

L'approccio storico-epistemologico all'insegnamento delle scienze: un'analisi semiotica delle rappresentazioni della materia e delle sue trasformazioni.

Ezio Roletto*, Alberto Regis*, Mohamed Soudani#, Olfa Soudani#

*Gruppo SENDS (Storia ed Epistemologia per una Nuova Didattica delle Scienze) – Università di Torino
(ezio.roletto@unito.it)

#LEPS –LIRDHIST, Università Claude Bernard, Lyon, Francia

Riassunto

In questo articolo viene presentata un'analisi semio-epistemologica della storia della modellizzazione della materia e delle sue trasformazioni, in particolare nel periodo fine XVIII - inizio XX secolo. Facendo ricorso alla teoria semiotica di Peirce, si intende mostrare il ruolo giocato in questo processo dal segno iconico; inteso non come strumento di un pensiero ancora incerto e quindi ormai inutile, ma piuttosto come strumento euristico privilegiato mediante il quale i chimici hanno esplorato la materia. Interrogarsi sul ruolo giocato da tale segno nell'evoluzione del pensiero chimico, porta a considerare la storia della chimica in una nuova prospettiva, rendendola un vero laboratorio per la didattica. Il segno iconico risulta così essere non un ausilio didattico semplificatore, ma uno strumento oggi indispensabile agli allievi, come ieri lo fu agli scienziati, per accedere alla realtà microscopica, muovendo dagli stessi problemi scientifici.

Abstract

In this article we present a semiotic and epistemological analysis of the historical evolution of the modelization of matter and of its transformations by means of graphical signs, mainly focusing on the period that goes from the end of XVIIIth to the beginning of XXth century. Taking advantage of the Peirces's theory of signs, we show the role played by the iconic sign in the modelization process. In particular we argue that iconic sign is not the rough instrument of a prescientific thought; it rather represents the privileged heuristic device used by chemists in the exploration of the structure of matter. Focusing on the role played by iconic signs in the evolution of chemical thought allows to conceive the history of chemistry as a veritable laboratory for teaching chemistry through a problem-based approach. In such a perspective, we reject the conception of iconic sign as a primitive teaching aid, employed to simplify a complicated topic; it rather turns out to be the most suitable device available to students of the present days to accede to the microscopic level of matter, as much useful to them as it was to scientists in the past, within a teaching strategy that moves from the same scientific problems that those scientists have faced.

1 – INTRODUZIONE

Fin dai primi anni della scuola secondaria, l'insegnamento delle scienze prevede di introdurre lo studio delle trasformazioni della materia e la loro interpretazione. Quasi sempre gli allievi sono chiamati ad accettare quanto afferma l'insegnante, il quale propone di primo acchito i modelli di base della chimica, ossia il modello atomico e quello molecolare e i concetti ad essi connessi. L'allievo viene così sottoposto a una brutale e acritica "immersione microscopica", con il rischio di bloccare la sua mente proprio quando si pensa di favorire lo sviluppo di un atteggiamento scientifico. In genere, questo approccio segna l'avvio di un processo che porta la maggior parte degli allievi a ritenere che « la chimica sia impossibile da capire e consista in una serie mostruosa di nozioni astruse da imparare solo a memoria» [1]

I ricercatori in didattica hanno compreso [2] la necessità di proporre approcci nuovi all'insegnamento dei contenuti fondamentali della chimica di base, approcci in grado di portare gli allievi alla comprensione di tali contenuti, premessa indispensabile per sviluppare competenze. In particolare, alcuni propongono un approccio denominato *problem based learning* oppure *problem based teaching* [3] in cui l'allievo viene guidato a costruire il proprio sapere con un modo di procedere analogo a quello adottato dai ricercatori per generare nuovo sapere scientifico. Grazie alle svariate ricerche sull'educazione alle scienze, è oggi opinione diffusa che, fin dall'inizio del loro studio, gli allievi sono in grado di impegnarsi in attività scientifiche di modellizzazione, e di dare vita a discussioni scientifiche tra pari nelle quali essi argomentano i propri punti di vista sia teorici sia sperimentali facendo così evolvere collettivamente le loro conoscenze. Si tratta di modi di lavorare classificati come socio-costruttivistici che assomigliano al modo di lavorare degli scienziati. Essi infatti permettono a ogni attore (scienziato in un caso, allievo nell'altro) di costruire conoscenze, affrontando individualmente e collettivamente problemi scientifici la cui soluzione richiede l'elaborazione e la discussione di idee e il confronto di risultati. In questo modo, gli allievi hanno la possibilità di apprendere i concetti e i modelli della chimica e, contemporaneamente, di capire come lavorano i ricercatori, nonché di comprendere lo statuto evolutivo del sapere

L'approccio storico-epistemologico all'insegnamento delle scienze

scientifico. D'altra parte, vi è chi ritiene opportuno [4] ricorrere alla storia della disciplina come fonte d'ispirazione per ricavare problemi scientifici su cui impostare le sequenze didattiche.

2 – STORIA, EPISTEMOLOGIA E DIDATTICA

L'apprendimento della chimica risulta particolarmente difficile perché le sostanze e le loro trasformazioni possono essere descritte sia a livello macroscopico sia a livello microscopico e l'allievo, come lo scienziato, deve operare un continuo va-e-vieni tra i due livelli, mantenendoli tuttavia nettamente distinti ed evitando accuratamente di confonderli. La spiegazione dei fatti empirici percepibili facendo ricorso a un mondo di entità infinitamente piccole, invisibili, è fonte di grandi difficoltà per l'insegnamento e l'apprendimento della chimica. Da più di un secolo [5], si ritiene che tali difficoltà potrebbero essere più facilmente superate introducendo la storia della chimica nel suo insegnamento, il che permetterebbe di adeguare quest'ultimo al processo di costruzione del sapere disciplinare, facilitando il progressivo addentrarsi degli allievi nella sua comprensione.

Già Stanislao Cannizzaro [6] scriveva nel 1854: «Per condurre i miei allievi al medesimo convincimento che io ho, gli ho voluti porre sulla medesima strada per la quale io ci son giunto, cioè per l'esame storico delle teorie chimiche. Lo scopo dell'insegnamento chimico... non è solo di confidare alla memoria degli studenti un certo numero di conoscenze ... (positive), ma ancora di cooperare alla loro sana educazione intellettuale».

Il punto di vista di Cannizzaro è stato ripreso da altri studiosi tra cui Ernst Mach e Pierre Duhem per la fisica, Ernst Mayr per la biologia. Più recentemente, molti ricercatori [7] hanno cercato di spiegare perché la storia della chimica può migliorarne l'insegnamento e l'apprendimento. Quattro sono le ragioni principali che emergono dai loro lavori:

- La ricerca storica sullo sviluppo della chimica permetterebbe di chiarire i processi d'evoluzione dei concetti chimici, mettendo in evidenza i problemi che gli scienziati dovettero affrontare e come pervennero a superarli. In questo modo si forniscono indicazioni su una questione epistemologica molto importante relativa al «come conosciamo».
- La conoscenza storica dello sviluppo della chimica può aiutare a comprendere le difficoltà d'apprendimento e le concezioni alternative degli allievi
- Attraverso un percorso storico gli allievi possono comprendere la natura della chimica in quanto scienza contemporaneamente teorica e sperimentale.
- La conoscenza della storia della chimica permette agli insegnanti di disporre di problemi interessanti su cui impostare il proprio insegnamento, e di conseguenza progettare sequenze d'apprendimento efficaci.

Come sostiene Matthews [4] «*Nell'insegnamento delle scienze, la dimensione storica e filosofica non deve tradursi in un mole maggiore di cose da conoscere, ma promuovere la conoscenza di problemi interessanti e importanti e l'interesse per la loro soluzione*».

Storia e didattica della chimica: quale relazione?

Se si ammette che possa essere utile, da un punto di vista educativo, ricorrere alla storia delle scienze nel loro insegnamento, si deve pure tenere presente che a scuola non si riproduce la storia: ossia si deve distinguere nettamente la storia delle scienze dal ruolo della storia nella didattica delle scienze. Due sono gli approcci [4] con cui si è finora affrontato il problema del ricorso alla storia di una disciplina nel suo insegnamento. Quello più comunemente adottato consiste nel considerare il ricorso alla storia come qualcosa che si aggiunge ai saperi che costituiscono il nocciolo dell'apprendimento. Questo approccio, definito “minimalista”, consiste, in genere:

- Nel presentare uno sfondo storico a soggetti contemporanei (per esempio, accompagnare le idee più recenti su un determinato problema con una cronologia delle “scoperte scientifiche”).
- Nel redigere un breve profilo biografico di illustri scienziati.
- Nel citare qualche aneddoto, sovente leggendario (la vasca da bagno di Archimede, la mela di Newton, il serpente di Kekulé, ecc.).

