



## I DYNAMERS COME ESEMPIO DI EVOLUZIONE TECNOLOGICA E CONCETTUALE DELLA CHIMICA

*Il campo dei dynamers, polimeri dotati di proprietà dinamiche e adattive, è sintomatico dell'evoluzione che la disciplina chimica sta subendo sia sul piano tecnologico, sia su quello epistemico. Riguardo a quest'ultimo, discuteremo come l'approccio supramolecolare e l'identificazione dei sistemi chimici con sistemi informazionali stiano contribuendo a modificare l'identità disciplinare della chimica.*

Il campo dei polimeri dinamici rappresenta una delle evoluzioni più interessanti della chimica dei polimeri, grazie alle proprietà intrinsecamente dinamiche e adattive che caratterizzano questi sistemi. Questa classe di polimeri, normalmente designati come *dynamers* (dynamic polymers) include due grandi sottoclassi: i dynamers molecolari covalenti (generati per policondensazione e caratterizzati da legami covalenti reversibili) e i dynamers supramolecolari non covalenti (generati per poliasociazione di unità monomeriche caratterizzate da motivi di riconoscimento molecolare complementari) [1, 2]. Le due sottoclassi trovano una sintesi nei dynamers duali, che incorporano entrambi i tipi di interazioni (covalenti e intermolecolari) (Fig. 1). La combinazione di unità strutturali di svariato tipo e geometria può portare alla formazione di architetture complesse mediante fenomeni di auto-assemblaggio, promossi da meccanismi di riconoscimento molecolare e da fattori termodinamici. Ad esempio, a seconda della natura delle unità costitutive, si possono ottenere dynamers supra-

molecolari lineari, a colonna (columnar/stacked), ramificati (branched) e laterali. Ulteriori possibilità nascono dalla combinazione tra polimeri e ioni metallici, a formare metallodynamers, oppure dalla progettazione di analoghi dinamici di biopolimeri, i biodynamers (analoghi di acidi nucleici, di carboidrati o di peptide e proteine). Le svariate classi di polimeri sono dotate di differenti gradi di dinamicità e di adattabilità. È proprio il carattere reversibile dei legami (primari e/o secondari) presenti in questi sistemi ad essere responsabile del loro precipuo carattere dinamico.

Questa nuova classe di materiali deriva dall'evoluzione di quella che Jean-Marie Lehn ha battezzato *constitutional dynamic chemistry* (CDC), intendendo così designare quel vasto spazio di indagine della chimica che consente di generare nuove specie chimiche a partire dall'assemblaggio reversibile di semplici elementi costitutivi, sotto controllo termodinamico e/o cinetico, grazie a meccanismi di autoselezione e auto-assemblaggio [2]. L'estensione di questa linea di pensiero alla scienza dei materiali, e in particolare ai polimeri, ha portato allo sviluppo di *constitutionally dynamic materials* (CDM) che, grazie alla loro capacità di scambiare, riarrangiare o incorporare reversibilmente componenti aprono nuove prospettive per la progettazione di materiali e dispositivi funzionali, con proprietà

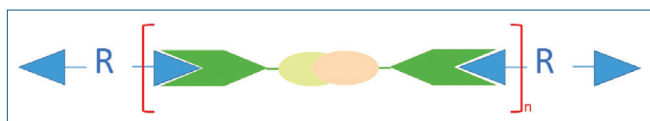


Fig. 1 - Rappresentazione stilizzata di un dynamer lineare contenente legami reversibili (covalenti e intermolecolari)

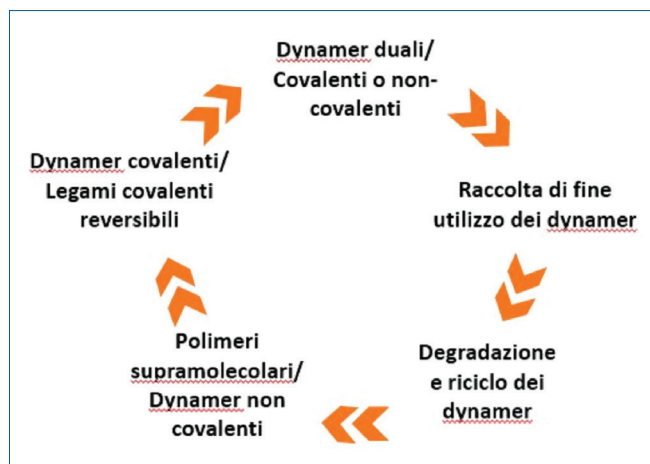


Fig. 2 - Esempio di ciclicità nell'utilizzo delle diverse componenti dei dynamers (modificato da [1])

