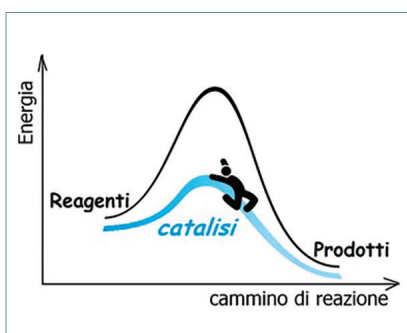




# È POSSIBILE UNO SVILUPPO SOSTENIBILE? SÌ, CON L'AIUTO DELLA CATALISI

*L'uomo è in grado di progettare processi chimici che convertono una vasta gamma di materie prime nei prodotti desiderati, in modo veloce e con alte rese. Sfortunatamente, spesso questi processi presentano importanti punti di debolezza, come, per esempio, l'essere fonte di un forte inquinamento ambientale, il produrre una grande quantità di sottoprodotti scarsamente utili, il richiedere molta energia. La natura, d'altra parte, ha sviluppato processi catalitici molto specifici, attraverso l'evoluzione degli enzimi, a loro volta caratterizzati da alcuni forti limiti di applicabilità su larga scala: il costo elevato, la fragilità, che ne inibisce l'uso per molti cicli e l'attività (definita come conversione nell'unità di tempo), talvolta troppo bassa per lo sviluppo di un processo industriale.*

Dalla fine del IXX secolo, fino a qualche decennio fa, la piattaforma dell'industria chimica si è sviluppata avendo come fonti principali, sia di materie prime che di energia, le risorse fossili (petrolio, carbone e gas naturale). Solo a partire dagli ultimi decenni, si è progressivamente allargato lo scenario delle materie prime, includendo tutte le forme disponibili di carbonio (biomasse e CO<sub>2</sub>). Contestualmente, si è anche riconosciuta la centralità dei processi che portano alla sintesi di H<sub>2</sub> e all'attivazione dell'azoto per la sintesi dell'ammoniaca e si è compreso il forte nesso tra la conversione delle materie prime e l'uso di fonti energetiche, senza però rivedere gli schemi produttivi adottati [1]. Per ridurre i costi e valorizzare gli investimenti, le produzioni sono state concentrate in siti industriali molto grandi, preposti alla sintesi di varie molecole, facilmente integrabili in ulteriori processi; in parallelo, le tecnologie di impianto sono state sviluppate in modo da utilizzare al meglio le risorse energetiche. Queste strategie produttive hanno permesso una



crescita diffusa su ampia scala poiché, grazie ad un generale controllo dei costi, si è potuto aumentare di molto il numero dei consumatori, promuovendone l'inarrestabile voracità. Non sono trascorsi molti anni che una dissennata crescita unidirezionale ha messo in luce molte criticità, evidenziando l'insostenibilità dell'attuale modello di

sviluppo [2]. La Terra si sta impoverendo: nel 2019 il giorno di "overshoot" è stato raggiunto il 29 luglio e da allora, fino alla fine dell'anno in corso, abbiamo vissuto a debito, consumando capitale naturale destinato a generazioni future. L'accumulo di scarti è spesso causa di gravi problemi per la salvaguardia di molti ecosistemi.

Lo sviluppo di una chimica del carbonio, dell'idrogeno e dell'azoto "sostenibili" è cruciale per rispondere alle sfide globali del nostro tempo, come i cambiamenti climatici, la fame, la desertificazione, l'impoverimento della bio-diversità.

Nel rapporto delle Nazioni Unite sono stati individuati 17 obiettivi specifici da perseguire per il 2030,

per garantire uno sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals, SDGs) [3]. In quell'ambito, sono stati forniti molti elementi di riflessione ed un esplicito invito ad un impegno per lo sviluppo di una chimica sostenibile ed innovativa, in cui la catalisi gioca un ruolo cruciale.

Da alcuni anni l'orizzonte sta cambiando e sono emerse nuove strategie di crescita e di produzione che prevedono una maggiore incidenza delle biomasse, l'uso di risorse energetiche rinnovabili e la realizzazione di impianti di produzione di piccole dimensioni.

La Fig. 1 presenta nella parte (a) lo scenario produttivo unidirezionale prevalente oggi: le risorse, sono convertite in prodotti per soddisfare le esigenze di una società in crescita ed a fine vita originano rifiuti. La produzione è condotta utilizzando fonti di energia fossile (non rinnovabile), i catalizzatori utilizzati ricorrono abitualmente ad elementi della tavola periodica poco disponibili in natura e le condizioni di reazione sono spesso estreme (alte pressioni ed alte temperature).