Si tratta di riferimenti superficiali con i quali si *introducono* elementi di storia nell'insegnamento di una disciplina scientifica, però senza operare una riflessione adeguata sulla loro finalità. Un altro approccio, che si potrebbe qualificare come “massimalista”, mira a *integrare* la storia nell'insegnamento di una disciplina, che viene di fatto organizzato su basi storiche. Questo secondo approccio è senz'altro troppo complesso per diventare pratica abituale degli insegnanti. Per trovare una risposta soddisfacente al problema della relazione tra la storia delle scienze e il loro insegnamento, conviene partire dalla struttura didattica e analizzare le relazioni che ogni componente – allievo, sapere, insegnante – intrattiene con la storia delle scienze. La riflessione può dunque essere sviluppata su tre filoni: [8]

1. Storia del pensiero scientifico e studio delle concezioni alternative degli allievi.
2. Storia della scienza, epistemologia applicata e costruzione dei contenuti di apprendimento.
3. Storia della scienza e formazione degli insegnanti.

La nostra ricerca si inserisce nella seconda opzione e ha come fondamento la convinzione che i modelli e le attività di modellizzazione offrono una base pertinente per fare a scuola dell'epistemologia applicata e quindi concorrere all'educazione scientifica degli allievi. Si tratta di un intervento di ingegneria didattica, basato sulla storia e l'epistemologia della chimica della prima metà del XIX secolo in cui si utilizza una traccia storica per organizzare l'insegnamento/apprendimento di contenuti disciplinari. In tale intervento, lo sviluppo storico è integrato, fin dall'inizio dell'insegnamento della chimica, nella (ri)costruzione del sapere da parte degli allievi. In altri termini, si usano i materiali storici come risorse didattiche con le quali progettare percorsi di apprendimento che non solo sfociano nell'acquisizione di conoscenze disciplinari, ma che portano anche gli allievi a familiarizzare con i problemi affrontati dagli scienziati, gli oggetti mentali da loro inventati e i loro modi di ragionare.

Questo articolo è relativo al primo stadio della nostra ricerca, che consiste nell'analisi del processo di modellizzazione della materia e delle sue trasformazioni – costruzione dei concetti di atomo e molecola e dei modelli atomico e molecolare – da parte degli scienziati tra la fine del XVIII e l'inizio del XX secolo. Facendo ricorso alla teoria del segno di Peirce¹ [9], si è condotta un'analisi epistemologica che costituisce il fondamento di un intervento di ingegneria didattica per la progettazione di sequenze di insegnamento-apprendimento di tali contenuti nella scuola secondaria di secondo grado. I risultati della sperimentazione delle sequenze saranno presentati in articoli successivi.

3 – L'EPISTEMOLOGIA SEMIOTICA DI PEIRCE

Peirce sostiene che ogni rapporto che l'essere umano ha con il mondo è sempre frutto di un'interpretazione. La scienza è un processo di conoscenza oggettivo nel suo modo di indagare il mondo materiale, e produce conoscenza di una realtà dotata di esistenza indipendente. Le apparenze sensibili non coincidono con la realtà, ma ce ne forniscono solo una rappresentazione: «State in guardia dall'assumere qualcosa come vero perché sembra verosimile o ovvio, perché questa è la grande fonte di tutte le delusioni». La natura delle cose del mondo è di essere un segno, una provocazione per una risposta. Lo scopo primario del pensiero non è quello di *salvare le apparenze*, ma piuttosto di comprendere il mondo reale, di trovare qualcosa di sconosciuto a partire da ciò che è conosciuto; al di là delle apparenze, ossia delle impressioni sensoriali, esistono entità la cui presupposizione e conoscenza risulta indispensabile per l'effettiva comprensione del mondo materiale. Peirce definisce il reale come «ciò i cui caratteri sono indipendenti da quello che chiunque può pensare che essi siano» ed esplicita con queste parole il suo pensiero a proposito della relazione tra realtà e verità scientifica: «In tutte le ricerche scientifiche, menti diverse possono partire da punti di vista anche i più antagonisti, ma il progresso dell'indagine le porterà, in virtù di una forza esterna a loro stesse, alla stessa conclusione [...] L'opinione sulla quale da ultimo si troveranno d'accordo tutti coloro che indagano è ciò che intendiamo per verità e l'oggetto rappresentato in questa opinione è il reale. Questo è il modo in cui io spiegherei la realtà». La scienza è quindi un processo continuo di interpretazione e «la verità tende a coincidere con la realtà stessa così come essa sarà svelata da una ricerca idealmente universale compiuta da tutta la comunità scientifica».

Peirce ritiene che la radice dell'epistemologia, ossia della riflessione sulla natura della conoscenza scientifica, sia da ricercare nella semiotica, dottrina della natura essenziale e delle varietà fondamentali di ogni possibile semiosi.

«Per semiosi intendo un'azione o un'influenza che è o implica una cooperazione di tre soggetti: un segno, il suo oggetto e il suo interpretante, dove questa influenza tri-relativa non è in alcun modo risolvibile in azioni tra coppie. [Invece] tutte le azioni dinamiche, o azioni di forza bruta, fisiche o psichiche, o hanno luogo tra due soggetti o, in ogni caso, sono la risultante di queste azioni fra coppie».

Tutto ciò che viene pensato – oggetto, concetto o idea – incorre nello stesso processo semiotico e cognitivo. La pertinenza della teoria semiotica di Peirce per la didattica della fisica e della chimica è stata recentemente riconosciuta da svariati ricercatori. [10, 11]

I tre elementi della semiosi di Peirce

Peirce definisce un segno come «una cosa che rappresenta una seconda cosa a una terza cosa, il pensiero interpretante»: i segni sono quindi costituiti da tre parti interrelate: un *segno*, un *oggetto*, un *interpretante* (trittico OSI). Si può intendere il segno come un *significante*: per esempio, una parola, un'espressione, il fumo come segno del fuoco, ecc.; per oggetto si può intendere qualunque cosa venga *significato*: per esempio l'oggetto al quale si riferisce la parola, il fuoco segnalato dal fumo; l'interpretante va inteso come il *modo di comprendere* la relazione segno/oggetto.

Perché qualcosa sia un segno deve rappresentare qualche cosa d'altro chiamato oggetto; questi due elementi non potrebbero essere messi in relazione fra di loro se non vi fosse un terzo elemento, l'interpretante il quale fa conoscere qualcosa di nuovo. Secondo Peirce, il “significato” è una relazione triadica tra un segno, un oggetto e un interpretante. (Figura 1) Questa relazione triadica non è riducibile a relazioni diadiche tra un segno e un oggetto oppure tra un oggetto e un interpretante.

1. Charles Peirce (1839-1914), chimico, matematico e filosofo statunitense.



Figura 1 – Il triangolo semiotico di Peirce

Si è detto sopra che i segni sono costituiti da tre elementi: un segno, un oggetto, un interpretante. È evidente che questa affermazione dà adito a una certa confusione terminologica che richiede qualche precisazione. Peirce afferma che non tutti gli aspetti di un segno lo rendono significativo, ma soltanto una loro parte che egli denomina *representamen*: si tratta del segno “purificato”, ossia ridotto a quegli elementi essenziali che gli permettono di funzionare come significativo.

Si consideri, per esempio, un mucchietto di terra in un prato come segno delle talpe [12]. Non tutte le caratteristiche del mucchietto hanno importanza per significare la presenza di talpe. Il colore del mucchietto non gioca alcun ruolo: esso infatti varia in funzione della natura del terreno. Analogamente, non hanno importanza le sue dimensioni, dato che dipendono dalla taglia della talpa che lo produce: né il colore del mucchietto né le sue dimensioni lo rendono significativo. Ciò che ha realmente importanza è la relazione causale esistente tra il tipo di collinetta che si trova nei prati e le talpe: dato che le talpe producono mucchietti di terra, i mucchietti di terra significano – ossia sono un segno di – talpe. Di conseguenza, per un mucchietto di terra ciò che maggiormente conta per significare la talpa è l'interrelazione fisica tra mucchietto e talpa: l'elemento significativo di un segno, il suo *representamen*, è proprio questo “segno qualificato”.

