

INCERTEZZA, FRAGILITÀ, RESILIENZA

UNCERTAINTY, FRAGILITY, RESILIENCE

Ernesto Antonini

ABSTRACT

Le conseguenze del cambiamento climatico e le ricorrenti carestie di risorse vitali producono un'estrema e crescente fragilità di tutti i sistemi, sia biologici che tecnici, sottoposti a continue e sempre meno prevedibili perturbazioni. In questa prospettiva, la strategia che pretende di mantenere l'equilibrio statico a qualunque costo si rivela inefficace. Perciò oggi si guarda con attenzione all'approccio adattivo, basato su reattività, capacità di auto-riparazione di singole parti e tolleranza ai guasti, che da sempre consente agli organismi viventi di sopravvivere in contesti ostili. Questa attitudine dei sistemi biologici ad adottare risposte dinamiche alle azioni perturbative del loro equilibrio si rivela straordinariamente efficace e intrinsecamente efficiente, al punto da proporsi come un paradigma a cui ispirarsi per organizzare il funzionamento anche dei sistemi artificiali.

The consequences of climate change and the recurrent shortage of vital resources produce an extreme and growing fragility of all systems, both biological and technical, subjected to continuous and increasingly less predictable disturbances. In this perspective, the strategy that pretends to maintain static equilibrium at any cost is ineffective. Therefore, we look with attention at the adaptive approach, based on reactivity, ability to self-repair individual parts and fault tolerance, which has always enabled living organisms to survive in hostile contexts. This attitude of biological systems to adopt dynamic responses to the perturbative actions of their balance proves to be extraordinarily effective and intrinsically efficient, to the point of proposing itself as a paradigm to be inspired to organize even artificial systems.

KEYWORDS

resilienza, risposta dinamica, adattività, nature-based solutions

resilience, dynamic response, adaptivity, nature-based solutions

Ernesto Antonini, MS(Arch) and PhD, is a Full Professor at the Department of Architecture of the Alma Mater Studiorum University of Bologna (Italy). As a Researcher and then as a Project Manager he has participated in national and European research and experimentation programs on technical information and building innovation, especially focusing on technologies, processes, construction machinery and, more recently, on impacts and sustainability assessment of buildings, materials and components. Mob. +39 348/51.51.772 | E-mail: ernesto.antonini@unibo.it

Nei ultimi duecento anni, e in particolare nei settanta appena trascorsi, la produzione e il consumo di manufatti, così come gli abitanti del pianeta, sono cresciuti con un ritmo esasperato, e i loro fabbisogni energetici ancora più intensamente. Al punto che le emissioni dovute alla combustione di carburanti fossili, insieme al prelievo sconsiderato di ogni tipo di ingrediente utile alla produzione, hanno causato perturbazioni molto gravi all'assetto climatico globale, con la conseguenza ormai imminente di pregiudicare le possibilità stesse di sopravvivenza in vaste aree della Terra (IPCC, 2014). Un simile ritmo di crescita è stato sostenuto prelevando dall'ecosistema molte più risorse di quante esso fosse in grado di ricostituire, con l'effetto di un impoverimento complessivo delle 'scorte' disponibili e prospettive di una ancora più critica rarefazione delle più pregiate e più richieste, come il suolo agricolo, l'acqua potabile, i minerali rari, il petrolio, ma anche la biomassa forestale, con il suo positivo contributo di assorbimento del carbonio presente in atmosfera (IPCC, 2019).

Le conseguenze di questo saccheggio sono drammaticamente aggravate dalla scarsa efficienza dei processi che le risorse prelevate alimentano. Infatti, a differenza di quelli biologici, i cicli tecnologici applicano un modello lineare che punta a concentrarsi solo sull'ottenimento, dalla risorsa prelevata, di benefici di immediata utilità e ad abbandonare invece dietro di sé una scia di relitti (Georgescu-Roegen, 1971). Il contenuto residuo in materia ed energia di questi scarti – spesso cospicuo – risulta però inutilizzato, poiché il suo sfruttamento non viene ritenuto in grado di generare i vantaggi economici che l'attività si propone di conseguire, e anzi, di gravarla di costi che ne ridurrebbero la redditività e che vengono quindi 'esternalizzati' scaricandoli sulla collettività e sull'ambiente. In aggiunta, molti di questi reflui sono anche causa diretta di ulteriori perturbazioni degli equilibri ambientali, in particolare quelli causati dai rilasci in atmosfera, nel suolo e nei corpi idrici di sostanze non biodegradabili e inquinanti (Jørgensen and Pedersen, 2017).

Il modello, riprodotto sistematicamente per ogni unità di prodotto che viene realizzata, genera un destabilizzante effetto moltiplicativo, che i metabolismi biologici e i cicli naturali non sono in grado di mitigare e che quindi vede progressivamente e cumulativamente amplificare gli impatti a carico di tutte le matrici dell'ecosistema (Georgescu-Roegen, 2003).

Tollerare la deformazione | Benché ancora contrastata da qualche ostinato negazionista, la consapevolezza della gravità della situazione è documentata e largamente condivisa, così come la sua – almeno parziale – dipendenza dalle attività antropiche (Gore, 2006). Se c'è accordo ormai quasi generale sulle cause, sul carattere dirompente degli effetti e sull'urgenza di contrastarli, le opinioni sulle strategie e le pratiche correttive da mettere in atto restano, tuttavia, molto più variegate. L'estrema complessità del tema e le sue molte implicazioni a carico degli assetti portanti del sistema economico vigente – e delle strutture sociali che esso sostiene – tendono spesso a favorire azioni di

attenuazione (quando non palliative) più che interventi di correzione radicale. La condizione che ne deriva è quella di una estrema e crescente fragilità degli equilibri di tutti i sistemi, sia biologici che tecnici, stressati dalle conseguenze impattanti del cambiamento climatico e da sempre più frequenti carestie di risorse vitali, quindi sottoposti a forti sollecitazioni, di entità di volta in volta più rilevante, ma altrettanto difficili da prevedere, da prevenire, e ancor più da fronteggiare (Pielke, 2013).

È in questo contesto che si è cominciato a guardare con maggiore attenzione alle strategie di risposta alle sollecitazioni esterne adottate dagli organismi viventi e dai sistemi naturali non perturbati, basate su reattività, adattività, capacità di auto-riparazione di singole parti e tolleranza ai guasti. Questo approccio è quello che da sempre consente efficacemente ai sistemi biologici di sopravvivere in contesti ostili: non opponendo frontalmente alla sollecitazione una ancora maggiore resistenza, cioè pretendendo di mantenere l'equilibrio statico a qualunque costo, ma accettando invece di subire dalla perturbazione alcune conseguenze – quelle che saranno poi più facilmente risarcibili – cercando così di evitare quelle potenzialmente letali. Quindi, allo scatenarsi dell'attacco, prima dispiegare tutte le possibili risposte elastiche – limitare l'esposizione, flettere, deformarsi, dislocarsi per essere meno vulnerabili. Quindi, sacrificare progressivamente parti non vitali, opponendo la minima resistenza all'azione ostile e cercando così di evitare – o quantomeno di posticipare – il collasso rovinoso (Pedersen Zari, 2019).

