



di Luigi Campanella

## IL CONSORZIO INCA: UNA PREZIOSA OPPORTUNITÀ SCIENTIFICA PER LA CHIMICA DELL'AMBIENTE

Il Consorzio Interuniversitario di Chimica dell'Ambiente (INCA) è un sistema organizzato di capacità e professionalità scientifiche che richiede un'attenta valutazione dei programmi per non disperdere il potenziale scientifico disponibile e per integrare le varie competenze espresse.

Il progetto complessivo non può che partire dall'istituzione del Consorzio. La chimica dell'ambiente si è molto trasformata negli ultimi decenni avendo la capacità di abbinare al ruolo euristico, basato sul carattere prevalentemente induttivo della conoscenza chimica, quello di tutore della qualità della vita e successivamente quello di garante che tale qualità, salvaguardata in una logica di rispettosa sostenibilità verso l'ecosistema che ci circonda e verso le generazioni future. Oggi non è più sufficiente un approccio soltanto analitico sull'ambiente: certo la conoscenza rappresenta la prima fase di qualsiasi intervento, ma la capacità di utilizzare tale

conoscenza ai fini del recupero e del risanamento si basano su approcci più completi e più complessi che riguardano i meccanismi dei processi naturali, le interazioni fra questi ed i sistemi antropici, i percorsi naturali degli inquinanti e la loro rimozione, la valutazione quantitativa dell'impatto ambientale, le tecnologie alternative di produzione energetica ed industriale capaci di abbattere il carico ambientale delle attività collegate al procedere della vita in una società moderna avanzata.

La conoscenza analitica in questa logica deve sfociare nell'intervento correttivo ed in quello stabilizzante ai fini di un degrado che, una volta recuperato non debba ripetersi. Tutto ciò si traduce in tecnologie, servizi, processi, materiali alternativi a quelli tradizionali.

Il presente programma cerca di inquadrare tutto ciò all'interno di alcune tematiche, cercando con esse quasi di indicare alle differenti unità scientifiche operative del Consorzio la strada da seguire per contribuire in



Il Consorzio Interuniversitario Nazionale "La Chimica per l'Ambiente" (Consorzio INCA) è nato il 6 ottobre 1993, quando

cinque università italiane – Venezia Ca' Foscari, Lecce, Milano Politecnico, Firenze e Viterbo La Tuscia – siglarono l'atto costitutivo di questo network accademico senza scopo di lucro, la cui personalità giuridica è stata riconosciuta con decreto del 6 settembre 1994 dell'allora Ministero dell'Università e Ricerca Scientifica e Tecnologica (MURST). Da allora il Consorzio INCA è cresciuto rapidamente e attualmente conta una trentina di università affiliate con oltre 70 unità di ricerca, oltre a quattro laboratori di sua proprietà (Venezia-Marghera, Lecce, Palermo, Cagliari).

Secondo il proprio statuto, la missione fondamentale del Consorzio è di fornire supporti scientifici, didattico-formativi, organizzativi, tecnici e finanziari alle università consorziate, promuovendo e coordinando la loro partecipazione alle attività scientifiche e di indirizzo tecnologico nel campo della chimica per l'ambiente, in accordo con i relativi programmi di ricerca nazionali e internazionali. Attualmente i fondi per la ricerca e le altre attività consortili derivano in parte dal MiUR ed in parte da progetti di ricerca, formazione e addestramento e dai proventi dei suoi laboratori. Attraverso il suo operato INCA intende supportare lo sviluppo sostenibile, favorendo la permeazione dei principi di questo settore della chimica nei vari livelli della nostra società: università, industria, organi legislativi, scuola e società civile.

Nato inizialmente come istituzione nazionale finalizzata al coordinamento di attività di ricerca e alta formazione, il Consorzio si è presto affermato anche a livello sovranazionale, come mostrano le numerose collaborazioni con università straniere, network di ricerca internazionali e organizzazioni non governative, come Iupac, Ocs, Unep e Unesco.

Il Consorzio partecipa a numerosi progetti di ricerca e di formazione, finanziati da programmi europei, nazionali e regionali, come pure da aziende private (*outsourcing* della ricerca industriale). Tra i nuovi progetti più significativi attualmente in attuazione o in preparazione vi sono progetti FIRB, POR, PON, del VII PQ e di ricerca per conto terzi. Per quanto riguarda le attività formative, INCA è attivo sia a livello post-universitario che a quello di scuola secondaria. Nell'ordine possiamo ricordare l'organizzazione delle varie edizioni delle Summer School internazionali di perfezionamento post-laurea dedicate alla chimica verde e alla bonifica dei suoli, finanziate da diversi enti, tra cui la CE (FP6) e la Nato. A livello di formazione universitaria citiamo la coordinazione da parte di INCA del *Tempus Joint European Project "Sustainable Environmental Development"* (n. 30031-2002), finanziato dalla CE e finalizzato all'aggiornamento dei corsi scientifici presso la Suez Canal University (Ismailia, Egitto), conclusosi nel 2007. Per quanto riguarda la collaborazione con la scuola, possiamo ricordare il progetto "Chimica per lo Sviluppo Sostenibile" (CHI.S.S.), finanziato dal Programma Operativo Nazionale 2000-2006 per la formazione (Fondo Sociale Europeo).