Il segno determina un interpretante focalizzando la nostra comprensione su alcune caratteristiche della relazione significativa tra segno e oggetto: «Il *representamen* è determinato dall'oggetto *relativamente all'interpretante*, e determina l'interpretante *in riferimento all'oggetto*, in maniera tale da causare la determinazione dell'interpretante da parte dell'oggetto attraverso la mediazione di questo segno». La nostra capacità di comprendere un segno ci permette di ricavare informazioni, mediante il ragionamento *deduttivo*, oppure di avanzare congetture, mediante il ragionamento *abduuttivo*.

La connessione tra l'oggetto e il *representamen* è individuata da tre tipi di rappresentazioni: *icona*, *indice*, *simbolo*. L'*icona* o *somiglianza* è una rappresentazione che ha una relazione di somiglianza o di analogia con l'oggetto che rappresenta, in quanto ha in comune con questo qualche qualità: «[Essa] svolge la sua funzione di *representamen* in virtù di un carattere che possiede in se stessa e che possiederebbe allo stesso modo anche se il soggetto non esistesse. Ne sono esempi un'immagine, un grafo. Per esempio, è vero che la statua del centauro non sarebbe un *representamen* se il centauro non esistesse. Se rappresenta un centauro, però, lo fa grazie alla sua forma; e avrebbe la stessa forma anche se il centauro non esistesse». In effetti, il centauro non esiste come oggetto sensibile, esiste come oggetto pensato. La forma della statua del centauro rappresenta (*representamen*) il centauro così come viene pensato (e descritto).

L'*indice* è un segno che si riferisce all'oggetto che esso denota, in virtù del fatto che è realmente determinato da quell'oggetto, con il quale ha una relazione che consiste in una corrispondenza di fatto. L'indice soddisfa la funzione di *representamen* grazie a un carattere che non potrebbe avere se il suo oggetto non esistesse. Per esempio, sono indici la firma, la fotografia e l'impronta digitale; le pulsazioni rapide sono sintomi (indice) di febbre, il fumo è un indice del fuoco, lo sviluppo di un gas o il cambiamento di colore sono indici di una trasformazione chimica.

Il *simbolo* è una rappresentazione di natura arbitraria che «svolge la sua funzione esclusivamente perché è interpretato come *representamen*, indipendentemente da ogni similarità o analogia con il suo oggetto o da ogni connessione fattuale». È il caso delle parole in generale: la parola “gatto” non ha alcuna relazione, né grafica né fonetica con l'animale che essa designa. È pure il caso del linguaggio simbolico della chimica, dove i simboli non hanno alcuna relazione con le caratteristiche delle entità chimiche che essi rappresentano. I segni simbolici richiedono l'apprendimento di codici, di convenzioni di scrittura e di lettura per essere usati in modo appropriato.

Peirce chiama *interpretante* quel segno mentale, quel pensiero, quella rappresentazione che funge da mediazione soggettiva fra il *representamen* e l'oggetto. Per conoscere il significato di un segno, occorre affidarsi a un altro segno che lo interpreta. L'*interpretante* è ciò che, per la sua funzione, collega il segno e l'oggetto e permette di affermare: questo è segno di quello, questo significa quest'altro. Per chiarire il proprio pensiero, Peirce propone questa situazione: il rossore sulle guance è il segno della febbre per il medico. Sono qui presenti i tre poli della semiotica di Peirce: il «*representamen*», è il rossore; l'oggetto è la febbre; l'interpretante è il sapere medico che interpreta il rossore come segno della febbre. Il segno è tradotto in un oggetto (concreto o astratto) mediante un passaggio mentale, frutto dell'esperienza individuale, chiamato interpretante e inteso come un segno prodotto dalla nostra mente in reazione alla percezione del primo segno.

Non si deve confondere l'interpretante con l'interprete. Nelle interpretazioni che ogni persona costruisce, si manifesta certamente il *modo di interpretare* (interpretante) di quella persona (interprete), ossia le opinioni che l'interprete possiede in modo più o meno consapevole: nell'esempio sopra citato, l'interprete è il medico. Però per Peirce l'interpretante è un sistema costituito di segni, una cultura definita, un modo di interpretare le cose proprio di un determinato tempo, di una cultura, di una civiltà. Senza segno interpretante, afferma Peirce, non ci sarebbe conoscenza. Definire il sistema interpretante implica dunque il ricorso ad altri segni: Peirce arriva così a un concetto di significato del segno che porta a una semiosi illimitata, vale a dire a un processo di significazione del segno che continua a riprodursi.

La logica abduittiva

Secondo Peirce, il pensiero ha origine da una posizione di «credenza» quando questa viene smossa a causa del presentarsi di un dubbio, ossia di fronte a un evento polemico oppure a una situazione problematica. Il fine del pensiero è di raggiungere un'altra credenza nella quale il dubbio sia rimosso e si sia di nuovo messi in grado di agire secondo un abito razionale. *Dubbio e credenza* sono parole comunemente usate per riferirsi a discussioni di argomento religioso o in qualche modo metafisico. Peirce le usa per designare l'inizio di una qualsiasi questione, non importa se grande o piccola, e la sua risoluzione. La credenza ha queste tre caratteristiche:

1. È qualcosa di cui ci rendiamo conto.
2. Acquieta l'irritazione del dubbio.
3. Implica lo stabilirsi nella nostra natura di una *regola d'azione o abito* (modo di agire).

Secondo la logica tradizionale, i modi classici del ragionamento sono l'induzione e la deduzione. L'induzione consiste nell'assumere ciò che è vero per alcuni casi e nell'estenderlo a tutti i casi. Il ragionamento induttivo non può mai pervenire a una certezza assoluta perché non può mai esercitarsi sulla totalità dei casi. La deduzione è il processo contrario: parte da una premessa generale e ne trae le conclusioni logiche. Questi due modi di ragionare possono essere illustrati da due esempi molto semplici: se una persona conosce unicamente cigni di colore bianco, applicando il ragionamento induttivo dirà che tutti i cigni sono bianchi. Questa generalizzazione è valida fino a quando la persona non incontra un cigno di colore nero. Un esempio di ragionamento deduttivo è il seguente: Tutti gli esseri umani sono mortali; Paolo è un essere umano; Paolo è mortale.

Peirce sostiene che questi due modi di ragionare non solo non sono sufficienti per spiegare il funzionamento del pensiero, ma non sono neanche fondamentali; la mente umana non ragiona al suo inizio né induttivamente né deduttivamente. La sua potenza risiede nello stabilire che cosa è plausibile, che cosa è ragionevole, che cosa è probabile: il vero ragionamento fondamentale è quello che Peirce chiama «abduittivo». «La deduzione prova che qualcosa *deve* essere, l'induzione mostra che qualcosa è *attualmente* operativo, l'abduzione suggerisce soltanto che qualcosa *potrebbe essere*». L'abduzione è un processo che permette di generare nuove ipotesi, quando quelle disponibili sembrano non funzionare, derivando dall'effetto la causa probabile; per Peirce è proprio «grazie all'abduzione se c'è qualche possibilità di imparare qualcosa o di capire i fenomeni. L'abduzione è l'unico processo con il quale un argomento nuovo può essere introdotto nel pensiero».

Il modo di procedere può essere schematizzato in questo modo: si parte da un fatto F che risulta sorprendente in relazione a una teoria TE esistente. Basandosi sul sapere a disposizione, si avanza l'ipotesi che esista una teoria TA, diversa da TE, la quale, se fosse vera, renderebbe l'evento F del tutto plausibile; in questo modo, F non è più un fatto sorprendente e la teoria TA si rafforza. La nuova teoria TA viene posta come ipotesi e il suo carattere congetturale si mantiene nella conclusione, la quale conserva una forma ipotetica. Secondo Peirce così ragiona l'essere umano: con questo tipo di ragionamento gli scienziati costruiscono le ipotesi interpretative del mondo empirico.

Le attività di modellizzazione

Nel circuito della semiosi, il primo posto spetta al mondo materiale: il punto di partenza è l'oggetto che costituisce il primo motore della semiosi. La relazione triadica (segno – oggetto – interpretante) può essere applicata in modo particolarmente efficace alla modellizzazione della materia in chimica, processo nel quale ci si interroga su qualche cosa che non si vede e di cui si può immaginare l'esistenza grazie ad altri segni, in particolare gli indici, ossia le evidenze empiriche che permettono di «farsi un'idea» sulla natura del mondo.