Un albero sollecitato dal vento fornisce un ottimo esempio di questa strategia: quando la sollecitazione subita degli organi principali – i rami e il tronco – si avvicina al loro limite elastico, foglie e fronde secondarie si lasciano progressivamente strappare dal vento: questo espediente riduce la superficie esposta alla pressione e di conseguenza l'intensità della sollecitazione. Se ancora non basta, il sacrificio si estende a elementi via via più importanti, e persino qualche ramo principale può essere ceduto, pur di salvare il tronco dallo sradicamento, evento massimamente catastrofico, perché pregiudica la possibilità dell'albero di sopravvivere.

Tutto ciò non sempre basta: sollecitazioni di straordinaria intensità possono comunque causare il collasso anche a chi ha scelto di dispiegare al massimo la risposta elastica. I milioni di abeti abbattuti nelle foreste del nord-est dell'Italia dalla tempesta Vaia nell'ottobre 2018 lo dimostrano drammaticamente (Biolchi et alii, 2019). Il rischio che le misure possano rivelarsi inefficaci è inevitabilmente parte dello scenario di incertezza che ci troviamo a fronteggiare, ed evidenzia la necessità di correggere la visione di un futuro antropocentrico che il potere della tecnica consente di modellare e dominare, per adottare invece un atteggiamento più tollerante e collaborativo nei confronti degli altri protagonisti della vita sul pianeta (MacArthur Foundation, 2016).

Mutuando il termine dalla scienza dei materiali, il raffinato comportamento di risposta adattiva alle azioni avverse attuato dai viventi è stato definito 'resiliente' e 'resilienza' la strategia

che lo favorisce, puntando non a salvaguardare a tutti i costi la completa integrità del sistema contro qualunque variazione indotta dal contesto, ma piuttosto a minimizzarne la vulnerabilità, cioè ad assicurare che esso sia in grado di preservare le sue funzionalità vitali, con le minime perdite (Belpoliti, 2013). Così come i cicli biologici nella gestione delle risorse, anche l'attitudine degli organismi viventi ad adottare risposte dinamiche alle azioni perturbative del loro equilibrio si rivela straordinariamente efficace e intrinsecamente efficiente, al punto da proporsi come un paradigma a cui ispirarsi per organizzare il funzionamento anche dei sistemi artificiali (Benyus, 1997).

Firmitas vs facilitas? | Molti argomenti oggi danno forza e motivo a questa prospettiva, che appare di gran lunga più coerente con gli attuali imperativi di sostenibilità ambientale di quanto non lo sia la convenzionale risposta basata sulla resistenza di contrasto alla sollecitazione (Bar-Cohen, 2005). La firmitas tuttavia costituisce un principio fondativo per l'architettura, se non addirittura per la filosofia occidentale, con radici culturali profonde, alimentate dall'assunto che l'artefatto, opera dell'ingegno umano, esprima e legittimi la sua superiorità proprio contrapponendosi alla fragilità, alla mutevolezza e alla provvisorietà di ciò che invece è modulato sui tempi effimeri e sui materiali deperibili della natura (Galimberti, 1999). L'approccio resiliente prefigura dunque un cambio netto di visione rispetto alla lunga tradizione che abbiamo alle spalle, e ciò costituisce il primo rilevante ostacolo alla sua adozione, a cui poi se ne aggiungono numerosi altri sul piano operativo, degli strumenti e delle tecniche, che restano ancora in gran parte da sviluppare. Tra le molteplici implicazioni che conseguono dall'assumere la resilienza come strategia a cui ispirare la concezione degli artefatti, due aspetti emergono come cruciali.

Il primo riguarda la nozione di 'tempo', cioè l'estensione dell'orizzonte entro cui consideriamo che si manifesteranno in futuro gli esiti delle azioni intraprese nel presente, e rispetto al quale proiettiamo l'aspettativa della loro durata in servizio attivo. Quella che la tradizione ci propone, è una latitudine temporale senza limiti e tendenzialmente immutabile, rispetto alla quale va conferita all'opera la capacità di resistere indenne alle avversità, virtualmente per sempre e senza troppo curarsi di quanto costa dotarsi di questa prestazione, essendo il valore dell'oggetto ritenuto largamente prevalente rispetto a quello delle risorse materiali impiegate per realizzarlo (Augé, 2004). Difficile conciliare questa visione con la consapevolezza di futuro estremamente incerto, perché soggetto a cambiamenti dalla portata e dagli effetti non prevedibili, ma presumibilmente molto rilevanti, come ad esempio quelli climatici. Rispetto ai quali non è proponibile di dotare in anticipo il manufatto di tutte le corrispondenti capacità di resistenza per contrasto: per l'ingente quantità di mezzi che ciò richiederebbe di incorporarvi all'origine, a causa dell'assenza di dati sufficienti a prevedere la natura e l'entità delle sollecitazioni che effettivamente esso dovrà fronteggiare, né il momento in cui ciò avverrà.

Invece che di un tempo infinito e immutabile, la strategia resiliente ha necessità di riferirsi a scenari probabilistici, e traggendoli su distanze finite, da cui derivare le variabili di contesto con cui l'opera si potrà trovare ad interagire, insieme a 'set' di ipotesi sulle dimensioni e la eventualità delle loro possibili variazioni. Ciò permetterà di individuare le meccaniche degli eventi perturbativi e gli equilibri del sistema che essi possono pregiudicare, quindi di selezionare i mezzi con cui fronteggiarne gli effetti con una tattica flessibile, e di dotare il manufatto di ciò che serve per praticarla. Cioè mettendolo in condizione di dosare, combinare fra loro e attuare in sequenza azioni di resistenza per contrasto, di attenuazione per deformazione e anche dinamiche estreme di collasso, quanto più possibile parziale e controllato (Gething, 2010).

Un simile scenario sposta il traguardo a cui riferire l'attività di progettazione: invece che puntare alla ottimizzazione della configurazione dell'oggetto rispetto a una condizione attesa, assunta come stabile o comunque prevedibile entro un limitato campo di variazioni, l'obiettivo diventa quello di conferire al manufatto la capacità di adottare diversi efficaci comportamenti resilienti durante la sua vita in servizio, in risposta a sollecitazioni ambientali variabili. Ciò richiede di fornirgli di un'attitudine adattiva, cioè di renderlo capace di risposte dinamiche agli stimoli, mettendo in atto con progressività una gamma di tattiche e azioni proporzionate alla sollecitazione (Oguntona and Aigbavboa, 2017).