Meritano qui menzione anche alcune delle attività editoriali del Consorzio: le due serie *Green Chemistry Series* e *Soil Remediation Series*, dedicate ad esperti di settore, e la rivista di diffusione della cultura scientifica "Green. La Scienza al servizio dell'Uomo e dell'Ambiente" ([www.green-incaweb.org](http://www.green-incaweb.org)), destinata alla scuola e alla società.

Sebbene da quanto esposto si evinca che il Consorzio è attivo in molti campi, l'attività principale rimane comunque la ricerca scientifica. Per garantirne la qualità, INCA si sottopone periodicamente e volontariamente ad accertamenti esterni. Nel 1998, 2003 e 2008 questi stati effettuati dal *Centre for Research in Higher Education Policies* (CIPES; Portogallo), mentre nel 2005 INCA ha partecipato all'attività di valutazione nazionale del CIVR, il Comitato di Indirizzo per la Valutazione della Ricerca del MiUR. Quest'ultimo ha identificato prodotti di buona qualità in quattro aree tematiche, riconoscendo il Consorzio come un'eccellenza nazionale nel settore "Scienze e tecnologie per lo sviluppo e la governance sostenibili". Le attività di ricerca di INCA sono organizzate in macroaree tematiche sulla linea indicata dal documento qui riportato, redatto dal suo Consiglio Scientifico così costituito:

Luigi Campanella	Università di Roma La Sapienza
<i>Coordinatore del Consiglio Scientifico</i>	
Angelo Albini	Università di Pavia
Mario Beccari	Università di Roma "La Sapienza"
Salvatore Coluccia	Università di Torino
Enrico Drioli	Università della Calabria
Giovanni Sartori	Università di Parma
Leonardo Marchetti	Università di Bologna
<i>Presidente dell'INCA e del Consiglio Scientifico</i>	

**Maggiori dettagli sulle attività del Consorzio INCA si possono trovare sul suo sito Internet: [www.incaweb.org](http://www.incaweb.org)**

*Leonardo Marchetti*



modo coordinato, affidabile ed incisivo al rispetto della ragione che ha promosso e suggerito la nascita di INCA. Esso si articola in:

- Metodi e Tecnologie alternativi e innovativi (Green Chemistry);
- Innovazione di prodotto;
- Applicazioni ai settori merceologici più rappresentativi ed al REACH.

Il riferimento al regolamento europeo da poco attivo è d'obbligo: la sua applicazione è necessaria a garanzia di ambiente e cittadini ma deve essere resa economicamente compatibile con le attività industriali e con una competizione di mercato spesso disomogenea nelle condizioni e nelle regole.

## Metodi e tecnologie di base alternativi e innovativi

### Chimica fine di sintesi e di estrazione (Green Chemistry)

La chimica verde ha una forte impronta industriale, essendo per sua natura rivolta a diminuire l'impatto ambientale dei prodotti chimici e quindi primariamente di quelli prodotti su larga scala industriale. Tuttavia, vi sono prodotti di nicchia a volte molto innovativi che vengono preparati in piccola quantità nei laboratori di ricerca, sia industriali che universitari, ma spesso attraverso processi ben lontani dall'ottimizzazione e con impatto ambientale proporzionalmente ben più alto. Seppure l'effettivo danno ambientale causato possa essere in questo caso modesto a causa delle piccole quantità di materiali usate, è importante che vengano introdotte anche in questo caso valutazioni sulla compatibilità ambientale, che, nello spirito della green chemistry, devono essere considerati fin dall'inizio prima dell'ottimizzazione.

In questo campo trova naturale applicazione l'uso di nuove tecnologie e di nuovi reagenti e condizioni di reazione, quali:

- nuovi catalizzatori e nuove condizioni di catalisi (catalizzatori immobilizzati, nanomateriali, ma anche catalisi organica);
- metodi "non convenzionali" di attivazione, cioè quelli di fatto relativa-

mente poco usati in chimica sintetica, quali fotochimica, elettrochimica, uso di microonde e ultrasuoni;

- condizioni di reazione "non convenzionali", come "nuovi" solventi, solventi in condizioni supercritiche, liquidi ionici, oppure nuove (micro reattori).

Si tratta di limitare la barriera netta tra ricerca di base ed applicata, volgendosi a contenere sprechi e inquinamenti (cicli di efficacia dei catalizzatori, recupero e nuovo uso dei catalizzatori, limitazione dei passaggi e dei quantitativi dei reagenti, valutazione economica, valutazione tossicologica).

A latere di questi progressi sperimentali è importante diffondere la cultura dell'assessment ambientale, cioè della valutazione attraverso procedure di life cycle assessment dell'effettivo danno ambientale causato da ciascun processo e il confronto con metodi alternativi, in modo da poter riconoscere il più presto possibile punti deboli e relativi rimedi.

Nell'università questo atteggiamento ha un importante valore didattico, che può essere sfruttato elaborando alcuni passaggi sintetici per i corsi avanzati di laboratorio nella laurea in chimica; nell'industria invece lo stesso atteggiamento ha indubbie ricadute di natura etica ed educativa.