Nella parte (b) della figura si propone un uso virtuoso delle materie prime (la CO<sub>2</sub> e le biomasse sarebbero le fonti di carbonio, mentre l'acqua sarebbe la materia prima usata per la produzione di idrogeno), si prevede di utilizzare fonti energetiche rinnovabili (energia elettrica da fonti rinnovabili oppure termica

o luminosa dal sole) e si propone l'uso di catalizzatori che facciano meno ricorso ad elementi rari e, soprattutto, che siano più attivi, in modo da ridurre i costi energetici di processo, e più selettivi per evitare costi aggiuntivi per la purificazione dei prodotti. Lo sviluppo di processi produttivi di questo tipo, permetterebbe di decentralizzare le produzioni con ulteriori benefici globali:

- 1) diminuzione dell'inquinamento connesso con la distribuzione dei prodotti;
- 2) allargamento del mercato, in quanto accessibile a popolazioni che vivono in luoghi scarsamente raggiungibili dalle comuni vie di trasporto.

In entrambi i casi i catalizzatori giocano un ruolo cruciale [4] ed è evidente che quelli proponibili per lo sviluppo dello scenario (b) non potranno essere una variante dei catalizzatori usati nell'ambito dello scenario (a). La necessità di sviluppare catalizzatori completamente nuovi, offre una straordinaria prospettiva di innovazione che può essere colta solo con un forte impegno di ricerca fondamentale e multidisciplinare [5], dove le capacità sintetiche si avvalgono delle più avanzate tecniche di caratterizzazione sia sperimentale che modellistica e di studi cinetici e meccanicistici, al fine di individuare le migliori strategie di realizzazione per catalizzatori innovativi che permettano di implementare nuovi processi produttivi sostenibili.

Per questa ragione serve una grande capacità di innovazione e di sperimentazione che permetta di andare al di là delle compartimentazioni disciplinari tradizionali, che sia consapevole della necessità di studi di ricerca fondamentale sì, ma rivolti ad affrontare sfide molto concrete, connesse con necessità applicative specifiche e quanto mai urgenti. I nuovi catalizzatori potranno essere inventati se saremo capaci di cogliere l'essenza di quanto sappiamo nell'ambito della catalisi enzimatica, omogenea ed eterogenea, come schematizzato in Fig. 2. Gli strumenti per raggiungere questo obiettivo sono descritti in Fig. 3. La sintesi prende spunto dalle intuizioni derivate dagli studi modellistici e si incontra con la caratterizzazione spettroscopica e strutturale sia dei composti o dei materiali catalitici, sia delle loro trasformazioni in ambiente di reazione. Le indagini meccanicistiche e microcinetiche prendono forza anch'esse dal supporto ottenuto dalle misure

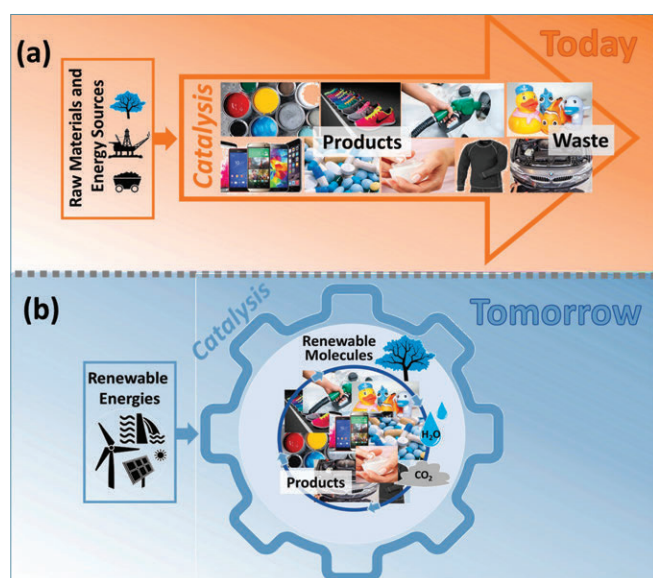


Fig. 1 - a) Schema produttivo attuale; b) schema produttivo auspicabile per il futuro