La più immediata conseguenza di questo nuovo quadro di requisiti è la domanda emergente di dispositivi mobili da incorporare nei manufatti. La crescente preoccupazione per le implicazioni ambientali rende non più proponibili le risposte basate sulla motorizzazione di grandi elementi convenzionali, e orienta invece la ricerca verso applicazioni biomimetiche, che emulano i comportamenti della materia vivente alla scala nanometrica e quindi producono una marcata e 'automatica' variabilità funzionale, morfologica e spesso anche di aspetto degli oggetti interessati (Persiani, 2019).

In altri termini, il dinamismo non consiste più nell'azione di un attuttore meccanico che, ben nascosto alla vista, apre e chiude a comando una finestra in tutto simile a quelle di sempre, ma in coating fotocromici applicati estesamente sulle superfici di facciata e direttamente azionati dalla radiazione solare incidente, che fa cambiare la trasparenza del vetro fino a renderlo semiopaco (Service, 2018; Fig. 1). Oppure nell'applicazione di schermi solari movimentati da attuatori a cambiamento di fase, che espandendosi e contraendosi per effetto della temperatura dell'aria, regolano l'ombreggiamento della facciata in relazione all'irraggiamento che ricevono (Loonel et alii, 2013; Fig. 2). O ancora, membrane di rivestimento esterno che assumono diverse geometrie al variare della temperatura a cui sono esposte, modificando così la sagoma volumetrica che dell'edificio viene percepita (Maier, 2012; Figg. 3, 4).

L'approccio resiliente non si esaurisce in applicazioni destinate alle pelli: i dissipatori deformabili adottano lo stesso approccio nei confronti delle sollecitazioni sismiche che agiscono sugli edifici, rendendone dinamiche e adattive

proprio le strutture, cioè quanto del manufatto costruito ha più strettamente a che fare con la *firmitas*. (Gonchar, 2016).

Molteplicità delle scale di intervento | Quanto (e spesso persino più) degli artefatti, anche i sistemi naturali sono esposti agli effetti destabilizzanti dei cambiamenti che si stanno verificando, talmente veloci e intensi da non lasciare il tempo ai metabolismi fisiologici di applicare le tipiche tattiche di risposta dinamica, ed esponendoli quindi immediatamente al collasso. Ciò evidenzia il secondo elemento di criticità, che riguarda la necessità tanto di progettare sistemi tecnici resilienti, quanto allo stesso tempo di prendersi cura di quelli naturali, per dotarli di più efficaci capacità di risposta agli eventi catastrofici. Il che non esime, ovviamente, dall'intervenire al più presto sulle cause antropiche accertate di molti di questi eventi, adottando drastiche misure di riduzione delle emissioni climalteranti e azioni strutturali per la riorganizzazione in chiave circolare del sistema economico (Wautelet, 2018).

Tuttavia, se anche fossero adottate massicciamente e senza riserve, come invece ancora non è, queste azioni potranno produrre effetti solo nel medio o lungo periodo, mentre per fronteggiare le emergenze attuali e quelle prossime non resta che moltiplicare le iniziative locali sia di mitigazione degli impatti, che di miglioramento delle capacità resilienti di tutti i sistemi su cui è possibile intervenire (UN, 2015).

Preservare gli equilibri esposti a rischi di collasso e ricostituire quelli sono stati pregiudicati, richiede di fare evolvere metodi e tecniche dell'ingegneria naturalistica verso le *Nature-based Solutions* (NbS), intese come un insieme di pratiche finalizzate a «[...] proteggere, gestire in modo sostenibile e ripristinare ecosistemi naturali o modificati, che affrontano le sfide della società in modo efficace e adattivo, fornendo contemporaneamente benefici per la salute umana e la biodiversità»¹ (Cohen-Shacham et alii, 2016, p. 5). Anche in questo caso, è evidente il cambiamento di prospettiva rispetto agli approcci correnti: l'intento di governare i fenomeni naturali, modellarli e assoggettarli a esigenze contingenti di breve periodo, oggi lascia il posto a un'azione che invece punta ad assecondare le dinamiche dei sistemi naturali, ne assicura le condizioni di funzionamento, li accudisce e se ne prende cura.

Due implicazioni di questa nuova attitudine appaiono particolarmente rilevanti: da un lato, lo spostamento dell'obiettivo sui benefici collettivi di lungo periodo, invece che su immediate utilità da ricavare a vantaggio di chi finanzia e realizza il singolo intervento. Il dibattito intorno alla nozione di 'bene comune' – in campo economico, giuridico e sociologico – evidenzia una distanza destinata ad ampliarsi fra le logiche economiche che continuano a motivare e sostenere l'attuale modello e la necessità di correggerne gli effetti catastrofici sulle risorse del Pianeta e sulle condizioni di vita della maggioranza dei suoi abitanti (Tirole, 2017).

La seconda implicazione riguarda la necessità di adottare una visione multiscalare nella lettura dei fenomeni e un coerente approccio sistemico nella formulazione delle strategie di a-

zione e nella pianificazione degli interventi. Il che implica di disporre quindi di nuove metodiche, tecniche operative, metriche condivise, senza le quali non è possibile determinare credibili bilanci costi/benefici, che costituiscono la condizione essenziale per reperire le indispensabili risorse con cui finanziare le opere, così come per gerarchizzare le priorità e ottimizzare le scelte tecniche. L'evoluzione delle metodiche *Life Cycle Assessment* e la loro estensione verso la valutazione anche degli aspetti sociali (*s-LCA*) rappresenta una delle possibili risposte all'esigenza cruciale di individuare in modo sistematico i molti aspetti in gioco e di definire protocolli per misurarli (UNEP, 2009; Sala et alii, 2015).

Diventa perciò indispensabile considerare, nelle loro relazioni reciproche, sia l'ambito fisico alle diverse scale (le risorse, i materiali, l'edificio, la città, gli ecosistemi, il pianeta) sia quello sociale (la produzione, il consumo, il lavoro, il benessere psicofisico, la mobilità delle persone). L'interdipendenza fra ambito globale e ambito locale dà la misura di quanto l'approccio sia innovativo e dirompente rispetto a un più consueto e rassicurante procedere per settori, funzioni e scale dimensionali ben distinte e gerarchicamente concatenate. Muovono in un una direzione analoga, seppure adottando diverse metodiche, anche altri standard di valutazione della resilienza a supporto alla progettazione degli interventi, come RELi (*REsilience action List*), proposto da Perkins+Will (Eskew+Dumez+Ripple, 2014) o REDI (*Resilience-based Earthquake Design initiative*) for the Next Generation of Buildings, sviluppato da ARUP (2013), entrambi destinati a essere integrati con i più diffusi *Sustainable Building Rating Systems*, come GBC e LEED.