### Tecnologie pulite ed energie rinnovabili

Uno sviluppo industriale sostenibile, attento alle problematiche ambientali, ai consumi energetici, alla valorizzazione delle materie prime ed alla qualità dei prodotti finiti richiede un notevole sforzo di comprensione dei meccanismi molecolari che sono alla base delle trasformazioni chimiche, ed un adeguamento dei processi di produzione con l'introduzione di operazioni fondamentali più adatte alle nuove problematiche dello sviluppo sostenibile.

La progressiva riduzione dei processi di separazione basati sui passaggi di stato, indotti per via termica e il crescente sviluppo di operazioni di separazione non termiche tipo le separazioni molecolari a membrana ne sono tipici esempi.

L'impiego di fonti energetiche rinnovabili inoltre, quali l'energia solare, eoli-

ca, geotermica, i gradienti salini, e dei cascami energetici dei processi produttivi richiede particolare attenzione. Queste fonti energetiche alternative peraltro si combinano molto bene proprio con i nuovi processi di separazione non termici, capaci di operare in genere a temperatura ambiente o non di molto superiore.

Studi rivolti all'integrazione di energie alternative nei processi di separazione e nelle trasformazioni chimiche sono di particolare importanza. Reattori fotochimici, reattori a membrane e reattori a membrane immerse (questi ultimi già considerati BAT nel trattamento delle acque municipali) sono interessanti campi di ricerca, con ancora notevoli potenzialità di sviluppo e di impatto di diversi cicli produttivi.

In particolare i bioreattori a membrana (Membrana BioReactor, MBR) rappresentano una tecno-



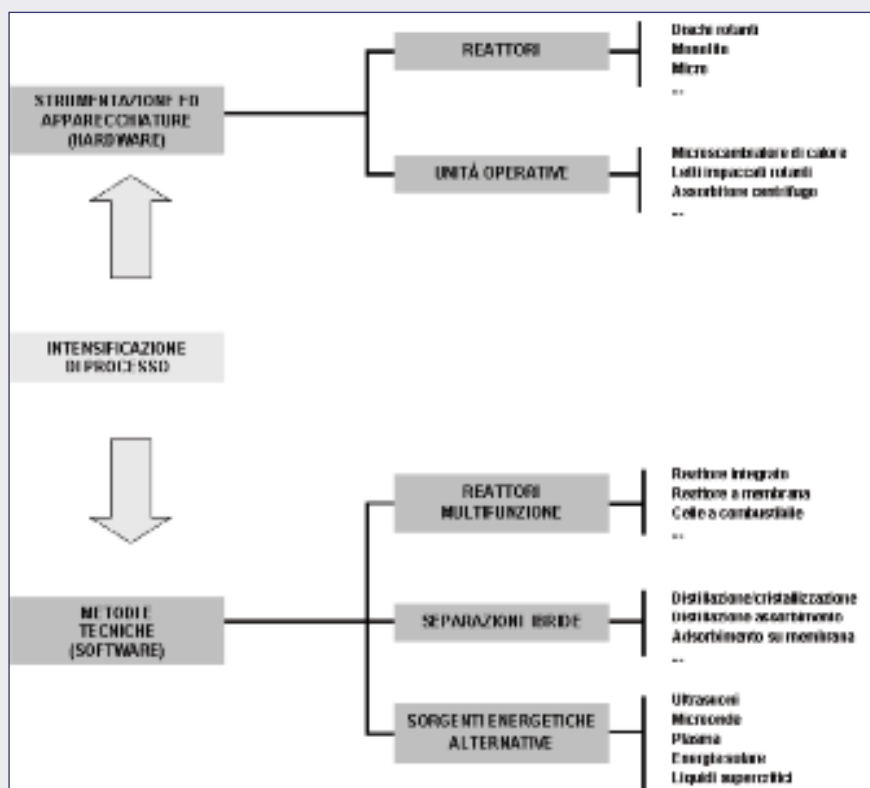


Fig. 1 - Classificazione delle principali linee di ricerca nell'ambito della Process Intensification

logia emergente di trattamento delle acque, che combina la crescita di una biomassa in sospensione, simile a quella di un processo convenzionale a fanghi attivi, con un sistema a membrana. La più ampia serie di condizioni sperimentali ammesse, la robustezza del sistema rispetto alle variazioni di carico, la ridotta dimensione, la possibilità di automatizzare la maggior parte delle operazioni, la bassa richiesta di manodopera di manutenzione, la ridotta sensibilità a variazione dei flussi idraulici, la facilità di scale-up per produzioni che vanno da meno di 1 m<sup>3</sup>/giorno a 100.000 m<sup>3</sup>/giorno, sono tutti vantaggi della tecnologia MBR fondamentale per la gestione delle acque.

