

Davide M. Proserpio

Dipartimento di Chimica

Università degli Studi di Milano

davide.proserpio@unimi.it

UNA NUOVA OCCASIONE: PRUDENZA SÌ, GENERALIZZAZIONI NO

Caro Direttore,

ho letto con interesse la rubrica “La chimica allo specchio” di Claudio Della Volpe intitolata «Una nuova occasione, non sprechiamola!» a chiusura del n. 4/2026 dedicato ai MOF. Condivido pienamente l’idea che un materiale destinato a un’applicazione industriale debba essere valutato anche in termini di sicurezza, sostenibilità, costo e impatto ambientale.

Credo però che queste preoccupazioni vadano collocate in un contesto corretto. La ricerca fondamentale sui nuovi materiali deve seguire un iter rispetto al quale i problemi applicativi devono occupare passaggi successivi: prima identifica nuovi concetti e nuove proprietà, poi seleziona i materiali che meritano di essere sviluppati e, solo a quel punto, affronta le problematiche legate alla loro traduzione tecnologica.

I MOF rappresentano un esempio emblematico di questo percorso. Sicurezza, destino ambientale, riciclabilità, costi e condizioni di produzione vanno quindi sì considerati, però serve un quadro completo. Il rischio è passare dalla giusta prudenza a una generalizzazione: problemi reali per alcuni MOF, alcune forme o alcuni impieghi vengono presentati come limiti dell’intera classe.

Un MOF, infatti, non è una sostanza unica, ma una piattaforma di progettazione. Cambiando nodo metallico, linker, topologia, dimensione dei pori, funzionalizzazione e forma macroscopica si ottengono materiali con proprietà molto diverse [1, 2]. Un adsorbente immobilizzato in una colonna, una membrana, un elettrodo e una nanoparticella destinata all’uso biomedico non possono essere valutati con lo stesso modello di rischio: cambiano funzione, dose, esposizione e possibilità di rilascio. La stabilità in acqua è un buon esempio. È vero che diversi MOF, soprattutto alcuni sistemi metal-

lo-carbossilato non ottimizzati, possono idrolizzarsi o perdere porosità. Ma la ricerca non è rimasta ferma. Una review del 2024 raccoglie criteri razionali e numerosi esempi di MOF stabili in acqua per la cattura della CO₂ [3]. Il caso CALF-20 è particolarmente significativo: lavora con correnti umide, resiste a cicli severi e può essere prodotto in lotti multichilogrammo [4]. Non significa che ogni MOF sia pronto per l’industria; significa che l’instabilità non è un destino inevitabile della classe.

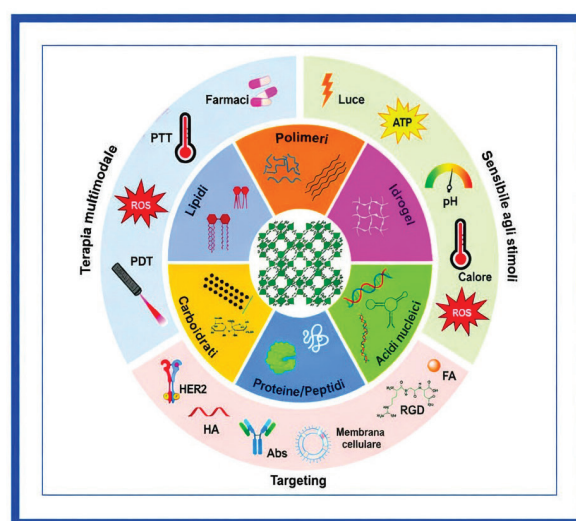
Anche idrofilicità e conducibilità vanno lette in funzione dell’applicazione. Un materiale può es-