Peirce sostiene che un'idea può essere comunicata direttamente soltanto mediante un segno che permette di ragionare su ciò che è possibile. L'approccio semiotico porta a distinguere le rappresentazioni mentali dalle rappresentazioni semiotiche: [13]

«Le rappresentazioni mentali sono l'insieme delle immagini mentali o delle concezioni che un individuo può avere su un oggetto o su una situazione, e su ciò che è loro associato. Le rappresentazioni semiotiche sono produzioni costituite con l'impiego di segni appartenenti a uno stesso sistema di rappresentazione (enunciato in lingua naturale, grafo, figura geometrica, formula algebrica). Tali rappresentazioni sembrano siano il mezzo mediante il quale un individuo può esternare le proprie rappresentazioni mentali, al fine di renderle visibili o accessibili ad altri».

L'approccio storico-epistemologico all'insegnamento delle scienze

Ne segue che la relazione triadica di Peirce permette di sfruttare nel lavoro di ingegneria didattica tutta la ricchezza epistemologica del processo di costruzione dei modelli atomico e molecolare della materia da parte dei chimici. In effetti, si conosce una situazione quando si è in grado di rappresentarla con un modello, essendo un modello un sistema di segni definiti in relazione tra di loro e quindi dotato di una sintassi, vale a dire di un insieme di regole.

I modelli scientifici sono prodotti dagli scienziati e, in generale, non sono il prodotto di un'unica persona che, con un colpo di genio, permetterebbe alla scienza di evolvere in modo subitaneo. In particolare, i modelli atomico e molecolare della materia occupano un posto chiave non solo nella storia della chimica, ma anche nel suo insegnamento. L'allievo al quale non viene data l'opportunità di comprendere e padroneggiare questi strumenti di base del pensiero chimico, incontrerà notevoli difficoltà a comprendere gli altri argomenti del corso di chimica. I modelli in oggetto sono l'esito di una lunga discussione, relativa al problema della corrispondenza fra un sistema di segni (struttura teorica) e una serie di evidenze empiriche, alla quale hanno partecipato svariati scienziati, sia chimici sia fisici. Nell'ambito delle attività di insegnamento-apprendimento, gli allievi dovrebbero essere impegnati in un processo progressivo di costruzione di questi strumenti interpretativi della struttura della materia e delle sue trasformazioni.

4 – LA STRUTTURA DELLA MATERIA E LE SUE TRASFORMAZIONI: DA LAVOISIER A CANNIZZARO

Nel corso dei secoli, i filosofi prima e gli scienziati poi si posero il problema di come rappresentare la struttura della materia e le sue trasformazioni. Questo problema è stato affrontato da due punti di vista, considerati contrapposti: un approccio macroscopico, basato sulle impressioni sensoriali e un approccio microscopico, basato sull'immaginazione di un meccanismo d'interazione fra particelle. Le interpretazioni proposte e l'evoluzione delle idee a esse relative possono essere analizzate alla luce della semiotica di Peirce, al fine di ricavare dalle soluzioni adottate nel corso della storia alcune considerazioni applicabili alla didattica della chimica.

4.1 – LAVOISIER E I SUOI ALLIEVI

Lavoisier fu fortemente influenzato dalle idee del filosofo Condillac, il quale era convinto che il progresso scientifico e il progresso linguistico si condizionassero a vicenda: «... i segni linguistici ... non solo agevolano la memoria, ma permettono il trapasso dalla sensazione alla riflessione e ci pongono in condizione di operare su nozioni altrimenti non determinabili» [14]. Nel 1787, facendo espresso riferimento a Condillac, Lavoisier scrisse nel suo *Traité de Chimie*: [15]

«Tre sono le cose da prendere in considerazione nella scienza fisica. La serie dei fatti che costituisce la scienza; le idee che richiamano i fatti; le parole che li esprimono. La parola deve fare nascere l'idea; l'idea deve dipingere il fatto; sono tre impronte dello stesso timbro. ... la perfezione della nomenclatura in chimica consiste nel rendere le idee e i fatti nella loro esatta verità».

Sono qui presenti i tre elementi della semiotica di Peirce: il fatto è l'*oggetto*; l'idea è l'*interpretante*; la parola è il *representamen* (simbolo). Lavoisier riteneva compito essenziale dello scienziato inventare vocaboli che aderiscono alle sostanze: per esempio, l'acido solforoso e l'acido solforico per designare due sostanze differenti costituite dagli stessi elementi. Egli non riteneva il segno iconico un componente essenziale della scienza chimica, e lo usò raramente. Per esempio, per illustrare l'interazione tra ferro e acido nitroso, in un primo tempo egli usò, per rappresentare la soluzione acquosa di acido nitroso (oggetto), il segno iconico $(\nabla \ominus +)$.

In seguito, per essere coerente con la sua concezione di composizione degli acidi, egli lo modificò integrandovi il segno \oplus del principio "ossigeno", dando così una nuova dimensione all'oggetto $(\nabla \oplus \Delta +)$.

Si può qui constatare che a un solo segno linguistico – acido nitroso – corrispondono due segni iconici che forniscono differenti informazioni. Come sostiene Peirce: «Dato un segno generale d'un oggetto, per ricavare una verità diversa da quella che esso manifesta esplicitamente, è necessario, in tutti i casi, sostituire questo segno con un'icona». Il segno iconico ha un valore euristico superiore a quello degli altri segni, in particolare di quelli linguistici, anche se questi gli devono essere associati. Ciò è dovuto al fatto che l'icona stabilisce una relazione di somiglianza tra il segno e l'oggetto: «L'icona serve come segno solamente e semplicemente esibendo la qualità che essa serve a significare».

In base alla concezione di Lavoisier della struttura della materia, si può dire che questi segni iconici non rappresentano una particella a livello microscopico. Infatti egli riteneva che la particella minima della materia coincidesse con il termine ultimo dell'analisi chimica, vale a dire una sostanza semplice e quindi un corpo macroscopico.

Gli allievi di Lavoisier

Nello stesso momento in cui Lavoisier proponeva il suo sistema di nomenclatura chimica², i suoi allievi Hassenfratz e Adet si resero conto che i segni linguistici da soli non sono sufficienti per dare un'idea delle sostanze che designano e si impegnarono a cercare:

2. Il frontespizio del *Metodo di nomenclatura chimica* reca la dizione: *Allegato un nuovo sistema di caratteri chimici consoni a questa nomenclatura.*

«...in quale modo devono essere fatti i caratteri chimici per poter sopperire a tutti i bisogni della scienza nello stato in cui essa si trova oggi». Un esempio che mostra tutta la portata della semiotica di Peirce e più particolarmente del segno iconico in quanto membro “attore” del trittico OSI, motore di ricerca e d’invenzione.

È vero che i segni iconici erano già stati usati dagli alchimisti, ma l’obiettivo dei due studiosi era ben diverso: [16]

«Servendoci dei caratteri in chimica, non dobbiamo proporci lo stesso scopo dei nostri predecessori. Questi cercavano in tutti i modi di celare le loro conoscenze ai non iniziati; al contrario noi dobbiamo fare tutti i nostri sforzi per diffonderle [...] Essi devono avere la stessa funzione dei caratteri dell’algebra che, designando le operazioni della mente necessarie in questa scienza, forniscono ai geometri di tutti i paesi i mezzi di intendersi. Questa considerazione è sufficiente per mostrare come sia necessario in chimica disporre di caratteri che siano comuni a tutti i chimici».

A questo fine essi inventarono nuovi caratteri (Figura 2) da usare in chimica, in modo che «determinati questi segni, non si tratti più che di variarli, in modo che applicati a ogni specie essi possano facilmente distinguerla dalle altre».

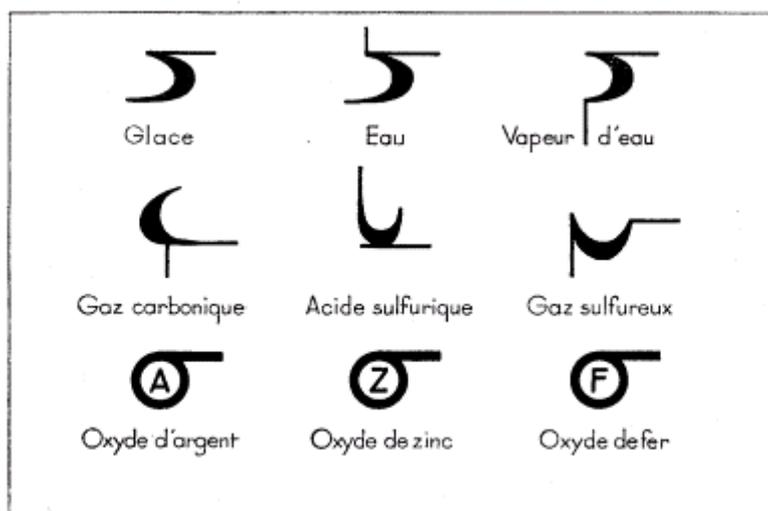


Figura 2 – Simboli proposti da Hassenfratz e Adet

I due studiosi erano ben consci dei problemi che dovevano fronteggiare i chimici per mettere a punto strumenti di comunicazione che permettessero di rendere comprensibili le conoscenze che essi stavano costruendo: «Dato il numero di sostanze semplici conosciute, e inoltre i rapporti principali che esse hanno tra di loro, quale tipo di caratteri dare loro, affinché combinati gli uni con gli altri, essi possano formare dei caratteri composti che indicano il numero e la natura delle sostanze semplici che entrano in un misto?».