Progettare la Resilienza / Progettare Resiliente | L'imperativo della resilienza, che si afferma come urgente e ineludibile, sfida le teorie e le pratiche del progetto a innovarsi, per trovare risposte adeguate ai cambiamenti in atto e ai problemi nuovi e particolarmente critici che essi inducono. Contribuire allo sviluppo di metriche adeguate alla complessità dei fenomeni è un primo, indispensabile gesto di condivisione della responsabilità sociale che è connaturata con il compito di prefigurare il futuro, al quale gli attori del progetto non possono sottrarsi. Definire metodiche di valutazione efficaci, ovviamente non basta: è indispensabile applicarle, considerandole non un male necessario, né un rituale assoldatorio, quanto un utile mezzo per includere nel processo di progettazione le istanze con cui siamo chiamati a confrontarci. Questo esercizio costringerà probabilmente a mettere in discussione parecchie consuetudini e forse anche qualche consolidata convinzione, ma in cambio stimolerà a trovare sintesi più efficaci fra dimensione formale e requisiti funzionali dei manufatti, e a considerare con maggiore realismo il loro rapporto con il tempo, sia meteorologico che cronologico.

Una seconda conseguenza che il requisito di resilienza induce sulle pratiche del progetto riguarda ancora il rapporto con il tempo, e particolarmente l'estensione della prospettiva con cui guardare all'opera che si concepisce, per

includervi tutta la lunga vicenda della sua vita in esercizio, comprese le avversità a cui potrà essere esposta e le nuove esigenze che dovrà fronteggiare, fino a prefigurarne il processo di uscita dal ciclo di utilizzo e di definitiva dismissione. Le riposte in termini di flessibilità e adattabilità degli spazi sono solo uno degli elementi implicati, a cui oggi si aggiungono le valutazioni connesse ai bilanci ambientali, relativi a tutte le scelte tecniche ed estesi all'intero ciclo di vita dei manufatti. La complessità delle metodiche LCA su cui queste valutazioni si basano giustifica la richiesta di procedure semplificate, ma certo non esonera gli architetti dalla necessità di acquisire il controllo anche di questi aspetti.

Gli strumenti evoluti di modellazione e simulazione predittiva, fra cui il BIM, possono offrire una risorsa preziosa, poiché permettono di integrare la variabile tempo nella prefigurazione progettuale e di considerare le interazioni con le prestazioni degli edifici. A condizione di arricchire i modelli con le informazioni necessarie a simulare i fenomeni che si ritengono interessanti, permettendo così di verificare in anticipo gli effetti delle dinamiche a cui l'edificio potrà essere esposto e di tenerne debito conto nel configurare le opzioni progettuali.

Infine, il tema dei dinamismi adattivi, che danno contenuto molto efficace al comportamento resiliente di un sistema, ma la cui applicazione agli artefatti rischia di scardinare alcuni assunti fondativi fortemente radicati. Se gli 'immobili' non sono più integralmente tali, ma incorporano una varietà di elementi mutevoli per funzione e per aspetto, ciò richiede inevitabilmente qualche conseguente correzione della concezione del progetto. A cominciare da una più accurata identificazione dei diversi oggetti che lo sostanziano, degli assetti che essi potranno assumere nel tempo e quindi delle gerarchie che possono essere introdotte per ordinarli senza snaturarli.

In the last two centuries, and in the past seventy years particularly, the production and consumption of manufactured goods, as well as the inhabitants of the planet, have grown at an exasperated rate. And their needs energy have grown even more intensely. So that the emissions due to the combustion of fossil fuels, together with the reckless withdrawal of every type of ingredient useful for production, have caused very serious disturbances to the global climate, with the now imminent consequence of compromising even the possibility of survival in large areas of the Earth (IPCC, 2014). A similar rate of growth was sustained by taking from the ecosystem much more resources than it was able to reconstitute, with the effect of an overall exhaustion of all available 'stocks' and prospects for an even more critical rarefaction of the most valuable and more demands, such as agricultural land, drinking water, rare minerals, oil, but also forest biomass, with its positive absorption of the carbon present in the atmosphere (IPCC, 2019).

The low efficiency of the processes that are fed with the taken resources dramatically aggravates the consequences of this looting. In

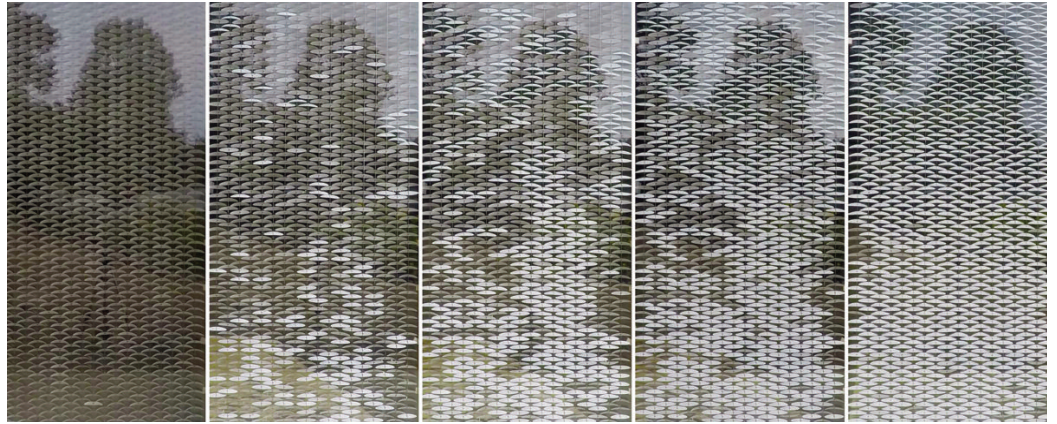


Fig. 1 | InVert™ Self-Shading Windows of TBM Designs LLC (Karen Sabath and Scott Horwitz) use smart thermos-bimetal lamellas inside a standard window cavity to dynamically block solar heat gain and reduce our reliance on energy. Using zero energy and no controls, the individual pieces respond to the sun and curl to block solar radiation from entering the building using up to 15% less air conditioning and reducing greenhouse gas emissions. InVert™ retains high levels of natural daylighting and full-colour spectrum-both essential to human wellness-by using no film on the glass (credits: tbm designs; www.tbm-designs.com).

fact, unlike the biological ones, the technological cycles apply a linear model that focuses only on obtaining, immediately useful benefits from the withdrawn resource, leaving behind a trail of wrecks instead (Georgescu-Roegen, 1971). The residual content in matter and energy of these scraps – often significant – is however unused, since its exploitation is not considered able to generate the economic advantages that the activity aims to achieve, and indeed, to burden it with costs that would reduce its profitability and that are therefore 'outsourced' by downloading them to the community and the environment. In addition, many of these residues are also a direct cause of further perturbations of environmental balances, in particular the releases of non-biodegradable and polluting substances in the atmosphere, soil and water bodies (Jørgensen and Pedersen, 2017).