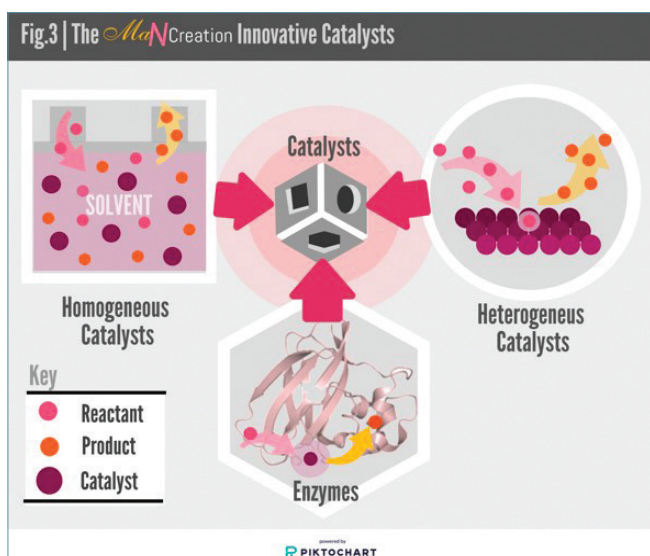


Fig. 2 - I catalizzatori di nuova generazione, rappresentati dalla scatola centrale, sono alla confluenza dei catalizzatori eterogenei, omogenei ed enzimatici

spettroscopiche condotte in condizione di reazione, con approcci “operando”.

Negli ultimi vent’anni sono cresciute moltissimo le potenzialità delle tecniche di indagine, sia quelle condotte nei laboratori tradizionali che quelle disponibili presso i grandi laboratori “multi-utenza” come i sincrotroni o le stazioni di misura per i neutroni. Gli avanzamenti tecnologici relativi alle sensibilità dei detector, combinati alle maggiori prestazioni delle sorgenti, hanno dato impulso allo sviluppo di tecniche risolte spazialmente e temporalmente. Approcci sperimentali di questo tipo hanno implicato la necessità di sviluppare competenze e soluzioni idonee per trattamento e analisi di un’enorme quantità di dati, favorendo anche l’applicazione di approcci chemiometrici, non molto diffusi in questo ambito.

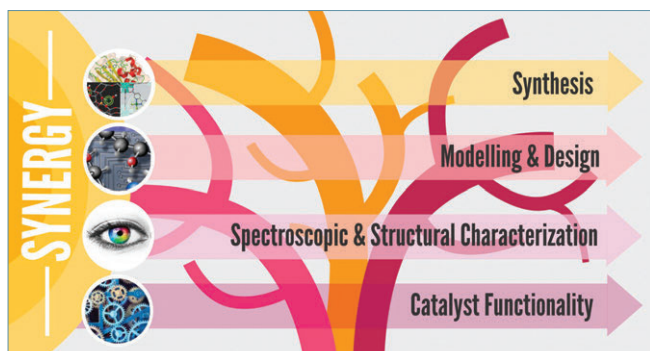


Fig. 3 - La ricerca per lo sviluppo di nuovi catalizzatori per uno sviluppo sostenibile ha come premessa l’applicazione sinergica di molteplici approcci sia sperimentali che modellistici

In questo contesto, le compartimentazioni disciplinari perdono completamente di rilevanza perché le competenze negli ambiti più fondamentali si devono incontrare con quelle più tipiche delle aree applicate, tecnologiche, ingegneristiche, fino a contemplare aspetti socio-economici.

Il 26 settembre 2019 è stato pubblicato un importante rapporto sulle necessità della ricerca per rispondere alla domanda: “Come possiamo orientarci verso una produzione sostenibile di carburanti e prodotti chimici in Europa e mitigare i cambiamenti climatici?”.

Il rapporto ENERGY-X [6], frutto di un “workshop” di tre giorni che ha visto riuniti oltre 150 scienziati e “stakeholders”, fornisce una “roadmap” scientifica per la realizzazione di combustibili e prodotti chimici sostenibili. I carburanti sintetici offrono un’alternativa promettente ai combustibili fossili in quanto hanno la più alta densità energetica di tutti i mezzi di accumulo dell’energia, possono essere conservati a bassi costi per lunghi periodi e si avvantaggiano di infrastrutture di stoccaggio, distribuzione ed utilizzo già largamente diffusi. La sfida è che le attuali tecnologie per la produzione sostenibile di carburanti sintetici e composti chimici necessitano di importanti miglioramenti per consentire un efficace risparmio di risorse con processi che siano economicamente competitivi. La relazione, articolata in dodici capitoli, presenta un quadro globale della situazione attuale e propone una traiettoria di sviluppo su uno scenario temporale di dieci anni. Vengono sottolineate le esigenze di ricerca, sia da un punto di vista scientifico, che industriale e sociale, al fine di rendere possibile il necessario cambiamento radicale degli scenari produttivi a cui ricorriamo per rispondere alle esigenze quotidiane. A titolo di esempio, in questo breve contributo si considererà il ciclo del carbonio.