La problematica di Hassenfratz e Adet incarna la semiotica di Peirce: le sostanze semplici e composte sono l’*oggetto*; i caratteri usati per rappresentare le sostanze semplici e quelle composte sono il *segno iconico*; la teoria dell’elemento di Lavoisier è l’*interpretante*. In seguito essi affrontarono un altro problema: «Quale deve essere la successione dei caratteri semplici che formano il carattere composto, di modo che i chimici possano, dall’analisi del carattere d’un misto, determinare il rapporto di quantità delle sostanze semplici che lo costituiscono?», proponendo il sistema di segni iconici della Figura 3. [16] Lavoisier, Berthollet e Fourcroy giudicarono il sistema di segni proposto da Hassenfratz e Adet «molto ingegnoso». Essi affermarono che non era loro intenzione valutare l’utilità di tali simboli in chimica, ma riconobbero che erano preferibili a quelli usati in precedenza. Questa considerazione viene interpretata da alcuni storici [17] come una riserva implicita sul loro valore pratico, come se l’invenzione dei simboli non fosse altro che un’esercitazione puramente accademica.

Nell’impostare le nostre ricerche con gli allievi ci siamo largamente ispirati alla problematica di Hassenfratz e Adet anche se i loro segni iconici non rappresentano particelle a livello microscopico, ma il termine ultimo dell’analisi chimica e quindi appartengono al registro macroscopico. Ciò non toglie che si tratti di un esempio molto chiaro della relazione triadica di cui l’icona è un pilastro.

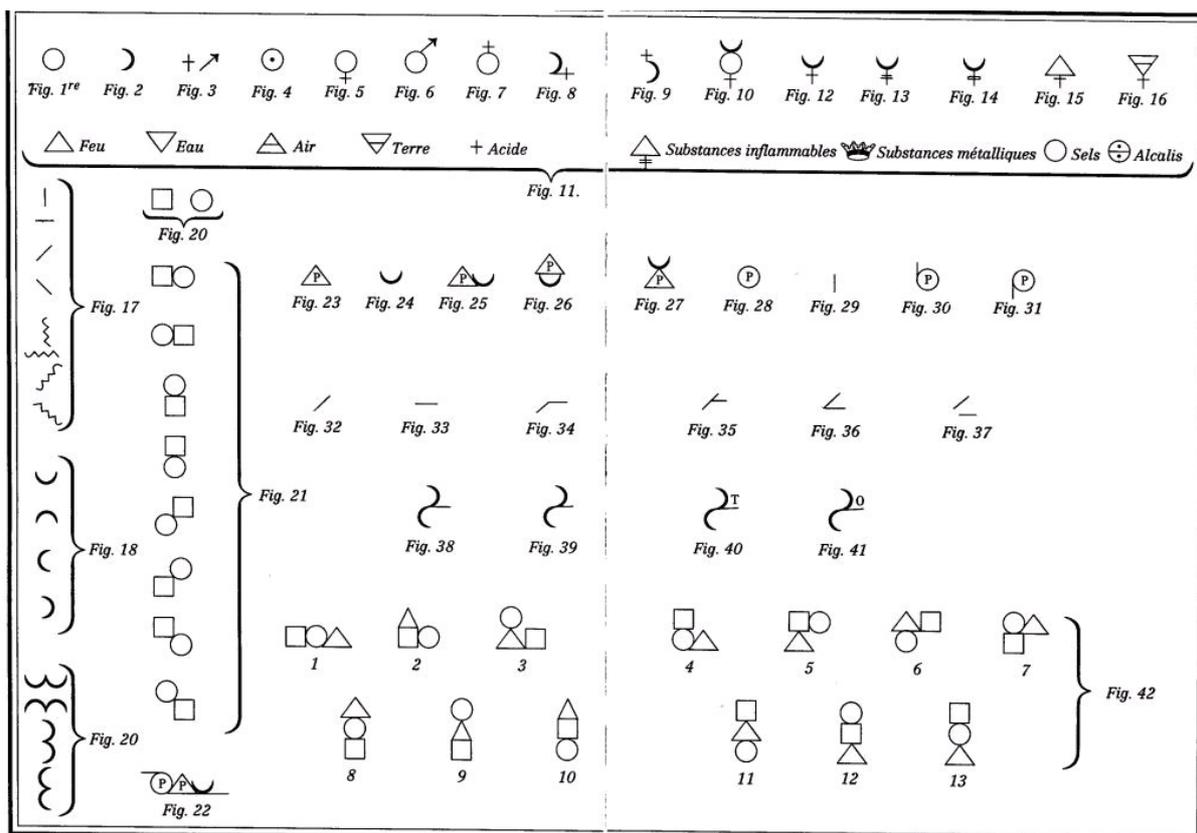


Figura 3 – Sistemi di segni iconici proposti da Hassenfratz et Adet per la combinazione chimica

4-2 – DALTON E GAY-LUSSAC

Dalton propose una spiegazione del visibile complicato mediante l'invisibile semplice. Egli elaborò un *New system of chemical philosophy*, un'ipotesi atomica a livello microscopico che prende le mosse dalla concezione filosofica della struttura discontinua della materia accoppiata con l'idea di elemento (sostanza semplice) elaborata da Lavoisier. Le idee di Dalton possono essere così riassunte:

- La materia è costituita da particelle estremamente piccole, indivisibili, indeformabili e indistruttibili, che egli chiama **atomi**.
- Ogni singolo elemento (sostanza semplice) è costituito da «atomi semplici» perfettamente uguali tra loro sotto tutti gli aspetti, compreso il peso – **peso atomico** (l'attuale massa atomica) – ma differenti dagli atomi di ogni altro elemento.
- Gli «atomi composti» delle sostanze composte sono formati dall'unione di due o più atomi semplici.

Egli espose chiaramente gli scopi che si proponeva: [18]

«A ragione, in tutte le ricerche chimiche si è considerato compito importante la determinazione del peso relativo delle sostanze semplici che costituiscono un composto. Purtroppo le ricerche si sono fermate a questo punto: infatti, dai pesi proporzionali nella massa si sarebbero potuti dedurre i pesi relativi delle ultime particelle o atomi dei corpi, da cui si sarebbe dedotto il loro numero o peso in altri composti. Ora uno degli scopi principali di quest'opera è mostrare l'importanza e il vantaggio della determinazione dei pesi relativi delle ultime particelle sia delle sostanze semplici sia di quelle composte, il numero delle particelle elementari semplici che formano una particella composta, e il numero di particelle meno complesse che entrano nella formazione di una particella più complessa».

Per rappresentare gli atomi composti, egli postulò una serie di regole arbitrarie, basate sul principio della massima semplicità:

- Se esiste una sola combinazione tra due corpi, si può supporre che sia binaria, a meno di indicazioni contrarie.
- Se esistono due combinazioni, si può pensare che siano l'una binaria e l'altra ternaria.
- Se esistono tre combinazioni, si può prevedere che siano una binaria e le altre due ternarie.
- Se esistono quattro combinazioni, si può prevedere che siano una binaria, due ternarie e una quaternaria, ecc.

Dalton propose anche i segni iconici per rappresentare gli atomi semplici e composti riportati in figura 4. Nella tabella 1 sono riportati i nomi di queste sostanze e i pesi relativi dei loro «atomi».

Ogni segno riportato in figura 4 veicola due significati: la qualità (natura) e la quantità (numero) delle particelle (atomi) che costituiscono la sostanza. Nella concezione di Dalton (il suo Interpretante) si trova l'idea che, nelle reazioni chimiche, gli atomi (semplici o composti) non subiscono nessuna alterazione, essendo indivisibili e indeformabili. Di conseguenza, gli atomi composti sono rappresentati accostando gli atomi semplici degli elementi costituenti; analogamente, l'atomo di zucchero (n. 37) risulta costituito da un atomo di acido carbonico (n. 28) e da un atomo di alcol (n. 33).