Since it is systematically replicated for each manufactured unit, the model generates a destabilizing multiplicative effect, which biological metabolisms and natural cycles are not able to mitigate, and which therefore progressively and cumulatively amplifies the impacts on all the ecosystem matrices (Georgescu-Roegen, 2003).

Tolerate deformation | Although it is still opposed by some obstinate denialist, the awareness of the gravity of the situation is documented and widely shared, as is its – at least partial – dependence on human activities (Gore, 2006). If there is now almost general agreement on the causes, on the disruptive nature of the effects and on the urgency to counter them, the opinions on the strategies and the corrective practices to be implemented remain, however, much more varied. The extreme complexity of the theme and its many implications on the founding principles of the current economic system – and the supported social structures – often tend to favour mitigation actions (when not palliative measures) rather than radical corrections. The resulting condition is an extreme and growing fragility of the balance of both biological and technical

systems. Stressed by the impacts of climate change and frequent shortages of vital resources, they are subjected to strong stresses, from time to time more relevant, but equally difficult to predict, to prevent, and even more to face (Pielke, 2013).

In this context, we began to look more closely at the strategies for responding to external stresses that are adopted by living organisms and by not perturbed natural systems. Strategies that are based on reactivity, adaptability, self-repair capability of individual parts and fault tolerance. This approach is the one that has always effectively allowed biological systems to survive in hostile contexts: not by opposing an even greater resistance to the strain, i.e. by pretending to maintain static equilibrium at any cost, but accepting instead to suffer from the perturbation some consequences, trying to avoid potentially lethal ones. Thus, the pattern to be deployed at the outbreak of the attack requires that all possible elastic responses are implemented first – limit exposure, flex, deform, displace to be less vulnerable. Then, the following stage is to progressively sacrifice non-vital parts, opposing the slightest resistance to hostile action and thus trying to avoid – or at least to postpone – the devastating collapse (Pedersen Zari, 2019).

A tree driven by the wind provides an excellent example of this strategy: when the stress suffered by the main organs – the branches and the trunk – approaches their elastic limit, secondary leaves and fronds are progressively torn by the wind. This expedient reduces the surface exposed to pressure and consequently the intensity of the stress. If it is still not enough, the sacrifice extends to more and more important elements, and even some main branches can be given, if this helps to save the trunk from uprooting, a most catastrophic event, as it jeopardizes the possibility of the tree surviving.

All this is not always enough: stresses of extraordinary intensity can still cause collapse even to those who have chosen to deploy the elastic response to the maximum. The millions of fir trees felled in the forests of north-eastern Italy from the Vaia storm in October 2018 demon-

strate this dramatically (Biolchi et alii, 2019). The risk that the measures may prove to be ineffective is inevitably part of the uncertainty scenario we are facing. This provides a further argument against the vision of an anthropocentric future, shaped and dominated thanks to the power of technology, and in favour instead of a more tolerant and collaborative attitude towards the other protagonists of life on the planet (MacArthur Foundation, 2016).

By borrowing the term from the science of materials, the refined behaviour of adaptive response to adverse actions carried out by living beings has been defined as resilience. And so the resilient strategy is defined as the one aiming not at safeguarding at all costs the complete integrity of the system against any variation induced by the context, but rather to minimize its vulnerability, that is to preserve its vital functionality, with the minimum losses (Belpoliti, 2013). As well as the biological cycles in resource management, even the attitude of living organisms to adopt dynamic responses to the perturbative actions of their equilibrium proves to be extraordinarily effective and intrinsically efficient, to the point of proposing itself as a paradigm to inspire also the functioning of the artificial systems (Benyus, 1997).

Firmitas vs facilitas? | Today many arguments give strength and reason to this perspective, which appears far more consistent with the current imperatives of environmental sustainability than is the conventional response based on contrast resistance against strain (Bar-Cohen, 2005). The firmitas, however, is a founding principle for architecture, if not for western philosophy itself, with deep cultural roots, nourished by the assumption that the artefact, as a work of human ingenuity, expresses and legitimizes its superiority precisely by contrasting with the fragility, mutability and temporariness of what is instead modulated on nature's ephemeral times and its perishable materials (Galimberti, 1999). The resilient approach prefigures, therefore, a net change of vision towards the long tradition that we have behind us, and this represents the first important obstacle to its adoption. Moreover, because operational tools and techniques suitable to shape resilient works still remain largely to be developed. Two aspects emerge as crucial among the multiple implications that derive from assuming resilience as a strategy to inspire the conception of artefacts.

The first concerns the notion of time, that is the extension of the horizon within which we consider that the results of the actions undertaken in the present will be manifested in the future, therefore the expectation of their duration in service. The long-established traditional rules are based on a temporal latitude without limits and tendentially unchanging, where the work must resist virtually forever and without caring about how much it costs to adopt this purpose, being the value of the object considered largely prevalent compared to the material resources used to make it (Augé, 2004). It is difficult to arrange this vision with the awareness of an extremely uncertain future, as it is subject to unpredictable changes in scope and

effects, but presumably very significant, such as climate changes. That do not allow to provide the work in advance with all the corresponding contrast resistance capabilities. This is impossible because of the huge amount of resources that would be necessary to incorporate it at the origin, since not enough data is available to predict the nature, nor the extent of the stresses that it will actually have to face, nor the moment when this will happen.

Instead of infinite and immutable time, the resilient strategy needs to refer to probabilistic scenarios, aimed at finite distances, from which to derive the context variables with which the work can be found to interact, together with sets of hypotheses on the dimensions and the eventuality of their possible variations. This will make it possible to identify the mechanics of the perturbative events and the system's balances that they can jeopardize, selecting the means with which to face the effects with a flexible tactic, and equipping the artefact with what is needed to practice it. That is, putting it in a setting to dose, combine and implement in sequence actions of resistance by contrast, attenuation by deformation and even extreme dynamics of collapse, as much as possible partial and controlled (Gething, 2010).

Such a scenario shifts the goal to which the design activity refers: instead of aiming at optimizing the configuration of the object with respect to an expected condition, which is assumed to be stable or otherwise predictable within a limited range of variations, the objective becomes that of giving the building the ability to adopt various effective resilient behaviours during its life in service, in response to variable environmental stresses. This means to introduce an adaptive attitude in the design process (Oguntona and Aigbavboa, 2017).

The growing concern about environmental implications makes no longer feasible the answers based on the motorization of large conventional elements and instead directs researches towards biomimetic applications, which emulate the behaviour of living matter at the nano-scale and therefore produce a broad and 'automatic' variability of the object, involving its functional and morphological features as well as often its aspect (Persiani, 2019).

