependența de infrastructurile de întreținere care limitează viabilitatea în timp și costurile ridicate ale materialelor biomimetice și tehnologiilor receptive. În această lumină, markerii speculativi propuși în lucrarea de față explorează posibilitatea unei arhitecturi interconectate, scalabile. Aceste modele încearcă să depășească limitele identificate propunând o viziune care combină sustenabilitatea ecologică cu adaptabilitatea arhitecturală. Analiza propusă demonstrează ca atare că, deși arhitectura metabolică are baze istorice solide, implementarea ei în scenarii de viață reală rămâne o provocare. Studiind atât exemple istorice, cât și unele contemporane, se poate concluziona că viitorul arhitecturii metabolice necesită o abordare integrată care combină modularitatea, biomimetica și tehnologiile receptive într-un cadru operațional viabil.

Concluzie. Spre o monumentalitate distribuită

Studiul propus a explorat arhitectura metabolică ca sistem dinamic și adaptativ, capabil să răspundă provocărilor ecologice globale. De la prototipuri speculative propuse ca o rețea descentralizată de intervenții arhitecturale până la analiza precedentelor istorice și contemporane, lucrarea demonstrează necesitatea unei schimbări de paradigmă în gândirea arhitecturală. Arhitectura nu mai poate fi văzută ca o entitate statică, ci trebuie să îmbrățișeze creșterea, transformarea și interconectivitatea pentru a armoniza mediul construit cu procesele evolutive ale Pământului. Analiza exemplurilor precum *Nakagin Capsule Tower*, conceptele vizionare ale grupului Archigram și modele mai recente precum *Eden Project*, *Climate for Culture* sau proiectele lui Neri Oxman, au evidențiat atât contribuțiile, cât și limitele designului adaptiv. Deși materialitatea, modularitatea și flexibilitatea au fost teme centrale în

which offer innovative solutions for sustainable building and integration of digital technologies which allow for responsive structures that react to environmental stimuli in real time. On the other side, some limits and challenges would include large scale implementation, dependence on maintenance infrastructures that limit viability over time and high costs of biomimetic materials and responsive technologies. In this light, the proposed speculative markers within this paper explore the possibility of an interconnected, scalable architecture. These models try to surpass the limitations identified by proposing a vision which combines ecological sustainability with architectural adaptability. This analysis demonstrates as such, that even though metabolic architecture has solid historical foundations, its implementation in real life scenarios remains a challenge. By studying both historical and contemporary examples, one can conclude that the future of metabolic architecture requires an integrated approach which combines modularity, biomimetics and responsive technologies within a viable operational framework.

Conclusion. Towards a Distributed Monumentality

This paper has explored metabolic architecture as a dynamic and adaptive system, capable of responding to global ecological challenges. From speculative prototypes proposed as a decentralized network of architectural interventions to the analysis of historical and contemporary precedents, the paper demonstrates the necessity of a paradigm switch within architectural thinking. Architecture can no longer be seen as a static entity but must embrace growth, transformation and interconnectivity in order to harmonize the built environment with the Earth's evolutionary processes. The analysis of examples such as *Nakagin Capsule Tower*, the visionary concepts of Archigram and more recent models such as *Eden Project*, *Climate for Culture* or Neri Oxman's projects, have highlighted both the contributions and the limits of adaptive design. While materiality, modularity

cadrul acestor proiecte, ele nu au putut să răspundă complet la complexitatea schimbărilor ecologice la scară planetară. Modelele speculative discutate în lucrare continuă aceste eforturi propunând o infrastructură arhitecturală distribuită planetar în care fiecare marker răspunde dinamic la condițiile locale, contribuind, de asemenea, la un sistem global mai larg de monitorizare și adaptare. Cele trei regiuni analizate, Volcan Cayambe în Ecuador, Bazinul râului Congo în Republica Congo și Kepulauan Riau în Indonezia exemplifică diversitatea scenariilor climatice în care arhitectura poate deveni un instrument activ de regenerare ecologică. În fiecare dintre aceste contexte, soluțiile arhitecturale trebuie să devină specifice locului, integrând principii de biomimetism, materialitate ecologică și design durabil. Conform cercetărilor lui Ichioka & Pawlyn (2021), arhitectura trebuie să depășească ideea de reducere a impactului ecologic și trebuie să adopte, în schimb, strategii care să regenereze mediul și să creeze sinergii între ecosistemele naturale și mediul construit. Astfel, arhitectura metabolică trebuie să funcționeze nu doar ca un sistem adaptativ, ci și ca un mecanism activ de restaurare ecologică și optimizare a resurselor. Provocările rămân semnificative în traducerea conceptelor speculative în soluții reale, însă, această lucrare evidențiază potențialul arhitecturii adaptive de a inspira inovație și colaborare interdisciplinară. Prin propunerea teoretică prezentată, articolul oferă un instrument conceptual pentru reinterpretarea arhitecturii ca proces metabolic și contextual, cu ajutorul căreia transformarea devine un element esențial în relația mediu – spațiu construit. Markerii propuși nu sunt doar un răspuns la impactul ecologic al activităților umane, ci reprezintă o viziune a transformării care redefinește relația dintre om, mediu și structurile pe care le creează. Această cercetare propune ca atare o reevaluare a rolului arhitecturii în mediul actual și sugerează că aceasta devine un catalizator în regenerarea planetară și în conturarea unui viitor sustenabil.