04 LUGLIO/AGOSTO

anno X - N° 4 - 2026

Chimica & Industria online

Organo Ufficiale della Società Chimica Italiana



I MOF in applicazioni di interesse industriale

ISSN 2283-544X

sere stabile in acqua senza doverla adsorbire in grandi quantità; nella separazione della CO₂, anzi, un'eccessiva affinità per l'acqua può diventare uno svantaggio. Allo stesso modo, la bassa conducibilità è un limite per elettrodi ed elettrocatalisi, non per l'adsorbimento o la separazione di gas. Quando serve, esistono reticoli intrinsecamente conduttivi e materiali compositi: nel 2024 il polimero di coordinazione bidimensionale Cu₃BHT ha mostrato comportamento metallico e conducibilità dell'ordine di 10³ S cm⁻¹ [5]. Gli ibridi MOF/MXene sono quindi una strada promettente [6], ma non una correzione necessaria per tutti i MOF. Essi vanno studiati come materiali nuovi, perché anche gli MXeni presentano criticità proprie, tra cui *restacking* e degradazione ossidativa.

È fondata anche l'osservazione sulle polveri microcristalline: da sole sono spesso poco adatte a un impianto. Ma questo è un problema di ingegnerizzazione, non una condanna definitiva. I MOF vengono oggi trasformati in pellet, monoliti, film, membrane e compositi. Nel 2024 è stata dimostrata la fabbricazione *roll-to-roll* di membrane a base di MOF lunghe 35 metri [7]. Una recente *perspective* ha inoltre definito con chiarezza i passaggi che separano il laboratorio dal mercato - sintesi, formatura, lavaggio e attivazione, prototipazione e conformità - mentre una review ha riassunto metodi e criteri per la produzione su larga scala [8, 9]. Per MIL-100(Fe), una valutazione tecnico-economica basata su sintesi portate a scala pilota stima, in condizioni selezionate, costi inferiori a 30 dollari al chilogrammo [10]. Sono risultati specifici, non garanzie universali, ma mostrano che scale-up e costo sono problemi affrontabili, non proprietà immutabili dei MOF.

La tossicità resta il punto sul quale la prudenza deve essere massima, soprattutto in biomedicina. Per molti candidati mancano ancora dati solidi su biodistribuzione, degradazione ed escrezione, e nessun materiale può essere dichiarato biocompatibile per semplice analogia. Tuttavia, anche qui serve precisione. IUPAC considera improprio usare l'espressione «metallo pesante» come sinonimo automatico di tossicità [11]: zinco, cromo e cadmio non costituiscono un gruppo tossicologico omogeneo, e contano specie chimica, stato di ossidazione, dose e cinetica di rilascio. Nei nano-MOF entrano inol-

tre in gioco dimensione, forma, carica superficiale, aggregazione, rivestimento, via di somministrazione e durata dell'esposizione [12-14]. Un materiale iniettabile richiede quindi prove molto più severe di un adsorbente immobilizzato in un'apparecchiatura chiusa. La stessa mini-review citata nell'articolo non si limita a segnalare i rischi: indica strategie di mitigazione basate sulla scelta dei nodi, sulla stabilizzazione strutturale e sui rivestimenti.

Non mi pare dunque corretto sostenere che sicurezza e destino ambientale siano temi quasi trascurati. Le lacune esistono, soprattutto nel lungo periodo, ma la comunità le sta affrontando in modo sempre più esplicito. Nel 2025 è stato proposto un quadro «*safe and sustainable by design*» per sviluppare MOF robusti, riciclabili e compatibili con l'economia circolare [15]. Nel 2026 è seguito un toolkit operativo per verificare con metriche di ciclo di vita le dichiarazioni di sostenibilità [16]. Con il che non si vuole sostenere che il problema sia stato risolto. Anzi, tutto ciò rappresenta la prova che la questione è aperta e che stia diventando parte del metodo di progettazione.

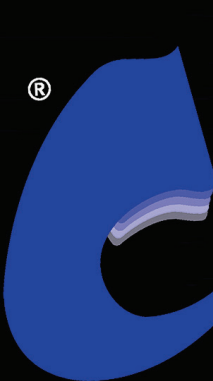
Il richiamo a Seveso è comprensibile come invito alla responsabilità, ma non dovrebbe trasformarsi in un'analogia tra un incidente legato a uno specifico processo industriale e un'intera famiglia di materiali estremamente eterogenea. La lezione più utile è un'altra: individuare presto pericoli ed esposizioni, scartare i candidati inadeguati prima dello scale-up, pubblicare anche i risultati negativi e valutare l'intero ciclo di vita.