### Process Intensification

La capacità di soddisfare la crescente domanda di materie prime, di energia e di prodotti entro le restrizioni imposte dall'attuazione di uno sviluppo sostenibile costituisce oggi un problema di estrema complessità per l'industria chimica. In questo contesto, le sfide future riguardano l'aumento di produttività mediante l'intensificazione e il controllo multi-scala dei processi, la progettazione di operazioni e metodologie innovative, l'individuazione di procedure in grado di assecondare i crescenti standard di qualità richiesti al prodotto finito, l'implementazione di applicazioni computazionali in grado di gestire i vari stadi di un processo, dalla scala molecolare a quella industriale. Si definisce per l'appunto "Intensificazione di Processo" (PI) quella strategia volta al raggiungimento di sostanziali benefici nell'ambito dei vari cicli produttivi, secondo un approccio che mira ad una sostanziale riduzione (e, ove possibile miniaturizzazione) del volume delle apparecchiature. Nella pratica, il legame concettuale tra sostenibilità e

dimensione fisica di un impianto produttivo assurge a linea-guida per la progettazione e realizzazione di nuovi dispositivi e per la formulazione di nuovi protocolli operativi, in grado di offrire interessanti contributi all'industria di processo in termini di *elevata flessibilità, maggiore sicurezza, avanzata automazione, ridotto fabbisogno energetico, ecosostenibilità e minimizzazione dei sottoprodotti di scarto*.

Nell'ambito della Process Intensification vengono comunemente distinti due aspetti fondamentali: uno legato alla progettazione e sviluppo di nuove apparecchiature (hardware), l'altro connesso alla implementazione di nuovi metodi e protocolli operativi (software) sulla base di operazioni unitarie pre-esistenti. Ci si riferisce alla Fig. 1 per l'identificazione delle linee di ricerca di maggiore interesse.

La recente *European Roadmap for Process Intensification* (2008) ha identificato i potenziali benefici per tre settori industriali di importanza strategica: *petrolchimico, farmaceutico e agroalimentare*. Nel settore petrolchimico, laddove il fabbisogno energetico condiziona in massima parte il costo del prodotto finale, l'aumento di efficienza energetica costituisce il presupposto per un sensibile miglioramento del processo sia da un punto di vista economico (diminuzione dei costi totali), sia della sostenibilità (riduzione delle emissioni di gas serra). Nel settore farmaceutico, la competitività economica

costituisce un obiettivo importante rispetto al quale la strategia di Process Intensification può offrire un significativo contributo attraverso l'aumento di selettività delle reazioni, di resa del processo e di purezza del prodotto finale. I processi agro-alimentari sono generalmente caratterizzati dal fatto che si debbano trattare notevoli volumi di correnti liquide diluite sotto le restrizioni imposte dalla stabilità del materiale di partenza. La competitività economica è in massima parte influenzata sia dal costo del processo di trasformazione del prodotto, sia dal costo del processo di trattamento dei reflui, entrambi ottimizzabili sulla base dei criteri di Process Intensification.

La Process Intensification si basa su principi spesso radicalmente innovativi ("paradigm shift"), la cui implementazione è subordinata al superamento di barriere concettuali e pratiche, le principali delle quali sono:

- 1) insufficiente know-how da parte dei tecnologi di processo;
  - 2) carenza di impianti pilota ed elevato rischio (tecnico e finanziario) di implementazione di dispositivi PI su scala industriale operanti su linee di produzione esistenti;
  - 3) elevato rischio (tecnico e finanziario) di sviluppo di prototipi su scala industriale;
  - 4) sistemi di controllo non specificatamente sviluppati per i nuovi dispositivi Process Intensification;
  - 5) insufficiente consapevolezza, a livello manageriale, dei benefici potenzialmente conseguibili mediante una strategia di Process Intensification.
- Il superamento di tali barriere richiede una serie di azioni, parte delle quali di recente già intraprese:

- 1) uno specifico supporto finanziario alla ricerca di base e applicata quale

ATTUALITÀ

prerequisito al raggiungimento della dimostrazione su scala laboratorio e al successivo sviluppo di prototipi su scala pilota (in questo senso, l'implementazione di strategie di Process Intensification costituisce una delle tematiche di ricerca finanziate dalla Comunità Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro);

- 2) lo sviluppo di nuovi metodi analitici e di misura (anche in-situ) per una migliore comprensione degli aspetti termodinamici e cinetici caratteristici dei processi chimici a livello molecolare;
- 3) l'implementazione di modelli non-lineari più rapidi e robusti per la modellizzazione di reazioni chimiche;
- 4) il potenziamento delle azioni di "disseminazione delle conoscenze".

## **Biotechnologie industriali e ambientali**

Con "biotecnologie bianche" si intendono le biotecnologie industriali e quelle ambientali, ossia le biotecnologie di interesse sia per le industrie farmaceutiche (antibiotici, vaccini, anticorpi monoclonali, vitamine, aminoacidi, eccipienti farmaceutici ecc.) ed alimentari (starter microbici, vitamine, aminoacidi, enzimi, proteine, acidi organici ecc.), com'è nella tradizione delle biotecnologie industriali, sia per la moderna industria chimica e tessile (fine chemicals, building blocks, biopolimeri, biolubrificanti ecc.), della cosmetica (antimicrobici, antiossidanti, biopolimeri ecc.), dell'energia (biocombustibili e biocarburanti ecc.) e della protezione ambientale (biosensori, e tecniche di biorisanamento, processi avanzati di biotattamento e biovalorizzazione di scarichi e rifiuti ecc.).

Sulla spinta dell'aumento del costo del petrolio, si sono manifestati negli ultimi anni chiari segnali di un fortissimo impegno nelle biotecnologie bianche. Si prevede in particolare una fortissima espansione dell'alternativa biologica agli attuali prodotti chimici (da 30 a 310 miliardi di US\$ nel periodo 2001-2010 contro un valore totale di questi prodotti che aumenta solo da 1200 a 1600 miliardi di US\$ nello stesso periodo). Il mercato dei prodotti delle biotecnologie bianche è in rapida crescita anche in Europa con incrementi fra il 40 e il 70%.