innovative rispetto ai materiali più tradizionali e 'statici', quali ad esempio capacità adattive [1]. La letteratura recente riporta vari esempi di questi materiali [3, 4], capaci di rispondere a stimoli esterni o fattori ambientali, quali calore, luce, additivi chimici, e di esibire proprietà quali l'autorigenerazione, la regolazione delle proprietà meccaniche e ottiche (ad esempio, la comparsa e la modulazione di una chiralità supramolecolare responsiva [5]), la biodegradabilità e la degradabilità ambientale [2]. Ad esempio, i CDM potrebbero contribuire a ridurre l'impatto ambientale dei materiali plastici, grazie alla loro intrinseca riciclabilità (Fig. 2).

Secondo Kataria *et al.* si sta realizzando "un passo avanti verso una piattaforma trasformativa in cui materiali adattivi, scalabili e sostenibili alimentano la prossima generazione di tecnologie" [5].

Lehn sottolinea che lo sviluppo di materiali polimerici responsivi, fondati sulla possibilità di *controllare e governare legami primari e secondari*, secondo un approccio *bottom-up* alla chimica, è responsabile di un cambio di paradigma: "I dynamers stanno portando un *cambiamento paradigmatico* non solo nella ricerca nel campo della scienza dei materiali, ma anche in un ampio campo di applicazioni che vanno dai materiali autorigeneranti ai materiali polimerici biocompatibili" [1]. Il cambio di paradigma al quale Lehn si riferisce investe l'aspetto 'tecnico-disciplinare' della chimica e della scienza dei materiali: è infatti evidente che lo sviluppo di materiali con caratteristiche innovative contribuisce ad ampliare il campo di azione della chimica,

al crocevia con altre discipline: "L'esplorazione dei dynamers [...] si è evoluta in un *campo interdisciplinare della scienza dei materiali* orientato verso materiali e tecnologie adattivi, alla *triplice interfaccia* tra costituzione chimica, proprietà dei materiali e applicazioni biologiche" [1].

Tuttavia, se è in corso un cambio di paradigma, quest'ultimo non riguarda soltanto gli aspetti tecnici della disciplina chimica, ma ne investe anche il dominio *epistemico*. Ci riferiamo in particolare a tre aspetti che sono *impliciti* negli approcci innovativi fin qui menzionati:

- 1) il focus sul ruolo *chimico* delle interazioni intermolecolari e l'enfasi sulla *dinamicità* dei sistemi. Questo slittamento di prospettiva porta a identificare la chimica come scienza che *governa e controlla* le interazioni interatomiche (secondo una prospettiva prevalentemente microscopica o *bottom-up*), ossia come *scienza di processi* più che come *scienza di enti* (atomici e molecolari);
- 2) l'ampliamento del *concetto di struttura* dal piano molecolare a quello supra-molecolare e il rilievo acquisito dal concetto di *funzione*, che diventa un concetto-guida (ad esempio, nello sviluppo di materiali o macchine molecolari capaci di specifiche finalità), il quale si collega gerarchicamente a quello di *architettura* (supramolecolare) e di *struttura* (molecolare);
- 3) la concettualizzazione della chimica come scienza della materia informata (science of informed matter) e dei sistemi chimici come sistemi portatori di informazione.

Nei passi successivi tenteremo di discutere ciascuno di questi tre asserti, alla luce di considerazioni tratte dalla letteratura e della tesi secondo la quale l'identità disciplinare della chimica non è statica, ma evolve nel tempo, in relazione a sollecitazioni di natura interdisciplinare, culturale, sociale ed economica.