L'articolo ha quindi ragione nel chiedere che l'entusiasmo non preceda i dati. Il quadro diventa però troppo pessimista, quando criticità circoscritte vengono presentate come caratteristiche generali. La posizione davvero importante non è dire che «i MOF sono sicuri», né che rischiano di «esploderci in mano», ma riconoscere che alcuni MOF, in determinate forme e per determinati usi, possono diventare stabili, scalabili e gestibili, qualora superino criteri rigorosi di sicurezza e sostenibilità. In casi diversi dovranno essere abbandonati. Questa nuova occasione non va sprecata né con l'entusiasmo acritico né con il pessimismo generalizzato, ma governata per mezzo di una rigida e attenta selezione dei dati, oltretutto attraverso una attenta progettazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Z. Chen *et al.*, *Faraday Discussions*, 2021, **225**, 9, DOI: [10.1039/D0FD00103A](https://doi.org/10.1039/D0FD00103A).
- [2] R. Freund *et al.*, *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, **60**, 23975, DOI: [10.1002/anie.202106259](https://doi.org/10.1002/anie.202106259).
- [3] C. Xiao, J. Tian *et al.*, *Chemical Science*, 2024, **15**, 1570, DOI: [10.1039/D3SC06076D](https://doi.org/10.1039/D3SC06076D).
- [4] J.-B. Lin *et al.*, *Science*, 2021, **374**, 1464, DOI: [10.1126/science.abi7281](https://doi.org/10.1126/science.abi7281).
- [5] Z. Pan *et al.*, *Nature Communications*, 2024, **15**, 9342, DOI: [10.1038/s41467-024-53786-1](https://doi.org/10.1038/s41467-024-53786-1).
- [6] H. Yang, G.-X. Zhang *et al.*, *Energy Material Advances*, 2023, **4**, 0033, DOI: [10.34133/energymatadv.0033](https://doi.org/10.34133/energymatadv.0033).
- [7] Y.-L. Ji *et al.*, *Nature Water*, 2024, **2**, 183, DOI: [10.1038/s44221-023-00184-4](https://doi.org/10.1038/s44221-023-00184-4).
- [8] A.M. Wright, M.T. Kapelewski *et al.*, *Nature Materials*, 2025, **24**, 178, DOI: [10.1038/s41563-024-01947-4](https://doi.org/10.1038/s41563-024-01947-4).
- [9] D. Chakraborty, A. Yurdusen *et al.*, *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**, 2309089, DOI: [10.1002/adfm.202309089](https://doi.org/10.1002/adfm.202309089).
- [10] M.I. Severino *et al.*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, **64**, 2708, DOI: [10.1021/acs.iecr.4c02618](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c02618).
- [11] *IUPAC Gold Book*, voce “heavy metal”, termine deprecato quando usato come sinonimo di tossicità, DOI: [10.1351/goldbook.14739](https://doi.org/10.1351/goldbook.14739).
- [12] R. Ettlinger *et al.*, *Chemical Society Reviews*, 2022, **51**, 464, DOI: [10.1039/D1CS00918D](https://doi.org/10.1039/D1CS00918D).
- [13] P. Wiśniewska *et al.*, *Chemical Engineering Journal*, 2023, **471**, 144400, DOI: [10.1016/j.cej.2023.144400](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144400).
- [14] A. Wang *et al.*, *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**, 2308589, DOI: [10.1002/adfm.202308589](https://doi.org/10.1002/adfm.202308589).
- [15] S. Chakraborty *et al.*, *Nature Reviews Materials*, 2025, **10**, 167, DOI: [10.1038/s41578-025-00774-6](https://doi.org/10.1038/s41578-025-00774-6).
- [16] S. Dutta *et al.*, *Nature Sustainability*, 2026, DOI: [10.1038/s41893-026-01839-2](https://doi.org/10.1038/s41893-026-01839-2).

NUOVA
ENERGIA PER LA
TUA AZIENDA

 **AGICOM** S.r.l.
CONCESSIONARIA DI PUBBLICITÀ PER QUESTA RIVISTA
www.agicom.it