Di fronte a questa opportunità però il settore italiano delle biotecnologie bianche si presenta molto debole e diviso, rappresentato com'è da una serie di piccole o piccolissime aziende assolutamente non competitive rispetto alle aziende multinazionali del settore.

Però esistono nel settore evidenti priorità di ricerca per una rapida e competitiva crescita in Italia:

- 1) nuovi e/o migliorati processi biocatalitici per sintesi chimiche i cui obiettivi specifici sono i seguenti:
  - a) ottimizzare l'attività degli enzimi e microrganismi esistenti;
  - b) metodologie rapide e efficienti per selezionarne dei nuovi;
  - c) formulazione di enzimi efficienti e di semplice utilizzo;
  - d) miglioramento della progettazione e ingegneria di processo;
- 2) strategie innovative e/o migliorate per la valorizzazione delle biomasse italiane e dei surplus, sottoprodotti, residui ed effluenti (incluse acque di scarico) dell'industria agroalimentare del Paese, i cui obiettivi specifici sono:
  - a) valorizzazione delle biomasse, e dei residui e sotto-prodotti dell'industria agroalimentare, uso più razionale delle biomasse nazionali specifi-

che e alternative ai carboidrati. Obiettivo: adattare a queste biomasse i processi di bioconversione, migliorando l'attività e la sensibilità degli enzimi e dei microrganismi e identificando le sinergie con i processi tradizionali oleochimici;

b) sviluppo della prossima generazione di processi di fermentazione ad alta efficienza. Obiettivi: aumento delle rese di processo (engineering metabolico e bio, batteri specializzati, intensificazione di processo); migliore passaggio di scala; intensificazione del processo; riduzione dei residui (sviluppo di tecniche combinate e riciclo);

c) processi eco-efficienti e loro integrazione: bioraffinerie. Lo sviluppo di bioraffinerie richiede di sviluppare in maniera integrata un insieme di nuovi processi che permetta lo sfruttamento di tutte le componenti della biomassa di partenza. A tal fine è necessario studiare il valore dell'intera catena della bioraffineria per ottimizzare i costi, ridurre le emissioni, integrare la produzione. I seguenti aspetti, in particolare, sono i più critici: economia ed eco-efficienza della produzione; implementazione delle tecnologie di bioraffinazione; identificazione delle molecole piattaforma (*bulk chemicals*).

## **Miglioramento dei bioprocessi per la produzione di biocombustibili da biomasse**

- a) Processi di idrolisi di biomasse disponibili a basso costo;
- b) Processi di fermentazione ad etanolo;
- c) Processi per la formazione di biogas (biometano e biidrogeno);
- d) Integrazione dei processi di biogas con sistemi di conversione a energia elettrica, quali celle a combustibili.

Fra le azioni da intraprendere per la salvaguardia dell'ambiente gli interventi basati su processi biologici (biotecnologie ambientali) sono destinati a una sempre più estesa applicazione in quanto, rispetto ai processi chimici e fisici, sono in genere meno onerosi dal punto di vista economico e più conservativi delle caratteristiche originali dell'ambiente naturale.





Occorre, peraltro, considerare che lo scaling-up di un processo biotecnologico è spesso molto impegnativo e richiede il concorso di conoscenze e metodologie che appartengono non soltanto alle scienze biologiche, ma anche ad altri ambiti disciplinari (principalmente alle scienze chimiche e all'ingegneria di processo); inoltre, per valutare la competitività di un processo biotecnologico in scala industriale è indispensabile la valutazione degli aspetti economici del processo produttivo che si vuole realizzare.

Si riportano, a titolo di esempio, alcuni settori delle biotecnologie ambientali caratterizzati da attività di ricerca e sviluppo fortemente innovative:

- *depurazione di acque reflue civili e industriali*: rimozione di sostanze xenobiotiche (processi biologici sequenziali; processi combinati chimici-fisici-biologici), processi avanzati di rimozione per via biologica di azoto e fosforo, controllo del bulking filamentoso, minimizzazione dei fanghi di risulta (disintegrazione per via biologica, metabolismo disaccoppiato, granulazione aerobica), sviluppo di configurazioni innovative di bioreattori (reattori a biofilm adesivo, bioreattori a membrana, bioreattori batch in sequenza di fase) sviluppo di processi depurativi naturali (fitodepurazione, lagunaggio);
- *bonifica biologica in situ di suoli e acque di falda* (stimolazione di processi biologici naturali, barriere permeabili a film biologico);
- *trattamento biologico di sedimenti* (dopo dragaggio e trattamenti separativi);
- *ottimizzazione della produzione di biogas e di composti di qualità tramite digestione o co-digestione di rifiuti municipali, industriali e agricoli* (processi a fasi separate; adozione di condizioni di termofilia);
- *processi bioelettrochimici*: sviluppo di MFC (Microbial Fuel Cells) innovative con produzione di energia elettrica accoppiata a depurazione di effluenti inquinanti, impiego di elettrodi come donatori diretti di elettroni in processi di respirazione anaerobica, produzione di idrogeno, di metano e composti ad elevato valore aggiunto in sistemi bioelettrochimici;
- *sviluppo di biosensori e nanobiosensori* (per inquinanti liquidi e gassosi);
- *processi enzimatici di depolimerizzazione di materiali plastici*.