	Fig.		Fig.	
1	Hydrog. its rel. weight	1	11 Strontites	46
2	Azote	5	12 Barytes	68
3	Carbone or charcoal,	5	13 Iron	68
4	Oxygen	7	14 Zinc	56
5	Phosphorus	9	15 Copper	56
6	Sulphur	13	16 Lead	95
7	Magnesia	20	17 Silver	100
8	Line	23	18 Platina	100
9	Soda	28	19 Gold	140
10	Potash	42	20 Mercury	167
21.	An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight			8
22.	An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen			6
23.	An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen			12
24.	An atom of olefiant gas, composed of 1 of carbone and 1 of hydrogen			6
25.	An atom of carbonic oxide composed of 1 of carbone and 1 of oxygen			12
26.	An atom of nitrous oxide, 2 azote + 1 oxygen			17
27.	An atom of nitric acid, 1 azote + 2 oxygen			19
28.	An atom of carbonic acid, 1 carbone + 2 oxygen			19
29.	An atom of carburetted hydrogen, 1 carbone + 2 hydrogen			7
30.	An atom of oxynitric acid, 1 azote + 3 oxygen			26
31.	An atom of sulphuric acid, 1 sulphur + 3 oxygen			34
32.	An atom of sulphuretted hydrogen, 1 sulphur + 3 hydrogen			16
33.	An atom of alcohol, 3 carbone + 1 hydrogen			16
34.	An atom of nitrous acid, 1 nitric acid + 1 nitrous gas			31
35.	An atom of acetous acid, 2 carbone + 2 water			26
36.	An atom of nitrate of ammonia, 1 nitric acid + 1 ammonia + 1 water			33
37.	An atom of sugar, 1 alcohol + 1 carbonic acid			35

Tabella 1 - Nomi delle sostanze e pesi relativi degli «atomi» riportati in figura 4

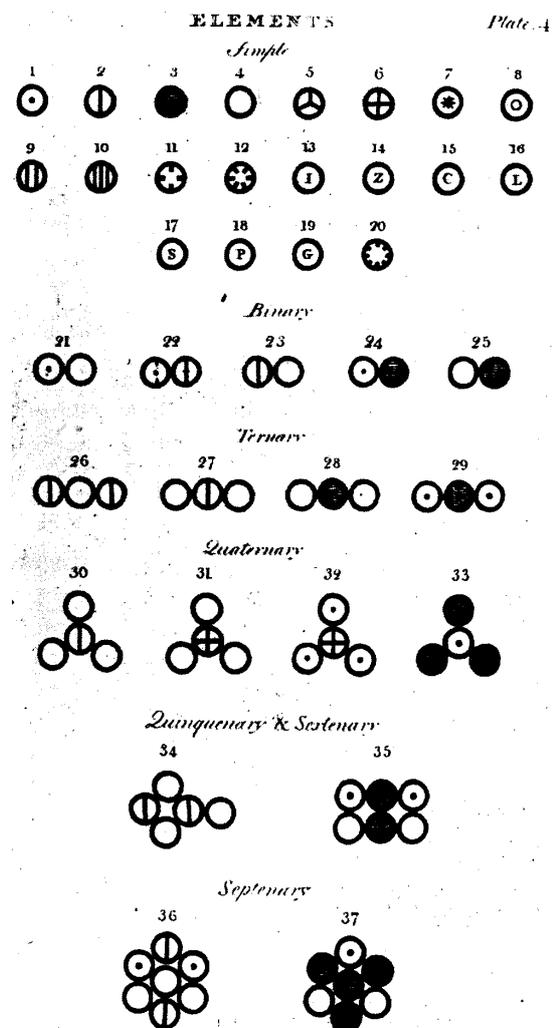


Figura 4 – I segni iconici proposti da Dalton

Dalton applicò le proprie concezioni ai dati sperimentali sulla composizione percentuale delle sostanze composte per calcolare i pesi atomici degli elementi. Però le sue idee furono messe in discussione dai dati volumetrici di Gay-Lussac (1809). Introducendo l'idea dell'atomo indivisibile, Dalton generò un ostacolo epistemologico che richiese circa mezzo secolo per essere superato; questo ostacolo è dovuto al fatto che il segno usato per rappresentare l'oggetto mancava di riferimento all'oggetto ovvero, come dice Peirce, non vi erano dati sperimentali che opponessero resistenza all'idea: tali dati vennero prodotti con gli esperimenti condotti da Gay-Lussac sulle combinazioni fra sostanze gassose.

Prima di tutto Gay-Lussac mise in evidenza che i gas, quando reagiscono fra di loro, si combinano sempre in proporzioni fisse e definite. Inoltre, mostrò che i volumi di gas diversi che prendono parte ad una reazione stanno tra loro in rapporti semplici, esprimibili con numeri interi piccoli; la stessa cosa vale per i volumi dei prodotti, quando questi sono gassosi. Ad esempio, per formare 2 volumi di vapore acqueo sono necessari 2 volumi di idrogeno e 1 di ossigeno; analogamente, per formare 2 volumi di ammoniaca sono necessari 1 volume di azoto e 3 di idrogeno.

L'approccio storico-epistemologico all'insegnamento delle scienze

La legge dei volumi venne formulata da Gay-Lussac in questi termini: «Le combinazioni delle sostanze gassose, le une con le altre, avvengono sempre nei rapporti più semplici, di modo che, indicando uno dei termini mediante l'unità, l'altro è 1, o 2 o tutt'al più 3». A questo proposito, egli scrisse: «Questi rapporti tra i volumi non si osservano affatto nel caso delle sostanze liquide o solide oppure quando si considerano i pesi, e sono una nuova prova che solo allo stato gassoso i corpi si trovano nelle stesse condizioni e presentano leggi regolari».

Tradotta nel linguaggio di Dalton, la teoria dei volumi applicata alla combinazione tra azoto e ossigeno dice che un atomo di ossigeno (O) si combina con un atomo di azoto (Ⓐ) per dare un atomo di gas nitroso (OⒶ), mentre i dati sperimentali di Gay-Lussac mostravano che combinando un volume di gas ossigeno e un volume di gas azoto si ottengono due volumi di gas nitroso (ossido d'azoto). Dalton non accettò mai i dati sperimentali di Gay-Lussac perché avrebbe dovuto ammettere la divisibilità degli atomi e quindi mettere in discussione il proprio modello.

Questo esempio è un «segno» per la didattica: esso insegna che un'ipotesi mediante la quale si può interpretare una determinata situazione sperimentale non può essere ritenuta generale e quindi assumere lo statuto di modello. Parimenti, non è perché un sistema di segni soddisfa il tritico OSI che lo si può ritenere sempre valido. La relazione ternaria del tritico è concepita per interrogare le relazioni binarie, prendendo come testimone il terzo componente e facendo ricorso al ragionamento abduttivo.

4-3 – AVOGADRO

Avogadro era convinto che «... vi sono anche dei rapporti semplici fra i volumi delle sostanze gassose e il numero delle molecole semplici o composte che le formano» e sosteneva che per rendere ragione della legge dei volumi, si doveva avanzare l'ipotesi che volumi eguali di gas diversi, alle stesse condizioni di temperatura e di pressione, contengono lo stesso numero di "molecole integranti": «La prima ipotesi che si affaccia a questo riguardo, e che pare essere la sola ammissibile, è di supporre che il numero delle *molecole integranti* in qualunque gas è sempre lo stesso a volume uguale o sempre proporzionale ai volumi». [19] In altre parole, Avogadro ricorre a un ragionamento abduttivo per generare un'ipotesi: una relazione semplice e regolare tra i volumi di gas delle sostanze reagenti e dei prodotti (l'effetto che suggerisce che qualcosa potrebbe essere) può essere spiegata soltanto ammettendo che volumi uguali di gas diversi contengono lo stesso numero di particelle (questa sarebbe la causa probabile).

Inoltre, dato che le concezioni di Dalton non erano in grado di accordarsi con i fatti presentati da Gay-Lussac, egli introduce un'ipotesi che, se valesse, renderebbe tali fatti del tutto plausibili: le molecole dei gas sono complesse e, al momento della combinazione, si suddividono per produrre i volumi finali che si ottengono sperimentalmente. Come egli scrive: «[si può supporre che] le molecole costituenti d'un qualsiasi gas semplice non siano formate da una sola molecola elementare, ma risultino da un certo numero di queste molecole riunite in una sola per attrazione, chiamata *molecola integrante* che egli così definisce: «Io intendo per molecole integranti delle molecole che, anche per i corpi semplici, possono ancora essere composte da altrettante molecole parziali, ma molto più ravvicinate di quanto le molecole totali non lo siano tra loro allo stato gassoso e riunite da una attrazione che non può avere luogo fra queste ultime».