## La chimica come scienza di processi

Ci riferiamo ancora alle parole di Lehn, il quale individua lo scopo della chimica supramolecolare nella necessità (e nella capacità) di controllare i legami intermolecolari: "domare (*to tame*) e sfruttare (*to harness*) le forze intermolecolari non covalenti" [2]. L'intrinseca labilità delle interazioni secondarie non viene più vista come un limite, da contrapporre alla



persistenza delle strutture molecolari, ma diventa una risorsa per generare sistemi chimici dinamici, la cui stabilità può essere controllata grazie a fattori termodinamici e cinetici. I dynamers, con le loro interazioni reversibili, sono espressione di questa visione. Del resto, tutta la *constitutional dynamic chemistry* poggia su meccanismi di riconoscimento molecolare e di auto-assemblaggio, ispirati ai sistemi biochimici, che - secondo Bensaude-Vincent [6] - rappresentano un'estensione adattiva del modello chiave-serratura in quanto "a differenza del modello statico di riconoscimento chiave-serratura, che presuppone l'identificazione preventiva del bersaglio corretto, in questo processo la serratura e la chiave si selezionano a vicenda, attraverso un processo casuale di interazioni". Secondo Bensaude-Vincent [6], Lehn ha ripensato la chimica come scienza il cui scopo è *controllare i fattori che guidano l'auto-organizzazione molecolare*, a partire dall'idea che "dal comportamento collettivo delle molecole emerge qualcosa che è il risultato di processi di accoppiamento, piuttosto che la semplice espressione delle informazioni contenute nei componenti". In questa prospettiva, il focus disciplinare della chimica subisce dunque uno slittamento: dalle sostanze macroscopiche e le loro trasformazioni, alle molecole e supramolecole, ossia dal *top-down* al *bottom-up*; dagli enti molecolari ai processi che ne consentono l'organizzazione spaziale e temporale e che determinano l'emergere di proprietà nuove; da una visione disciplinare classica, focalizzata sugli enti (macroscopici e microscopici, ossia le sostanze e le molecole) ad una visione complessa, focalizzata sulle relazioni *dentro* e *tra* di essi.

### Struttura, architettura, funzione

Questo nuovo modo di guardare alla chimica necessita di una terminologia *ad hoc*: il concetto di struttura, pur restando protagonista della storia disciplinare della chimica, non basta più. Ecco allora comparire espressioni quali "architettura supramolecolare" e "supramolecular assembly" che si pongono in rapporto gerarchico con la struttura molecolare. La metafora architettonica emerge in tutta la sua chiarezza nelle parole di Lehn [7]: "La progettazione di sistemi artificiali, abiotici in grado di esplicitare *processi di massima efficienza e selettività*

richiede la corretta manipolazione delle caratteristiche energetiche e stereochemiche delle forze intermolecolari non covalenti (interazione elettrostatica, legame idrogeno, forze di van der Waals ecc.) all'interno di una definita *architettura molecolare*". Questo passo è particolarmente interessante in quanto mette in evidenza il nesso tra architettura e funzione. Il focus sulle proprietà funzionali emerge in modo potente nella progettazione di materiali responsivi o auto-riparanti, ma era già presente nelle macchine molecolari [8] e deriva da un modo di pensare i sistemi chimici che la nostra disciplina ha probabilmente mutuato dalla biologia. La funzione si esprime in molti modi e rappresenta il fine ultimo della progettazione supramolecolare: "Il riconoscimento, la reattività e il trasporto rappresentano le tre caratteristiche funzionali fondamentali delle specie supramolecolari" [7]. All'imitazione del mondo biologico i chimici devono, almeno in parte, anche l'emergere di pratiche eco-sostenibili, che si traducono in vantaggi di natura tecnologica: "L'autoassemblaggio è onnipresente nei sistemi viventi ed è estremamente vantaggioso dal punto di vista tecnologico perché è un processo spontaneo e reversibile con pochi o nessun rifiuto e un ampio campo di applicazioni" [6].

Tornando alla metafora architettonica, la sua efficacia e il suo successo sono stati tali da entrare perfino nel linguaggio del giornalismo scientifico. Piero Bianucci, nel commentare il premio Nobel per la Chimica 2025 (che è figlio di questo tipo di pensiero) scrive: "Il Nobel premia non solo un materiale, ma *un modo nuovo di pensare la materia*. La chimica dei MOF nasce dall'idea che *si possano progettare strutture molecolari come edifici*, scegliendo mattoni e travi. È una rivoluzione paragonabile a quella del DNA per la biologia: *anche la materia può essere scritta e programmata*" [9].