## Il biorisanamento

Risulta necessario studiare e sviluppare nuove tecnologie di bioremediation, in particolare:

- a) migliorare le conoscenze sui microrganismi (batteri, funghi);
- b) migliorare l'ingegneria di processo nelle specifiche condizioni *in situ*;
- c) creare ed implementare nuovi *tools* biotecnologici per la caratterizzazione dei siti, la progettazione degli interventi e la valutazione degli effetti.

## Materiali e innovazioni di prodotto

### Materiali catalitici

Premesso che la catalisi eterogenea costituisce uno strumento formidabile per la realizzazione di processi sintetici a impatto ambientale ridotto o nullo, la chimica dei materiali funzionali costituisce un settore estremamente esteso e diversificato che presenta interazioni e sovrapposizioni con altre aree tematiche di ricerca sia del consorzio INCA sia di altri consorzi. La preparazione e caratterizzazione di materiali catalitici così come le tecnologie di superficie non possono prescindere da una profonda conoscenza della nanoscienza per quanto riguarda in particolare l'ottimizzazione del processo.

Nel secolo scorso la preparazione di materiali catalitici era essenzialmente basata sulla loro attività intesa come produzione del più alto numero di molecole per unità di area e per unità di tempo. Ciò era dovuto al fatto che lo smaltimento dei sottoprodotti non era particolarmente costoso.

Oggigiorno la situazione è drasticamente cambiata e l'alto costo del trattamento dei sottoprodotti così come i problemi connessi con il loro impatto ambientale hanno reso la selettività il primo obiettivo nel *design* di un catalizzatore anche a scapito della sua attività. L'obiettivo finale di qualunque studio catalitico è l'applicazione su larga scala; ne consegue pertanto che il *design* di un catalizzatore deve essere realizzato tenendo conto, fin dall'inizio, anche della tipologia di impianto sul quale verrà applicato. In un approccio di tipo supramolecolare il sito catalitico, su una superficie di supporto, viene assimilato ad un nanoreattore nel quale la trasformazione chimica è il risultato di una cooperazione sinergica fra il sito attivo vero e proprio ed il suo intorno chimico, esattamente come accade in un enzima.

Imitando la natura si possono progettare processi sequenziali che avvengono in spazi estremamente limitati e siano strutturalmente connessi l'un altro in modo tale che il prodotto di una reazione sia il substrato od il catalizzatore della reazione successiva. Questa cascata di processi è di crescente interesse come strumento per ottenere un aumento di efficienza con minor difficoltà da una scala di laboratorio all'impianto industriale.

È pertanto obiettivo sintetico di fondamentale importanza poter realizzare sistemi catalitici combinati che siano in grado di operare in sequenza promuovendo *multistep* in continuo in cui produzione e sperimentazione avvengano simultaneamente. Va sottolineato che tale approccio costituisce anche uno degli strumenti primari per realizzare la cosiddetta *process intensification*.

Una delle più recenti linee di ricerca in questo settore riguarda la costruzione di catalizzatori multifunzionali, capaci di promuovere con alta efficienza e selettività processi che necessitano della coesistenza di siti con

opposte caratteristiche (es: acido-base, red-ox), che non si annullino però vicendevolmente. La preparazione e caratterizzazione di tali sofisticati materiali catalitici, sempre più simili ad enzimi, necessita più che mai di profonde conoscenze affidate ad un'intensa cooperazione tra esperti di settore specifici.

La catalisi eterogenea è quindi uno strumento per la realizzazione di:

- processi eco-sostenibili
- processi in mezzi eco-compatibili
- processi solvent-free
- processi multicomponente
- processi in flusso continuo
- preparazione ed utilizzo di catalizzatori multifunzionali.

## Applicazioni

### Monitoraggio di inquinanti urbani

Il monitoraggio è l'osservazione del destino di uno xenobiotico dal momento in cui viene immesso nell'ambiente al momento in cui agisce sull'organismo. Scopo del monitoraggio è quello di portare all'adozione di adeguati sistemi di prevenzione, attraverso una valutazione continua o periodica dell'esposizione, degli effetti ed una corretta interpretazione dei dati. Scopo del monitoraggio ambientale è la valutazione dei livelli di esposizione esterna attraverso matrici ambientali, quali aria, acqua, suolo ed alimenti. Nell'ambito particolare del monitoraggio biologico gli indici misurati possono essere rappresentati da composti chimici come tali, dai loro metaboliti o dagli effetti biochimici indotti dagli stessi composti chimici (o dai loro metaboliti). Le misurazioni vengono effettuate in un'ampia gamma di matrici biologiche di provenienza umana (urina, sangue, aria espirata).

Le concentrazioni di cancerogeni aromatici, quali appunto il benzene ed analoghi, hanno avuto un incremento nell'atmosfera delle città come conseguenza della sostituzione delle benzine contenenti piombo con le benzine verdi che hanno nella loro composizione un alto livello di tali composti.