Con un ragionamento abduttivo, Avogadro propose un nuovo mondo possibile, immaginario che però non veniva dal nulla. Secondo la semiotica di Peirce, Avogadro propose come Interpretante un'idea suggerita dal sistema iconico di Dalton in relazione con le esperienze di Gay-Lussac. In queste ultime, i volumi costituiscono un *indice*, nel senso che si tratta di un segno che attira l'attenzione. Però, in assenza di un sistema interpretativo, questo indice non avrebbe detto niente. Un indice o, più in generale, un segno entra in una relazione semiotica solo grazie a un'esperienza collaterale dell'oggetto, ossia una certa familiarità preesistente con ciò che il segno denota e che contribuisce così a rendere intelligibile.

La seconda ipotesi di Avogadro produce due nuovi concetti, ossia due nuovi segni: molecola integrante, molecola elementare. In questo modo, sembra che sparisca il vocabolo atomo e l'idea di particella indivisibile: la confusione atomo/molecola viene evitata, ma non eliminata. Il sistema proposto da Avogadro è portatore di nuove relazioni e quindi di nuovi significati: infatti permette di mettere in relazione il registro macroscopico del volume dei gas (Gay-Lussac) con il registro microscopico delle molecole che lo costituiscono e del loro numero.

4-4 – GAUDIN E CANNIZZARO

Nel 1833, Marc Antoine Gaudin propose una sistematizzazione dei concetti, distinguendo la nozione di atomo da quella di molecola: «Stabiliamo dunque una distinzione ben netta tra le parole atomo e molecola [...] Un atomo sarà per noi un piccolo corpo sferoide omogeneo, o punto materiale essenzialmente indivisibile, mentre una molecola sarà un gruppo isolato di atomi, in qualsiasi numero e di qualsiasi natura». [20] Conformemente a questa definizione, Gaudin continua a utilizzare i segni iconici proposti da Dalton, anche se Berzelius (1819) ha già proposto la notazione dei simboli degli atomi oggi in uso. Infatti, utilizzando questi segni egli ha proposto, a livello microscopico, le rappresentazioni riportate in figura 5 [21].

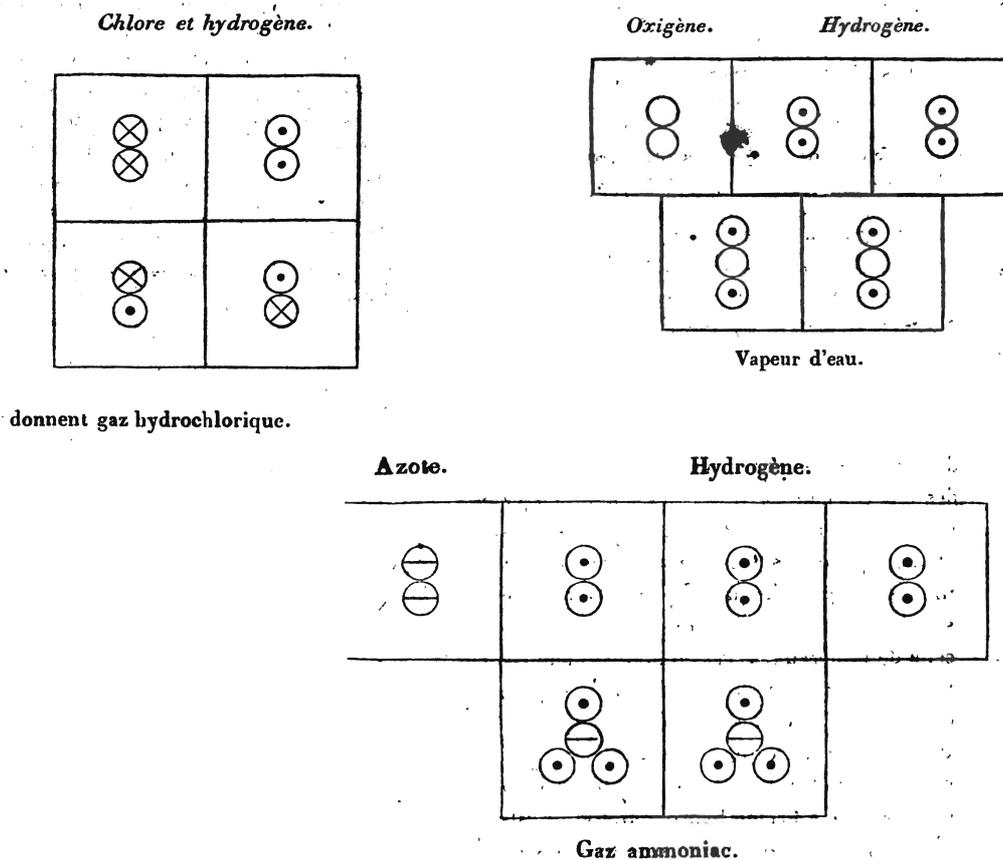


Figura 5 – Rappresentazioni iconiche proposte da Gaudin

Nonostante l'operatività e la plausibilità delle proposte di Gaudin, esse ebbero ben poco seguito presso i chimici dell'epoca, molti dei quali rifiutavano di accettare l'idea che l'atomo fosse un ente reale. Berthollet definì «molto ingegnosa» l'ipotesi di Dalton ma rifiutò di accettarla, come fece Lord Kelvin che ritenne questa «mostruosa ipotesi di Lucrezio, che pretende di spiegare tutte le proprietà della materia attribuendole all'atomo», una conseguenza della «superficialità dei chimici». Per parte sua, nel 1836 il chimico francese Jean-Baptiste Dumas affermava: [22]

«Se ne avessi l'autorità, cancellerei la parola atomo dalla scienza, essendo convinto che va oltre l'esperienza; in chimica non si deve mai andare oltre l'esperienza»

Nel 1858, Cannizzaro fu in grado di sistematizzare il sapere chimico sulla base dei seguenti principi:

1. Volumi eguali di gas diversi, nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione, contengono lo stesso numero di molecole.
2. La distinzione tra molecole e atomi – Le molecole sono costituite da atomi e l'atomo è definito come la più piccola parte di una sostanza semplice che può prendere parte a una reazione chimica.
3. Le molecole delle sostanze semplici contengono un numero di atomi che varia a seconda della sostanza stessa: ve ne sono di monoatomiche, biatomiche, triatomiche, tetraatomiche e così via.

In seguito, Mendeleev stabilì nuove relazioni triadiche OSI nelle quali il macroscopico e il microscopico si spiegano a vicenda, dando così senso ai concetti di sostanza semplice, molecola, atomo ed elemento, distinguendoli l'uno dall'altro: [23]

«La denominazione di sostanze semplici deve essere riservata a quelle contenenti soltanto un elemento qualunque, mentre composte devono essere chiamate quelle che ne contengono due o più [...] Le sostanze semplici, come tutti i corpi in natura, sono formate di particelle: tutta la loro differenza rispetto alle sostanze composte consiste unicamente nel fatto che le particelle di queste ultime contengono atomi eterogenei di due o più elementi, mentre quelle delle sostanze semplici soltanto atomi omogenei di un dato elemento [...] L'idea principale, con la quale si può giungere a spiegare la legge della periodicità, consiste proprio nella differenza radicale dei concetti di elemento e di sostanza semplice. [...] Gli elementi non vanno soggetti a varietà e trasformazioni reciproche e appaiono, stando almeno alle attuali risultanze, l'essenza immutabile di una sostanza che invece muta (sotto il profilo chimico, fisico e meccanico), essenza che entra a far parte sia dei corpi semplici sia di quelli composti. Questa concezione ci presenta gli elementi chimici come qualcosa di astratto, dato che non siamo in grado in particolare né di vederli, né di sapere alcunché relativamente ad essi».

5 – CONSIDERAZIONI FINALI

La prima metà del XIX secolo è ricca di insegnamenti dal punto di vista didattico, poiché essa corrisponde al contenuto d'insegnamento della chimica di base. L'evoluzione del sapere chimico in questo periodo illumina il percorso che dovrebbero percorrere gli allievi della scuola secondaria di secondo grado per pervenire a padroneggiare i concetti che entrano in gioco.