Idrocarburi e carboidrati rappresentano le fonti di carbonio più ricche di energia e vengono ossidati per rilasciare energia, rispettivamente, nei motori a combustione e nella materia vivente. Pertanto, la conversione chimica del carbonio in tutti i suoi stati di ossidazione, spaziando dalle molecole più semplici a quelle gradualmente più complesse, è un argomento cruciale. L’ossidazione controllata degli idrocarburi è una sfida e porta alla formazione di piccole molecole che sono di vitale importanza per l’industria chimica. Esse rappresentano, infatti, i

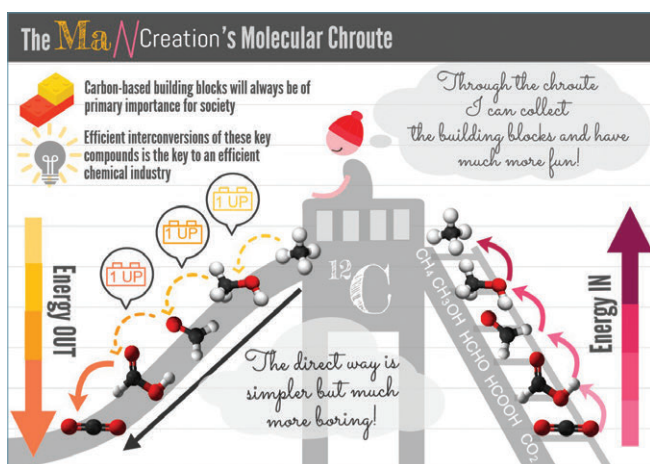


Fig. 4 - Rappresentazione grafica della risalita nella scala dell'energia della molecola di anidride carbonica, verso il metano e la discesa nella medesima scala del metano, verso l'anidride carbonica, passando dal metanolo come primo step intermedio

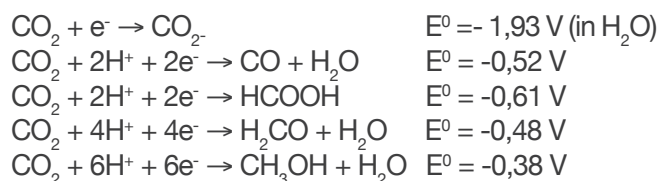
mattoni costitutivi delle sostanze chimiche più complesse che sono alla base della più ampia varietà di molecole e materiali. Il prodotto finale è la  $\text{CO}_2$ , che, accanto ai minerali carbonatici, è la fonte meno energetica di carbonio. Per chiudere il ciclo del carbonio, la  $\text{CO}_2$  deve essere riconvertita in idrocarburi o carboidrati, ma ciò richiede energia e una fonte di idrogeno. Lo sviluppo di catalizzatori nuovi, efficienti e selettivi per l'interconversione di piccole molecole a base di carbonio è essenziale per l'industria attuale e futura.

La Fig. 4 illustra l'interconversione delle molecole contenenti un solo atomo di carbonio (C1) da  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ . Al momento non ci sono processi sintetici in grado né di salire né di scendere i gradini efficacemente con alte velocità e buone rese verso uno specifico prodotto (selettività).

Salire i gradini (ridurre la  $\text{CO}_2$ ) richiede un apporto energetico molto grande (la  $\text{CO}_2$  è molto poco reattiva), inoltre è necessaria una fonte di idrogeno e, infine, va affrontata la problematica della selettività verso uno specifico prodotto. Al momento solo la natura, grazie ai sistemi fotosintetici, è riuscita nell'impresa, a fronte dello sviluppo di un sistema di reazioni a catena molto complesso, noto come "fotosintesi". Durante la fotosintesi, con la mediazione della clorofilla e grazie all'interconversione di 18 ATP-ADP e 12 NADPH-NADP<sup>+</sup>, la luce solare o artificiale converte sei molecole di  $\text{CO}_2$  e sei di  $\text{H}_2\text{O}$  in una molecola di glucosio e sei molecole di  $\text{O}_2$  ( $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia solare} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ ).