Composti ossigenati tracce, per il raggiungimento del numero d'ottano, inoltre dipendono fortemente dall'efficienza dei catalizzatori utilizzati negli autoveicoli che a loro volta dipendono non solo dal grado di usura ma anche dalle condizioni di marcia.

Circa il 17-19% del benzene rilevato nei centri urbani proviene dalla sua evaporazione durante le fasi di stoccaggio, trasporto, rifornimento e durante le fasi di marcia e di sosta degli autoveicoli, la restante parte risulterebbe dalle emissioni degli stessi veicoli.

Il monitoraggio si sta evolvendo verso metodi sempre più selettivi, capaci di ridurre le fasi di separazione dei componenti in miscela, più accurati, possibilmente lineari, con risposte in tempo reale (ai fini di segnalare eventuali situazioni di allarme), capaci di essere incorporati all'interno di stazioni sperimentali urbane. Un aspetto puntualmente sentito riguarda la speciazione chimica: ormai non sempre le concentrazioni totali sono sufficienti come valori per una corretta valutazione; contano cioè sempre di più i contributi che le singole specie danno alle concentrazioni totali.

I metodi chimici analitici innovativi e tutta la sensoristica (fino ai nasi e lin-

gue elettronici) possono dare un contributo fondamentale alla soluzione di questo problema ambientale.

### Ambiente e beni culturali

Sebbene oggi l'attenzione dei ricercatori e dei tecnici dell'ambiente sia spesso concentrata sugli inquinanti organici anche a livello di traccia, storicamente sono stati gli inquinanti inorganici i primi ad essere studiati ed ancora oggi molte delle centraline che controllano l'inquinamento urbano misurano inquinanti inorganici come CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>. Anche la prima emergenza ambientale da traffico è stata correlata a composti inorganici, in particolare a composti del piombo utilizzati come antidetonanti nella benzina rossa.

Gli inquinanti inorganici oltre all'azione diretta che esercitano sull'ambiente e sulla salute umana, intervengono anche in via indiretta attraverso reazioni fra loro e con altri componenti naturali ed antropici dell'atmosfera interferendo sui bilanci ambientali di specie di grande importanza (radicali, ozono, composti alogenati), nei processi chimici dell'atmosfera, nella conservazione e protezione dell'ambiente, nella produzione di effetti che svolgono un ruolo determinante sulla qualità dell'ambiente e su tutta la vita dell'ecosistema (effetto serra, buco dell'ozono, cambiamenti climatici).

Un aspetto altrettanto importante riguarda l'interazione di questi inquinanti con materiali dei beni culturali: la solfatazione dei materiali lapidei, la corrosione dei metalli, l'idrolisi di lignina e cellulosa sono alcuni dei processi legati alla qualità dell'ambiente che avvengono a danno dei beni culturali con il loro conseguente degrado. Si comprende da ciò come il primo intervento protettivo di tali beni non possa che riguardare proprio l'ambiente nel quale sono collocati, venendo così a complementarsi l'un l'altra la scienza e la tecnologia dell'ambiente e quella dei beni culturali ed a integrarsi le esperienze maturate sui due fronti. L'acidità atmosferica è il primo nemico dei beni culturali: essa è in grado di solforare il marmo trasformandolo nell'assai meno nobile e stabile gesso, di corrodere a secco ed ad umido i materiali metallici, di idrolizzare lignina e cellulosa rendendole assai meno concrete e soprattutto, nel caso della carta assai meno abile a conservare e trasmettere informazioni e documentazione. Ma non solo l'acidità: anche i radicali prodotti nei processi imperfetti di combustione su cui si basano le produzioni energetiche, anche quelle nei veicoli a motore, sono specie reattive instabili e come tali responsabili dell'attacco ad innumerevoli matrici biologiche ed abiologiche.

C'è infine il problema dell'ambiente indoor: la globalizzazione ha allargato le frontiere ed ha reso sempre più attuale il turismo di massa, al quale corrisponde un uso ed una funzione sempre più massificate delle opere d'arte: gli ambienti indoor dei musei diventano però, in assenza di provvedimenti limitativi delle libertà individuali nell'interesse generale, altrettanti fonti di rischio e/o di danno per importanti opere d'arte per cui diviene sempre più necessario intervenire con monitoraggi e correzioni di ambiente e di condizioni (umidità, luce). Conoscenza, prevenzione, restauro, consolidamento e stabilizzazione sono le fasi di un programma che voglia rimediare ai danni provocati dall'ambiente ai beni culturali.

### **Impronta ecologica degli alimenti**

I cambiamenti climatici, al di là dell'interpretazione della loro causa, impongono alla società civile di adottare tutti i possibili provvedimenti per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>. Poiché la dieta alimentare sta nella nostra società assumendo un significato sempre più rilevante in quanto capace non solo di fornire un nutrimento ed un sostegno, ma anche di agire per lo stabilirsi di uno stato di salute che possa ridurre al minimo il consumo di farmaci, risulta chiaro come il costo in termini di CO<sub>2</sub> emessa per produrre gli alimenti sia una valutazione assai significativa. L'impronta ecologica degli alimenti rappresenta per l'appunto nel ciclo di vita di un alimento il costo in termini di CO<sub>2</sub> emessa. La sua determinazione richiede la messa a punto di metodi di screening, di analisi, di valutazione del ciclo di vita che devono essere sempre più ricercati nei progetti scientifici.