and flexibility have been central themes within these projects, they were unable to completely respond to the complexities of ecological changes at a planetary scale. The speculative models discussed within the paper continue these efforts by proposing a distributed architecture infrastructure where every marker responds dynamically to local conditions while also contributing to a larger global system of monitorization and adaptation. The three analysed regions, Volcan Cayambe in Ecuador, Congo River Basin in the Republic of Congo and Kepulauan Riau in Indonesia exemplify the diversity of climatic scenarios in which architecture can become an active instrument of ecological regeneration. Within each of these contexts, the architectural solutions must become specific to the place, integrating principles of biomimicry, ecologic materiality and sustainable design. Supported by the research of Ichioka & Pawlyn (2021), architecture must go beyond simply reducing ecological impact and must adopt strategies that regenerate the environment and create synergies between the built environment and natural ecosystems. Thus, metabolic architecture must function not just as an adaptive system but as an active mechanism of ecological restoration and resource optimization. Challenges remain significant in translating speculative concepts in real solutions; however, this paper highlights the potential of adaptive architecture to inspire innovation and interdisciplinary collaboration. Through this theoretical proposal, the article offers a conceptual tool for reinterpreting architecture as a metabolic, contextualized process, with the help of which transformation becomes an essential element in the relationship between architecture and the built environment. The proposed markers are not just a response to the ecological impact of human activities but represent a vision of transformation which redefines the relationship between man, the environment and the structures they create. This research proposes as such a reevaluation of architecture's role within today's environment and suggests it becomes a catalyst in planetary regeneration and in shaping a sustainable future.

Referințe / References

- Antonelli, P., & Burckhardt, A. (2020). *The Neri Oxman Material Ecology Catalogue*. The Museum of Modern Art.
- Banham, R. (1969). *The architecture of the well-tempered environment*. University of Chicago Press.
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Harper Collins.
- Chayaamor-Heil, N., Houette, T., Demirci, Ö., & Badarnah, L. (2024). The potential of co-designing with living organisms: Towards a new ecological paradigm in architecture. *Sustainability*, 16(2), 673. <https://doi.org/10.3390/su16020673>
- Chayaamor-Heil, N., & Vitalis, L. (2021). Biology and architecture: An ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in France. *Frontiers of Architectural Research*, 10(2), 240–262. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.10.002>
- European Commission. (2015). *Final report summary – CLIMATE FOR CULTURE (Damage risk assessment, economic impact and mitigation strategies for sustainable preservation of cultural heritage in the times of climate change)* [Project report]. CORDIS EU Research Results. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/226973/reporting>
- Florian, M.-C. (2023, September 7). Where are the 23 modules saved from the demolished Nakagin Capsule Tower now? *ArchDaily*. Retrieved from <https://www.archdaily.com/1006528/where-are-the-23-modules-saved-from-the-demolished-nakagin-capsule-tower-now>
- Grimshaw Architects. (2001). *The Eden Project*. Grimshaw Architects. Retrieved from <https://grimshaw.global/projects/culture-and-exhibition/the-eden-project-the-biomes/>
- Ichioka, S., & Pawlyn, M. (2021). *Flourish: Design paradigms for our planetary emergency*. Triarchy Press.
- Kurokawa, K. (1977). *Metabolism in architecture*. Studio Vista.
- Margheritini, L., Møldrup, P., Jensen, R. L., Frandsen, K. M., Antonov, Y. I., Kawamoto, K., de Jonge, L. W., Vaccarella, R., Bjørggård, T. L., & Simonsen, M. E. (2021). Innovative material can mimic coral and boulder reefs properties. *Frontiers in Marine Science*, 8, 652986. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.652986>
- Pawlyn, M. (2016). *Biomimicry in architecture* (2nd ed.). RIBA Publishing.
- Sadler, S. (2005). *Archigram: Architecture without architecture*. MIT Press.