Al momento non si conosce una via "fotosintetica" semplificata che permetta una riduzione della  $\text{CO}_2$  con elevate conversioni e rese per uno specifico prodotto.

In ogni caso, qualsiasi sia il prodotto a cui si vuole arrivare, il processo è sempre multi-elettronico ed è caratterizzato da barriere energetiche significativamente diverse:



Come si osserva, le reazioni che richiedono l'apporto di meno elettroni e protoni (ne servono ad esempio 2 per convertire la  $\text{CO}_2$  in  $\text{CO}$  o  $\text{HCO}_2\text{H}$ ) sono caratterizzate da un potenziale maggiormente negativo. Al contrario, le reazioni che richiedono potenziali meno proibitivi, necessitano la contemporanea disponibilità di più elettroni e protoni (ben 6 per convertire la  $\text{CO}_2$  in  $\text{CH}_3\text{OH}$ ), risultando così in una minore selettività.

Una strategia emergente di sviluppo, si propone di fornire gli elettroni necessari al processo tramite una fonte esterna: si parla in questo caso di "elettroluzione" della  $\text{CO}_2$ . Il processo ha la potenzialità di guidare la transizione verso un'economia verde che usi in maniera ciclica la  $\text{CO}_2$  e che permetta di produrre ed usare combustibili e prodotti chimici in generale (Fig. 5). Un approccio di questo tipo avrebbe il vantaggio di poter utilizzare le infrastrutture già disponibili per la grande varietà di composti ora prodotti da risorse fossili, senza però contribuire ad un ulte-

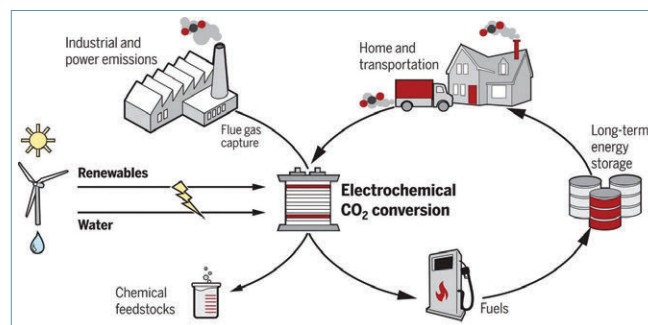
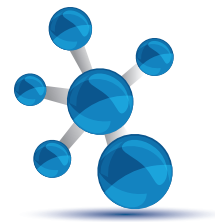


Fig. 5 - La riduzione elettrochimica della  $\text{CO}_2$  è alimentata da sorgenti energetiche rinnovabili e produce combustibili e prodotti della chimica di base, permettendo lo sviluppo di un'economia circolare. La figura è stata riprodotta da [7]



riore aumento di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera ("CO<sub>2</sub> neutral"). Al centro del ciclo c'è la reazione di elettroreduzione della CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>RR) che, mimando la fotosintesi, può essere sviluppata su scale diverse, permettendo anche produzioni in piccole e medie scale. In linea di principio, il processo si alimenta con energia elettrica rinnovabile, per produrre combustibili e molecole della chimica di base, operando a temperatura ambiente e a pressione atmosferica.

I prodotti più comuni della riduzione della CO<sub>2</sub> sono il monossido di carbonio e l'acido formico, ottenibili da una certa varietà di catalizzatori che lavorano sia in fase omogenea che eterogenea. Il monossido di carbonio rappresenta una molecola "snodo" per l'industria chimica, entrando in molti processi industriali su larga scala, come la sintesi di combustibili liquidi tramite il processo Fischer-Tropsch o la produzione di metanolo. Inoltre, la conversione elettrochimica della CO<sub>2</sub> a CO ha anche suscitato un crescente interesse per le applicazioni nell'ambito della sintesi organica, dove il CO prodotto *in situ* può essere utilizzato per un'ampia varietà di reazioni di carbonilazione [8].