### **REACH: prospettive ed opportunità per i chimici**

Il regolamento REACH approvato dall'Unione Europea rappresenta un primo importante traguardo nella direzione di assicurare la sicurezza di cittadini ed utenti. La sua approvazione non è stata indolore: infatti è chiaro che esso rappresenta da un lato un peso economico notevole per l'industria costretta a garantire rispetto a differenti aspetti i composti che mette in circolazione in quantità "significative" e dall'altra un impegno molto stringente per la comunità scientifica da due differenti punti di vista, metodi e test di verifica.

*Metodi e test:* è questo un settore che rappresenta una grande opportunità ma anche un grande impegno sociale, per il chimico in quanto il rischio chimico – benché ad esso si lavori da anni per la definizione di indicatori, di software, di algoritmi – di fatto è ancora di assai difficile valutazione quantitativa. Vari approcci sono stati tentati: da quello termodinamico a quello calorimetrico da quello biologico a quello enzimatico, ma ancora oggi il metodo basato sulla sperimentazione animale mantiene la sua significativa presenza. I dubbi sulle conclusioni che da esso derivano dettati dalla differenza di organismo fra campione esaminato e campione reale, ed i lunghi tempi di risposta che possono comportare danni irreversibili per il ritardo di intervento, non sono stati sufficienti a sostituirlo completamente trovando sostenitori in quanti ancora lo ritengono l'approccio più credibile. Il chimico ha finora dato un contributo significativo alla sua sostituzione mettendo a fuoco reazioni/test in vitro ed evidenziando risposte da parte dei centri recettori che significativamente rappresentano l'effetto di tossici, tali o presunti. Lo sforzo deve proseguire arricchendo questi metodi chimici alternativi di misure che tolgono ad essi alcuni dubbi che in parte giustamente permangono e relativi alla differenza fra singola cellula e sistema cellulare integrato, fra sistemi fisiologicamente statici e dinamici, tutto ciò anche in relazione agli aspetti di etica che la sperimentazione animale drammatizza, anche crudelmente.

Altre strade possono essere battute oltre a quelle dei test in vitro fra composti testati ed accettore: si pensi ai sensori enzimatici, ai biosensori ibridi o a tessuto, ai sensori di ecopersistenza, agli indicatori biologici. Con tali test, che rispetto alla sperimentazione animale dovrebbero garantire risposte tempestive, si dovrebbero ricavare indici integrali capaci di funzionare da sistemi di screening e monitor semaforici: la luce verde dovrebbe esse-

re garanzia di accettabilità, la luce rossa dovrebbe precluderla, quella arancione dovrebbe indurre a saggi di approfondimento rispetto all'indicazione dei valori limite e caratteristici previsti dalla normativa. Questo approccio più rapido e meno costoso contribuirebbe ad aumentare il numero di composti testati nell'unità di tempo ed al tempo stesso ad indirizzare le risorse nella direzione giusta, sotto certi punti di vista sdrammatizzando il problema numero uno dell'applicazione del REACH e cioè il carico economico che esso comporta a motivo delle analisi richieste, carico che deve essere sostenibile e compatibile con le attività industriali tenuto anche conto delle disomogeneità delle regole nel mercato globale. Tutto ciò però significa riconoscimento dei marker integrali individuati e quindi una faticosa opera di mediazione fra comunità scientifica, politica, industriale e sistemi di normazione. Sulla spinta del REACH Europeo anche l'EPA americano sta riconsiderando le linee per la definizione dei metodi di valutazione del rischio da prodotti e composti in commercio, valutati in circa 80.000 correntemente sul mercato e circa 700 nuovi ogni anno. La nuova generazione di metodi vuole soprattutto basarsi su test in vitro rispetto ai lunghi e costosi, oltre che eticamente discussi, metodi basati sulla sperimentazione animale. L'EPA ha indicato gli avanzamenti nella genomica e nelle scienze computazionali i principali contributi per questa nuova generazione di metodi di "risk assessment". Nei prossimi 10 anni EPA programma di adottare test di tossicità basati sull'insieme di risposte, una sorta di rete, derivante dalla interazione fra geni, proteine e piccole molecole. Un ulteriore approccio combina i metodi computazionali di predizione con i metodi di screening sviluppati dall'industria farmaceutica per la scoperta di nuovi farmaci e la tecnologia robotica.

Un secondo punto riguarda la necessità, per quei composti che non dovessero superare il test REACH di alternative credibili. Ciò è particolarmente vero se riferito al caso di farmaci, di cosmetici, di prodotti per l'igiene, per la sicurezza e la protezione ambientale. Questo aspetto è ancora una grande opportunità per la chimica: si tratta di correlare proprietà chimiche in positivo e in negativo alle varie strutture ed ai vari gruppi funzionali presenti nelle molecole esaltando il ruolo creativo del Chimico come ingegnere delle molecole. La chimica è stata definita la disciplina della fantasia e della creatività: il REACH rappresenta un importante campo di dimostrazione di queste due importanti qualità e quindi un'imperdibile opportunità.



Stazione per il rilevamento della qualità dell'aria