In other words, the dynamism no longer consists in the action of a mechanical actuator which, well hidden from view, opens and closes a window that is similar to the usual ones, but in photochromic coatings applied extensively on the façade surfaces and directly operated by incident solar radiation, which changes the transparency of the glass to make it semi-opaque (Service, 2018; Fig. 1). Or even in the application of solar screens moved by phase-change actuators, which regulate the shading of the façade in relation to the radiation it receives, thanks to the PCM expansion and contraction, induced by the air temperature (Loonel et alii, 2013; Fig. 2). Or again, external cladding membranes that take on different geometries according to the temperature to which they are exposed, thus modifying the perceived volumetric shape of the building (Maier, 2012; Figg. 3, 4).

The resilient approach does not end in ap-

plications intended to hide: deformable heat sinks adopt the same approach with respect to the seismic stresses that act on buildings, making their structures dynamic and adaptive, that is acting precisely on what has more strictly to do with firmitas (Gonchar, 2016).

Multiple intervention scales | The destabilizing effects of the changes that are taking place also affect natural systems. Equally (and often even more) than artefacts, they are in fact exposed to such fast and intense conditions that they do not allow time for physiological metabolisms to apply the typical tactics of dynamic response, and thus immediately exposing them to collapse. This highlights the second critical element, which concerns both the need to design resilient technical systems, and at the same time to take care of natural ones, to equip them with more effective capabilities to respond to catastrophic events. This does not exempt, obviously, from intervening as soon as possible on the ascertained anthropic causes of many of these events, adopting drastic measures for reducing GHG and structural actions for the circular reorganization of the economic system (Wautelet, 2018).

However, even if they were adopted massively and without reservations – as it is not yet – these actions can only produce effects in the medium or long term. While to deal with current and next emergencies, all that remains is to multiply local initiatives aiming at both mitigating impacts and improving the resilient skills of all the systems on which we can intervene (UN, 2015).

Preserving the balances that are exposed to risks of collapse and reconstituting those have been affected, requires to evolve the methods and techniques of naturalistic engineering towards Nature-based Solutions (NbS). These practices are defined as a set of actions «[...] to protect, sustainably manage, and restore natural or modified ecosystems, that address societal challenges effectively and adaptively, simultaneously providing human well-being and biodiversity benefits»¹ (Cohen-Shacham et alii, 2016, p. 5). The perspective switching with respect to the current approaches is evident in this case too: the intent to govern natural phenomena, to model them and subject them to short-term contingent needs, today gives way to an action that instead aims to support the dynamics of natural systems, ensures their operating conditions and takes care of them.

Two implications of this new attitude seem particularly relevant. On the one hand, the shift of the objective to long-term collective benefits, instead of immediate utilities to be obtained for the benefit of those who finance and carry out the single intervention. The debate around the notion of 'common good' – in the economic, legal and sociological field – highlights an increasing distance between the economic logics that is still supporting the current model and the need to correct its catastrophic effects on both the planet's resources and the living conditions of the majority of its inhabitants (Tirole, 2017).

The second implication concerns the need to adopt a multi-scale vision in the reading of

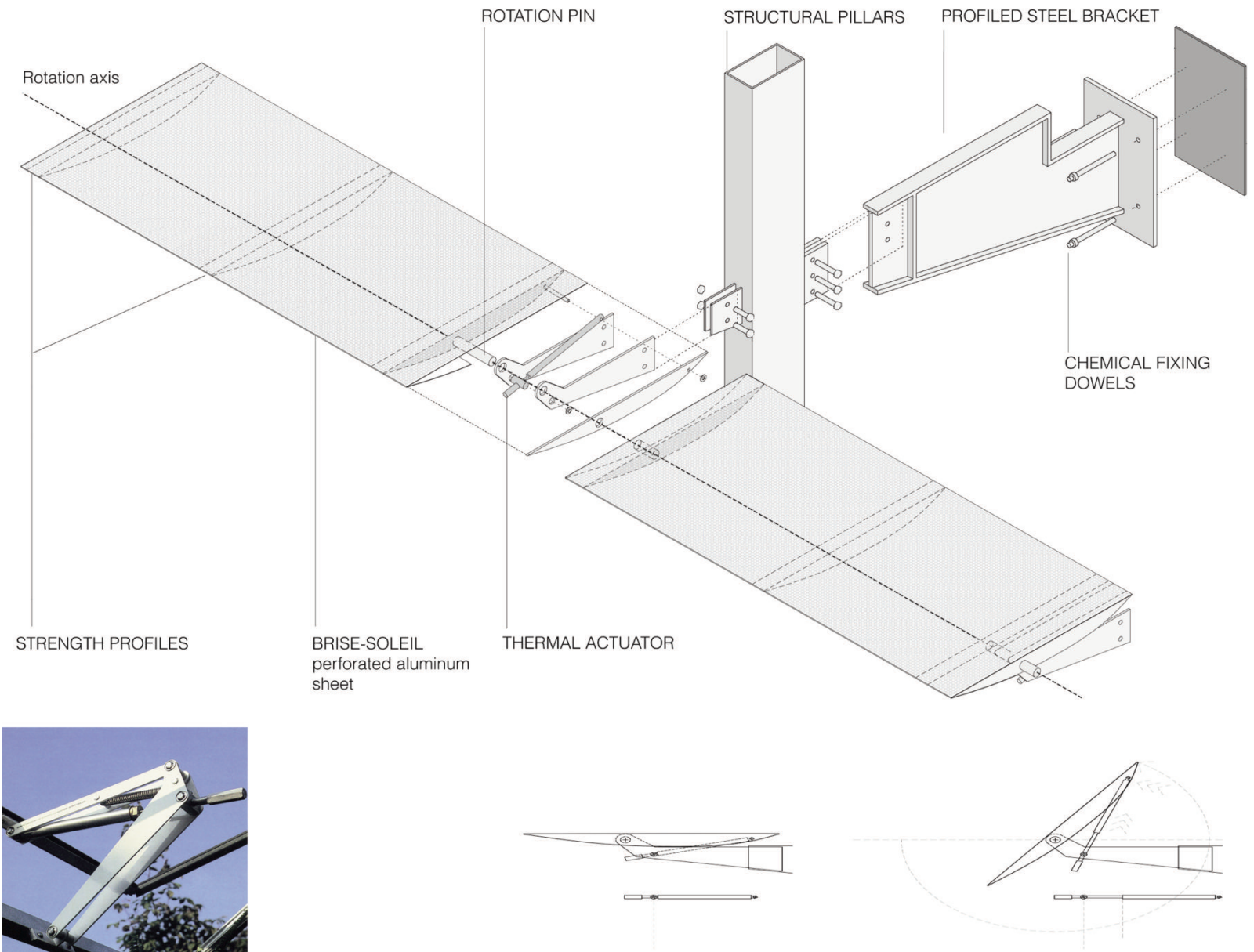


Fig. 2 | Among other Climate Adaptive Building Shells (CABS), this shading system automatically adapts its configuration depending on the external temperature. The expansion of a thermo-active resin sealed inside an aluminium cylinder provides the power to operate the louvers without any additional energy supply. Mk7 model of Bayliss Autovents is designed for aluminium or timber framed vents measuring up to 60 sqcm lifting a load of up to 6 kg. It provides a maximum opening distance of 30 cm and can be set to start opening at approximately 12 °C (credits: Bayliss Autovents; drawings and schemes courtesy of Adele Ricci).