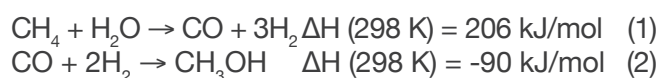
Particolarmente attrattiva è la sintesi di alcoli a più atomi di carbonio, per il loro maggiore contenuto energetico e per la loro importanza nella chimica di base. In particolare l'attenzione è focalizzata sull'etilene, vista la sua enorme importanza nella sintesi dei materiali polimerici e non solo (si consideri ad esempio la sintesi di detergenti). I catalizzatori eterogenei al momento usati sono a base di rame ed i loro principali problemi sono una non sufficiente selettività e una scarsa stabilità. I fattori che influenzano le performance dei catalizzatori si riferiscono sia alle caratteristiche delle particelle (la loro dimensione e forma, ma anche il loro grado di difettività) che alle condizioni dell'ambiente di reazione (ad esempio il pH ed il tipo di elettrolita usato) [9-11]. Poiché la maggior parte degli studi al momento riguarda sistemi a base di elettroliti acquosi, la scarsa solubilità in acqua della CO<sub>2</sub> costituisce il fattore che più limita le "performance" della cella, ancor prima dell'attività del catalizzatore. Tra gli ambiti di ricerca possibili, se ne riconoscono cinque che rivestono una rilevanza particolare:

- 1) migliorare l'attività, la selettività e la stabilità dei catalizzatori;
- 2) conoscere gli aspetti fondamentali del mecca-

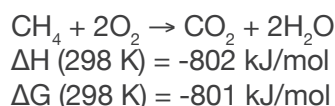
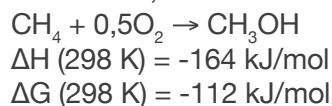
smo di attivazione della CO<sub>2</sub>, tramite metodi sperimentali "in situ";

- 3) conoscere gli aspetti fondamentali del meccanismo di attivazione della CO<sub>2</sub>, tramite metodi computazionali "in silico";
- 4) ottimizzare le prestazioni dei dispositivi e renderne possibile la costruzione di nuovi su scale maggiori;
- 5) esplorare nuovi sistemi catalitici (es. materiali ibridi organici-inorganici come i reticoli metal-organici, MOFs) e nuove condizioni di reazione (es. CO<sub>2</sub> supercritica).

Ritornando allo schema riportato in Fig. 4, un secondo ambito di grande interesse è il controllo della reattività del metano nei confronti dell'ossigeno per dare metanolo. Il metanolo è una sostanza chiave nell'industria chimica, con una capacità di produzione globale di 100 milioni di tonnellate all'anno. Attualmente il metanolo è prodotto dal metano in un processo in due fasi:



A causa di vincoli termodinamici, il primo passaggio viene in genere eseguito a una temperatura di 800 °C e una pressione di 30 bar, mentre il secondo passaggio viene eseguito a 270 °C e 50-100 bar. Da un punto di vista termodinamico, la conversione diretta del metano a metanolo potrebbe avvenire persino a temperatura ambiente. Nonostante ciò, problematiche di tipo cinetico si sommano al fatto che il prodotto risulta essere molto più reattivo del reagente, implicando una notevole difficoltà nel bloccare la reazione al primo passaggio evitando successive ossidazioni, fino alla combustione totale del metano:



Lo sviluppo di un processo per la sintesi diretta del metanolo dal metano sarebbe rivoluzionario per diverse ragioni:

- i) porterebbe enormi risparmi sia nella costruzione

- che nel funzionamento degli impianti;
- ii) allargherebbe moltissimo il mercato, in quanto la produzione potrebbe essere decentralizzata;
  - iii) ridurrebbe i costi di trasporto e stoccaggio;
  - iv) farebbe da apripista allo sviluppo di molte altre reazioni che necessitano un'attivazione selettiva del legame C-H.

I catalizzatori che sono capaci di rompere selettivamente i legami C-H in condizioni chimicamente blande, sono oggetto di studi da almeno settant'anni e la reazione in gioco è stata denominata "The Holy Grail reaction". Tuttavia, nonostante gli intensi sforzi di ricerca negli ultimi trent'anni, non è stato ancora realizzato un processo che converta il metano in metanolo con alte rese, usando solo ossigeno come ossidante e con una reazione che avvenga in un unico passaggio ed in condizioni blande. Al momento la ricerca è soprattutto di tipo fondamentale [12-15] poiché i costi contenuti delle risorse energetiche e gli enormi investimenti fatti per lo sviluppo degli impianti per la sintesi di metanolo a partire dal *syngas* (la miscela di CO e H<sub>2</sub> ottenuta tramite la reazione (1)) non incentivano lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche.