Quest'ultima osservazione ci guida verso il terzo punto della nostra discussione: la concezione dei sistemi chimici come sistemi informativi.

### La chimica come scienza della materia informata

L'idea che un sistema chimico possa essere pensato come sistema informativo risale agli anni '60, ossia al tempo dello sviluppo delle prime teorie dell'informazione, ma anche della strutturistica biochimica: è famoso il lavoro di Zuckerkandle e

Pauling sulle “semantophoretic molecules” [10]. Tuttavia, è solo più tardi che si comincia a pensare alla chimica non solo come scienza della struttura e delle trasformazioni della materia, ma come scienza dell’informazione (the *science of informed matter*, [2]).

Secondo questa visione, l’organizzazione strutturale dei sistemi chimici costituisce un vero e proprio *sistema semiotico* autonomo che consente lo stoccaggio, il recupero, il trasferimento e la processazione di informazione a livello molecolare e supramolecolare, grazie a processi di riconoscimento e auto-organizzazione. È così che nascono i concetti di informazione chimica attiva e passiva [7] e di sistemi chimici programmati (*programmed chemical systems*), intesi come “sistemi in grado di generare, in modo spontaneo ma controllato, architetture supramolecolari ben definite, organizzate e funzionali mediante autoassemblaggio dei loro componenti molecolari, sulla base delle informazioni molecolari memorizzate nella struttura covalente dei componenti ed elaborate a livello supramolecolare attraverso specifici algoritmi di interazione non covalente” [6]. La dimensione relazionale di questi sistemi è talmente fondamentale da spingere Lehn ad esclamare: “È una sorta di sociologia molecolare!” [7].

A questo proposito, ci pare interessante riportare i rilievi della filosofa Evelyn Fox Keller sugli scritti di Lehn. Fox Keller osserva che l’informazione processata per via chimica non va intesa alla maniera di Shannon (*entropic information*, che è astratta e oggettivabile). Al contrario, secondo Fox Keller, l’informazione mediata dalla chimica va intesa nel senso proposto da Bateson [11], ossia una informazione intrinsecamente incorporata nella materia (*inherently embodied*, [12]) che può essere definita informazione efficace (*effective information*). La differenza è fondamentale, in quanto l’informazione di Shannon è indipendente dal contesto, mentre l’informazione efficace “è una proprietà sia delle dinamiche interne di quel sistema sia della sua relazione con l’ambiente circostante”, dunque è fortemente dipendente dal contesto molecolare e supramolecolare [12]. L’informazione significativa, nel senso inteso da Lehn, comporta processi di riconoscimento di schemi (*pattern recognition*), ossia un riconoscimento intrinseco di significati: ciò

implica che il *locus* dell’informazione efficace siano proprio le interazioni *dentro* e *tra* le molecole. La conclusione di Fox Keller è che la capacità di un sito molecolare di essere informativo non risiede intrinsecamente nel sito stesso, ma nella sua potenzialità di interagire con altre molecole: “se dobbiamo parlare di informazione efficace che viene immagazzinata, dovremmo dire che essa è *contenuta nelle relazioni, nelle interazioni, nel contesto materiale (embodied context) di quelle molecole*” [12]. In ciò risiede il senso profondo della “sociologia molecolare” citata da Lehn poco sopra.

## Conclusione

Da chimici, siamo abituati a concepire la nostra disciplina come una ‘conoscenza attraverso il fare’. Questo è sicuramente un segno distintivo delle pratiche conoscitive della chimica; tuttavia, quelle pratiche sono illuminate e guidate dal nostro modo di pensare la materia, che inevitabilmente risente della evoluzione culturale e del pensiero (scientifico e non).