phenomena and a coherent systemic approach in both defining strategies and planning interventions. This implies having new methods, operating techniques, shared metrics, without which it is not possible to determine the credible cost/benefit balances. In fact, they provide an essential condition for finding the indispensable resources with which to finance the works, as well as for hierarchizing and optimizing the technical choices. The evolution of Life Cycle Assessment methods and their extension towards the evaluation of social aspects (s-LCA) represents one of the possible responses to the crucial need to systematically identify the many aspects involved and to define shared protocols to measure them (UNEP, 2009; Sala et alii, 2015).

Consider, in their mutual relations, both the physical environment at different scales (resources, materials, building, city, ecosystems, the planet) and the social one (production, consumption, job, psychophysical well-being, peo-

ple mobility) gives a measure of how innovative and disruptive the approach is with respect to a more customary and reassuring proceeding through very distinct and hierarchically chained sectors, functions and dimensional scales. Other standards of evaluation of the resilience to support the planning of the interventions also move in a similar direction, even if adopting different methods. This is the case, for example, of RELi (REsilience action List), proposed by Perkins+Will (Eskew+Dumez+Ripple, 2014), or that of REDi (Resilience-based Earthquake Design initiative) for the Next Generation of Buildings, developed by ARUP (2013), both designed to be integrated with the most wide-spread Sustainable Building Rating Systems, such as GBC and LEED.

Designing Resilience / Resilient Design | The imperative of resilience, which is affirmed as urgent and inescapable, challenges to innovate the design theories and practices, finding ade-

quate answers to the changes taking place and to the new and particularly critical problems that they induce. Contributing to the development of metrics appropriate to the complexity of phenomena is a first, indispensable act of sharing social responsibility which is inherent with the task of prefiguring the future, to which the project's actors cannot escape. Defining effective evaluation methods is obviously not enough: it is indispensable to apply them, considering them not a necessary evil, nor an absolute ritual, but a useful means to include in the design process the instances with which we are called to confront. This practice will probably force us to question several customs and perhaps even some consolidated conviction, but in return will stimulate finding more effective syntheses between the formal dimension and the functional requirements of the artefacts, and to consider more realistically their relationship with changing time and weather.

The requirement of resilience induces a sec-

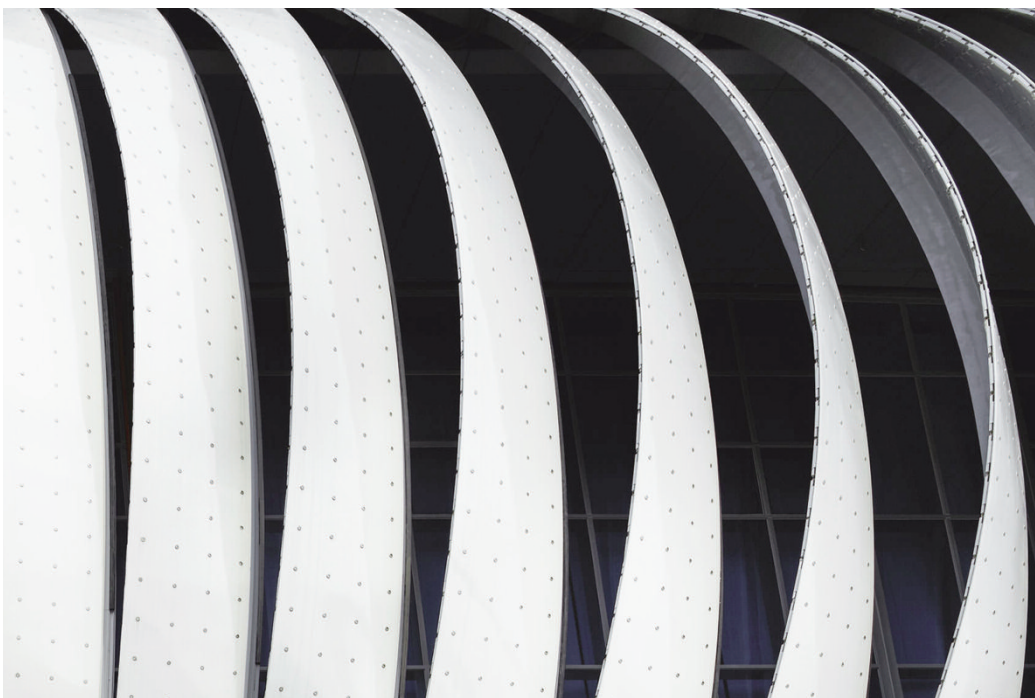


Fig. 3 | The kinetic façade of One Ocean Thematic Pavilion for Expo 2012 Yeosu, South Korea. The façade (140 m long, 3 to 13 m high) consists of 108 kinetic lamellas, which are connected to the building structure at their top and bottom edge. The lamellas are made of glass fibre reinforced polymers (FRP). Actuators on both the upper and lower edge of the blade induce compression forces to create the elastic deformation. Each lamella can be addressed individually, while a computer-controlled bus-system allows the synchronization of the actuators. (credits: Knippers Helbig GmbH – Image; SOMA ZT – Architecture; Knippers Helbig GmbH – Façade Engineering; Ojoo Industrial Co., Ltd. – Lamella façade Contractor).

Fig. 4 | Detail of the kinetic façade of One Ocean Thematic Pavilion for Expo 2012 Yeosu, South Korea (credit: transsolar.com/projects/one-ocean-pavillon-expo-2012).

ond consequence on the practices of the project, which still concerns the relationship with time, and particularly the extension of the perspective with which to look at the work that is being conceived. This horizon will have to fully consider the long future story of the building's operational life, including the adversities to which it may be exposed and the new needs it will, therefore, have to face, to the point of prefiguring the process of leaving the utilization cycle and the final disposal.

The answers in terms of space' flexibility and adaptability are only a small part of the task: the assessments relating to the environmental balances must be added, concerning all the design choices and extended to the entire life cycle of the artefacts. The complexity of the LCA methods on which these assessments are based justifies the request for simplified protocols, but certainly does not exempt architects from the need to acquire control even of these aspects.