In natura, la conversione diretta metano-metanolo è svolta da alcuni sistemi enzimatici conosciuti come metano-monoossigenasi. In questi sistemi i centri cataliticamente attivi sono costituiti da coppie di ioni ferro ("soluble MMO") o di rame ("particulate MMO") che trasformano la molecola di metano e di ossigeno in metanolo, selettivamente e a temperatura ambiente [14, 16]. Purtroppo questi sistemi non sono facili da studiare e neanche da sviluppare per un utilizzo su scale industriale, poiché le specie attive si deteriorano dopo pochi cicli di reazione.

In ambito sintetico gli approcci sono stati piuttosto diversificati, sia proponendo sistemi molecolari che lavorano in fase omogenea (purtroppo non sufficientemente stabili e non selettivi) sia catalizzatori eterogenei, soprattutto a base di zeoliti scambiate con ioni ferro e/o rame (purtroppo caratterizzati da produttività estremamente basse, sia valutate in rapporto alla quantità di campione sia per la quantità di specie rame presenti). In particolare sono oggetto di studio materiali zeolitici scambiate con ioni rame, capaci di produrre metanolo a partire da metano e ossigeno, tramite una reazione che procede a stadi successivi [17-19]. In una prima fase la zeo-

lite è attivata ad elevata temperatura in ossigeno in modo da formare le specie cataliticamente attive, segue la reazione con il metano a più bassa temperatura e, infine, l'interazione con il vapore d'acqua per permettere l'allontanamento del metanolo dalla superficie del catalizzatore.

A questo punto il materiale è pronto per un nuovo ciclo di attivazione in ossigeno, per ripristinare le specie attive. La reazione procede lentamente, soprattutto nella fase di produzione delle specie Cu<sub>oxo</sub> coinvolte nella reattività del metano. Studi meccanicistici, abbinati a studi computazionali e di spettroscopia, suggeriscono che la specie attiva coinvolga la presenza di specie dimeriche, anche se al momento la comunità scientifica non ha espresso un parere unanime [21]. Per l'intero ciclo di reazione, le strutture locali più accreditate, soprattutto sulla base di indagini di tipo spettroscopico e modellistico, sono schematicamente illustrate in Fig. 6. Anche se sulla struttura locale del sito e sul meccanismo di reazione non ci sono interpretazioni univoche, l'intera comunità scientifica è concorde nel riconoscere il limite intrinseco delle zeoliti per questa reazione e sta rivolgendo l'attenzione verso una classe emergente di materiali cristallini caratterizzati da una maggiore versatilità composizionale e di struttura: i reticoli metallici organici microporosi, anche conosciuti come MOF. Negli ultimi anni stanno appa-

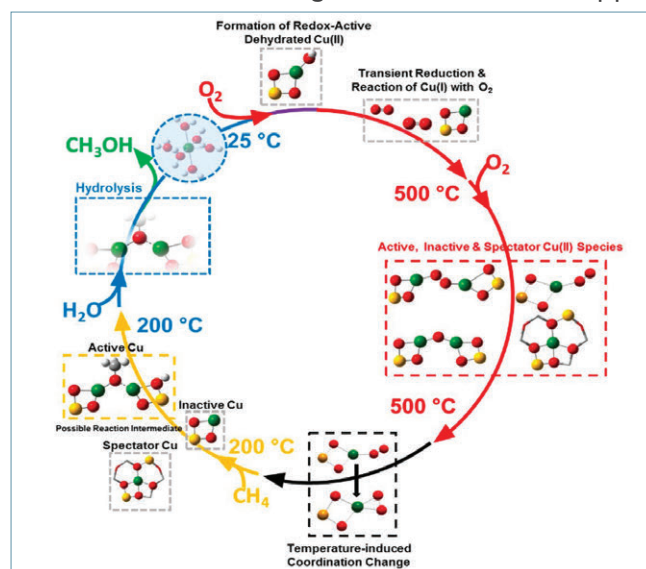
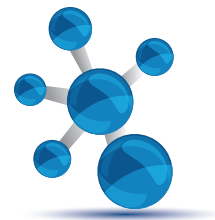