Attraverso l’analisi di vari passi degli scritti di Lehn e collaboratori, così come attraverso le parole di alcuni filosofi e storici della chimica, ho voluto suggerire che la disciplina chimica, intesa come *forma strutturata di pensiero sulla materia* è in continua evoluzione. Segni di questa evoluzione sono le mutate modalità attraverso le quali i chimici si rapportano al mondo microscopico atomico-molecolare, non soltanto sul piano pratico, ma anche su quello speculativo. Tant’è che oggi la chimica ha abbandonato una visione puramente passiva della materia e la concepisce in modo attivo, contribuendo in tal modo a colmare la distanza tra materia inanimata e materia vivente. Questi cambi di paradigma, secondo le parole stesse di Lehn, “influenzeranno *profondamente la nostra percezione della chimica, il modo in cui la concepiamo e la mettiamo in pratica*” [7], a segnalare che - proprio come la materia - anche l’identità della disciplina chimica è dinamica e in costante evoluzione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Roy, V. Schadler, J.-M. Lehn, *Acc. Chem. Res.*, 2024, **57**, 349.
- [2] J.-M. Lehn, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, **54**, 3276, DOI: [10.1002/anie.201409399](https://doi.org/10.1002/anie.201409399)



- [3] Q. Zhang, V. Nicu *et al.*, *Nature Chemistry*, 2025, **17**, 1462, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41557-025-01947-0>
- [4] G. Clark, R. Egan (Eds.), 2025, <https://phys.org/news/2025-10-shanghai-tower-synthetic-dynamic-helical.html>
- [5] M. Kataria, S. Seki, *Chem. Eur. J.*, 2025, **31**, e202403460, DOI: [doi.org/10.1002/chem.202403460](https://doi.org/10.1002/chem.202403460)
- [6] B. Bensaude-Vincent, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the History of Chemistry (Euchems), Louvain (Belgio), 2008, 53.
- [7] J.-M. Lehn, Resonance-75: Promoting Science Education, Vol. II, Indian Academy of Sciences Bengaluru, India, 2022, 3.
- [8] V. Balzani, A. Credi, M. Venturi, *Molecular Devices and Machines - A Journey into the Nano World*, Wiley, 2003, DOI: [10.1002/3527601600](https://doi.org/10.1002/3527601600)
- [9] P. Bianucci, 2025, <https://www.pierobianucci.it/la-chimica-non-e-piu-solo-trasformazione-ma-rigenerazione-mof/2025>
- [10] E. Zuckerkandl, L. Pauling, *J. Theor. Biol.*, 1965, **8**(2), 357, DOI: [10.1016/0022-5193\(65\)90083-4](https://doi.org/10.1016/0022-5193(65)90083-4).
- [11] G. Bateson, *Steps to an ecology of mind*, University of Chicago Press, Chicago, 2000.
- [12] E. Fox Keller, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 2011, **42**, 174.

### Dynamers as an Example of the Technological and Conceptual Evolution of Chemistry

The field of dynamers, polymers with dynamic and adaptive properties, is symptomatic of the evolution that chemistry is undergoing both at the technological and the epistemological level. With regard to the latter, we will discuss how the supra-molecular approach and the identification of chemical systems with informational systems are in fact changing the disciplinary identity of chemistry.

# Chemistry Europe Fact Sheet

16 chemical societies, 15 European countries.  
Family of high-quality scholarly chemistry journals,  
covering a very broad range of disciplines.

Evaluate, publish, disseminate, and amplify the scientific  
excellence of chemistry researchers from around the globe  
in high-quality publications.

Societies:  
[www.chemistryviews.org/  
chemistry-europe-member-societies/](http://www.chemistryviews.org/chemistry-europe-member-societies/)

Hub:  
[www.chemistry-europe.org](http://www.chemistry-europe.org)

Association

Mission

3 per year, free

Newsletter



Chemistry  
Europe

Science  
news  
magazine

*ChemistryViews*

What is happening in  
the global chemistry  
community

[www.chemistryviews.org/register/](http://www.chemistryviews.org/register/)

[www.chemistryviews.org](http://www.chemistryviews.org)

Recognizes members for their outstanding  
achievements.

Fellows  
Program

Award

Recognizes outstanding  
contributions to chemistry.

[www.chemistryviews.org/fellows/](http://www.chemistryviews.org/fellows/)

[www.chemistryviews.org/chemistryeuropeaward/](http://www.chemistryviews.org/chemistryeuropeaward/)

  
@ChemEurope

Hub:  
[www.chemistry-europe.org](http://www.chemistry-europe.org)

  
[linkedin.com/company/  
chemeurope/](https://www.linkedin.com/company/chemeurope/)