Advanced modelling and predictive simulation tools, including BIM, can offer a valuable resource since they allow integrating the time variable into the design prefiguration and considering its interactions with building performances. This on the condition of enriching the models with the information necessary to simulate the phenomena that the architects are interested in, thus allowing to verify in advance the effects of the dynamics to which the build-

ing can be exposed and to take due account of it in configuring the design options.

Finally, the adaptive dynamisms, which constitute an effective resource for giving content to the resilient behaviour of a system, but whose application to artefacts risks undermining some strongly rooted foundations. If the

buildings are no longer completely immovable but incorporate a variety of elements with mutable function and appearance, this inevitably requires some consequent correction of the design practices. Starting with more accurate identification of the different objects that substantiate it, of the structures that they will be

able to assume over time and therefore of the hierarchies that must be introduced to order them without distorting them.

Note

1) This definition is formally included in the WCC-2016-Res-069-EN, which was approved during the World Conservation Congress 2016 of IUCN – The International Union for Conservation of Nature. [Online] Available at: portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2016_RES_069_EN.pdf [Accessed 25 November 2019].

References

- ARUP (2013), *REDI Rating System – Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings*. [Online] Available at: www.arup.com/perspectives/publications/research/section/redi-rating-system [Accessed 25 November 2019].
- Augé, M. (2004), *Rovine e macerie – Il senso del tempo* [orig. ed. *Le temps en ruines*, 2003], Bollati Boringhieri, Torino.
- Bar-Cohen, Y. (ed.) (2005), *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*, CRC Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton (US).
- Belpoliti, M. (2013), “Resilienza: l’arte di adattarsi”, in *Domenica del Sole24 Ore*, newspaper, 18 December 2013.
- Benyus, J. M. (1997), *Biomimicry – Innovation Inspired by Nature*, William Morrow & Co, New York (US).
- Biolchi, S., Denamiel, C., Devoto, S., Korbar, T., Macovaz, V., Scicchitano, G., Vilibić, I. and Furlani, S. (2019), “Impact of the October 2018 Storm Vaia on Coastal Boulders in the Northern Adriatic Sea”, in *Water*, vol. 11, issue 11, 2229, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w11112229 [Accessed 27 November 2019].
- Cohen-Shacham, E., Janzen, C., Maginnis, S. and Walters, G. (2016), *Nature-based solutions to address global societal challenges*, IUCN, Gland. [Online] Available at: doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en [Accessed 25 November 2019].
- Eskew+Dumez+Ripple (2014), *A framework for Resilient Design*. [Online] Available at: www.eskewdumezripple.com/assets/pdf/Fellowship/A%20Framework%20for%20Resilient%20Design.pdf [Accessed 25 November 2019].
- Galimberti, U. (1999), *Psiche e Techne – L’uomo nell’età della tecnica*, Feltrinelli, Milano.
- Georgescu-Roegen, N. (2003), *Bioeconomia – Verso un’altra economia ecologicamente e socialmente sostenibile*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Georgescu-Roegen, N. (1971), *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts (US).
- Gething, B. (2010), *Design for future climate – Opportunities for adaptation in the built environment*, Technology Strategy Board – Driving Innovation. [Online] Available at: www.arcc-network.org.uk/wp-content/D4FC/01_Design-for-Future-Climate-Bill-Gething-report.pdf [Accessed 25 November 2019].
- Gonchar, J. (2006), “One Project, but Many Seismic Solutions.”, in *Architectural Record*, vol. 05, pp. 167-176. [Online] Available at: www.architecturalrecord.com/ext/resources/archives/backissues/2006-05.pdf?1146456000 [Accessed 20 November 2019].
- Gore, A. (2006), *An Inconvenient Truth – The Planetary Emergency of Global Warming and What We Can Do About It*, Rodale Press, Emmaus (US).
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019), *Climate Change and Land – An IPCC special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, IPCC, Geneva. [Online] Available at: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Edited-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf [Accessed 20 November 2019].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), *AR5 Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, New York (US). [Online] Available at: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_frontmatter.pdf [Accessed 20 November 2019].
- Jørgensen, S. and Pedersen, L. J. T. (2017), *RESTART Sustainable Business Model Innovation*, Part of the Palgrave Studies in Sustainable Business in Association with Future Earth book series (PSSBAFE), Palgrave Macmillan-Springer Nature Switzerland, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-91971-3 [Accessed 29 November 2019].
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D. and Hensen, J. L. M. (2013), “Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 483-493. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016 [Accessed 29 November 2019].
- Maier, F. (2012), “One Ocean. Thematic pavilion for EXPO 2012”, in *Detail-online*. [Online] Available at: www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/ [Accessed 25 November 2019].
- Oguntona, O. A. and Aigbavboa, C. O. (2017), “Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry”, in *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2491-2497. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.188 [Accessed 18 November 2019].
- Pedersen Zari, M. (2019), “Biomimetic Materials for Addressing Climate Change”, in Martínez, L., Kharisova, O. and Kharisov, B. (eds), *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing, Cham, pp. 3169-3191. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_134 [Accessed 18 November 2019].
- Persiani, S. (2019), *Biomimetics of Motion – Nature-Inspired Parameters and Schemes for Kinetic Design*, Springer Nature-Springer International Publishing, Cham. [Online] Available at: [10.1007/978-3-319-93079-4134](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93079-4134) [Accessed 18 November 2019].
- Pielke, R. A. (2013), *Climate Vulnerability – Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*, Academic Press-Elsevier, Amsterdam. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.12001-5 [Accessed 18 November 2019].
- Sala, S., Vasta, A., Mancini, L., Dewulf, J. and Rosenbaum, E. (2015), *Social Life Cycle Assessment – State of the art and challenges for supporting product policies*, European Commission, Joint Research Centre, Institute of Environment and Sustainability, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2788/253715 [Accessed 20 November 2019].
- Service, R. F. (2018), *New smart windows darken in the sun—and generate electricity at the same time*. [Online] Available at: www.sciencemag.org/news/2018/01/new-smart-windows-darken-sun-and-generate-electricity-same-time [Accessed 28 November 2019].
- Tirole, J. (2017), *Economia del bene comune* [orig. ed. *Economie du bien commun*, 2016], Mondadori, Milano.
- UN (2015), *COP21, Paris Agreement under the United Nations Framework on Climate Change*. [Online] Available at: unfccc.int/documents/9097#eq-1 [Accessed 20 November 2019].
- UNEP – United Nations Environment Programme (2009), *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. [Online] Available at: www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2009%20-%20Guidelines%20for%20sLCA%20-%20EN.pdf [Accessed 22 November 2019].
- Wautelet, T. (2018), *The Concept of Circular Economy: its Origins and its Evolution*. [Online] Available at: doi.org/10.13140/RG.2.2.17021.87523 [Accessed 25 November 2019].