Fig. 6 - Rappresentazione pittorica di alcune strutture proposte in letteratura, per la reazione di conversione diretta del metano in metanolo in zeoliti contenenti specie rame. La figura è stata riprodotta da [20]



rendo i primi lavori in questo ambito: le aspettative sono molto alte, sebbene al momento i risultati siano ancora piuttosto deludenti [22, 23] a causa della scarsa robustezza dei materiali e dell'insufficiente controllo nella funzionalizzazione con specie rame. Uno scenario del tutto nuovo si potrebbe aprire con una ricerca di base che verrà condotta nell'ambito di un progetto ERC Synergy "CUBE", appena finanziato dalla Comunità Europea, che vede coinvolto/e, oltre alla scrivente, Unni Olsbye (Università di Oslo, Norvegia), Serena De Beer (Max Planck Institute, Germania) e Vincent Eijsink (Università NMBU, Norvegia) nella sfida di sviluppare catalizzatori innovativi per reazioni di ossidazione parziale, tra cui, per esempio, la conversione diretta da metano a metanolo connettendo i mondi della catalisi enzimatica, omogena ed eterogena [24].

### Ringraziamenti

Elisa Borfecchia per l'ideazione e la realizzazione di tutte le figure originali; Unni Olsbye, Serena De Beer e Vincent Eijsink per essere con me nell'ambizioso progetto che sta per partire; Adriano Zecchina per gli insegnamenti ricevuti; Carlo Lamberti per avermi accompagnata fisicamente fino a pochi mesi fa e per essere costantemente al mio fianco.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Beller, G. Centi, L. Sun, *ChemSusChem*, 2017, **10**, 6.
- [2] S. Perathoner, S. Gross *et al.*, *ChemCatChem*, 2017, **9**, 904.
- [3] <https://sustainabledevelopment.un.org/>
- [4] A. Zecchina, S. Califano, *The development of catalysis*, Wiley-VCH 2017.
- [5] A. Zecchina, S. Bordiga, E. Groppo, *Selective Nanocatalysts and Nanoscience*, Wiley-VCH, 2011.
- [6] [https://www.energy-x.eu/wp-content/uploads/2019/09/Energy\\_X\\_Research-needs-report.pdf](https://www.energy-x.eu/wp-content/uploads/2019/09/Energy_X_Research-needs-report.pdf)
- [7] P. De Luna, C. Hahn *et al.*, *Science*, 2019, **364**, 350.
- [8] D. Nielsen, X.M. Hu *et al.*, *Nature Catalysis*, 2018, **1**, 244.
- [9] R.M. Arán-Ais R.M. Aran-Ais *et al.*, *Account of Chemical Research*, 2018, **51**, 2906.
- [10] D. Gao, R.M. Aran-Ais *et al.*, *Nature Catalysis*,

- 2019, **2**, 198
- [11] Y.Y. Birdja, E. Pérez-Gallent *et al.*, *Nature Energy*, 2019, **4**, 732.
- [12] K.T. Dinh, M.M. Sullivan *et al.*, *ACS Catal.*, 2018, **8**, 8306.
- [13] M. Ravi, M. Ranocchiari, J.A. van Bokhoven, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, **56**, 16464.
- [14] B.E.R. Snyder, M.L. Bols *et al.*, *Chemical Reviews*, 2018, **118**, 2718.
- [15] B.A. Arndtsen, R.G. Bergman *et al.*, *Acc. Chem. Res.*, 1995, **28**, 154.
- [16] H. Dalton, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2005, **360**, 1207.
- [17] M.H. Groothaert, P.J. Smeets *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**, 1394.
- [18] D.K. Pappas, E. Borfecchia *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, **139**, 14961.
- [19] J.S. Woertink, P.J. Smeets *et al.*, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2009, **106**, 18908.
- [20] E. Borfecchia, D.K. Pappas *et al.*, *Catalysis Today*, 2019, **333**, 17.
- [21] D.K. Pappas, A. Martini *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, **140**, 15270.
- [22] J. Baeck, B. Rungtaweivoranit *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, **140**, 18208.
- [23] J. Zheng, J. Ye *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, **141**, 9292.
- [24] <https://erc.europa.eu/news/erc-2019-synergy-grants-results>.

### Is Sustainable Development Possible? Yes, with the Aid of Catalysis

Man is able to design chemical processes that convert a wide range of raw materials into the desired products, quickly and with high yields. Unfortunately, these processes often present important weaknesses, such as being a source of strong environmental pollution, producing a large amount of poorly useful by-products, requiring a lot of energy. Nature, on the other hand, has developed very specific catalytic processes, through the evolution of enzymes, but sometimes they are characterized by some strong limits of applicability on a large scale: high cost, fragility, which inhibits their use for many cycles and activity (defined as conversion in the unit of time), sometimes too low for the development of an industrial process.