A PROPOSITO DELL'OSTACOLO EPISTEMOLOGICO

Dalton rigettò la validità sperimentale dei dati di Gay-Lussac, ritenendoli frutto di errate sperimentazioni: «In verità io credo che i gas non si combinino sempre in proporzioni uguali o esatte; quando sembrano comportarsi in tale modo, ciò è dovuto alla scarsa accuratezza dei nostri esperimenti». Gay-Lussac, da parte sua, era portato a diffidare dell'ipotesi atomica di Dalton perché questa era priva di evidenze sperimentali affidabili e quindi non cercò mai di usarla per interpretare i propri dati.

Dalton non ammetteva la relazione di proporzionalità tra volume di gas e numero di particelle, perché la sua concezione del calorico gli impediva di pensare che il numero di particelle in un determinato volume di gas potesse essere indipendente dalla natura del gas. [24] Inoltre, gli risultava difficile ammettere il vocabolario proposto da Avogadro – molecola elementare, molecola integrante – e le sue conseguenze: ciò avrebbe comportato ammettere che una sostanza semplice potesse essere formata da molecole (H_2 , O_2 , N_2 , ecc.) anch'esse divisibili in due o più parti. Però Dalton [25] concepiva la reazione chimica come semplice addizione di atomi e non come divisione delle molecole in parti e ricombinazione delle parti in modo diverso: «Supporre delle molecole composte da due molecole elementari, o atomi, sembrava scandaloso. I chimici potevano tranquillamente pensare gli edifici molecolari formati per unione attrattiva o affinità di due atomi differenti. Ma l'unione di due atomi simili in una molecola sembrava impossibile, inconcepibile...» I chimici si trovavano di fronte alla stessa realtà empirica ma questa poteva essere modellizzata in due modi diversi che a prima vista sembravano inconciliabili a causa degli ostacoli epistemologici cui essi dovevano fare fronte.

STATUTO RELATIVO DELL'ESPERIMENTO E DEL MODELLO

Analizzando le pubblicazioni di Dalton, Delacre [18] fa notare che da esse risulta che i fatti sperimentali avrebbero preceduto le considerazioni teoriche: l'ipotesi atomica sarebbe stata ricavata induttivamente dai rapporti in peso constatati nei carburi d'idrogeno e negli ossidi d'azoto. Al contrario, dagli appunti quotidiani di Dalton risulta che l'idea della struttura atomica delle sostanze e dei segni per rappresentarle era precedente ai dati sperimentali; egli invertì l'ordine delle cose, dando deliberatamente il primato all'esperimento. La mentalità empirista e positivista dell'epoca riteneva questa "idea" come una rappresentazione matematica, un'invenzione, uno strumento per pensare, senza alcuna relazione con i fatti; l'inversione risultava invece "in linea" con quello che era allora ritenuto il percorso scientifico d'elaborazione delle conoscenze. Delacre conclude che l'ipotesi atomica e i segni riportati in figura 4 devono essere considerati un'invenzione di Dalton e non il frutto di un ragionamento induttivo a partire da dati sperimentali.

Questi segni hanno ormai un significato del tutto nuovo nella scienza; essi differiscono radicalmente da quelli dell'alchimia che avevano soltanto il valore di una parola. Secondo la semiotica epistemologica di Peirce, i segni cabalistici dell'alchimia mancavano di un interpretante, un altro segno capace di dare loro una "terza dimensione"; questo avrebbe conferito all'insieme un carattere scientifico, permettendo una dinamica delle relazioni semiotiche e dunque l'evoluzione delle conoscenze.

I segni di Dalton non hanno solo il valore delle parole; essi «rappresentano un peso» e comportano anche un terzo significato: la composizione e dunque la "formula" delle sostanze semplici e composte, «sulle quali è provato che egli non ha mai condotto esperimenti». Il celebre principio attribuito a Lavoisier – nulla va perso, nulla viene creato... – assume un nuovo significato nella semiotica di Dalton il quale affermava: «Gli agenti chimici non hanno il potere né di creare né di distruggere la materia. Introdurre un nuovo pianeta nel sistema solare, o distruggerne uno già esistente, non sarebbe più difficile che creare o distruggere una particella d'idrogeno. Gli unici cambiamenti che siamo in grado di produrre sono o separare le particelle quando si trovano nello stato di combinazione o di coesione, oppure congiungere quelle che erano separate le une dalle altre». [18]

La manipolazione di questi segni aveva per Dalton un valore euristico ed era così ricca di implicazioni teoriche che i fatti sperimentali non risultavano necessari. La sua ipotesi atomica, benché a lungo contrastata, si è imposta perché nutrita di solidità semiotica e di logica matematica. Il suo sistema di segni non è soltanto una finzione, una specie d'immagine comoda, senza relazione alcuna con la realtà, come non è neppure una semplice combinazione matematica.

DALL'IPOTESI ALLA TEORIA

L'ipotesi atomica di Dalton è passata allo statuto di teoria perché si è attivato il principio di contraddizione. Da questa ipotesi, in "contraddizione" con i dati sperimentali, sono nate le due ipotesi di Avogadro e quel che ne è seguito. Esse costituiscono, secondo Peirce, delle spiegazioni e quindi un nuovo sistema di segni che implica una concatenazione di tritici OSI. Se non avessero avuto a disposizione il sistema di Dalton, le ipotesi di Avogadro, anche se oggi esse sembrano di una portata straordinaria, forse non avrebbero avuto alcuna risonanza per i chimici, ossia non avrebbero

probabilmente determinato alcun Interpretante. Il trittico OSI permette di formalizzare queste interrelazioni fra segni, come mostra la figura 6

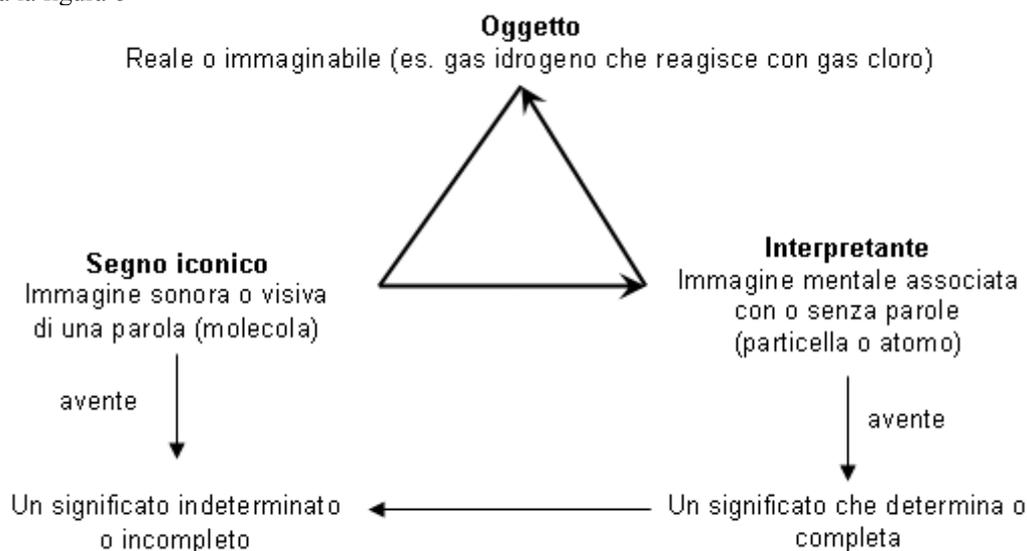


Figura 6 - Trittico OSI che riassume la semiotica di Peirce

Come risulta da questo schema, senza Interpretante (avente un determinato significato) non vi è segno iconico: molecola, costituita da atomi e in grado di spiegare le variazioni di volume. Il sistema dei segni iconici di Dalton, con le sue interpretazioni e implicazioni, ha costituito l'immagine concreta sulla quale si è innestato l'enunciato delle ipotesi di Avogadro nel corso di un processo lungo e costellato di conflitti di idee. Le spiegazioni di Avogadro hanno richiesto altri segni, altre spiegazioni che hanno portato a rivedere il sistema di Dalton. I due sistemi si compenetrano l'uno con l'altro, l'uno è l'interpretante dell'altro: «Il segno interpretante rinvia sintatticamente a un segno interpretante in una serie infinita d'interpretanti...». Così vengono generati nuovi interpretanti e l'insieme dei sistemi di segni diventa un sistema di segni più esteso. Quello di Dalton si è sviluppato per adattarsi ai risultati sperimentali e ad altre spiegazioni, quali le ipotesi di Avogadro, in modo da assumere lo statuto di modello, riferito a una parte limitata del reale: i sistemi chimici in fase gassosa. In seguito, il modello atomico di Dalton ha dovuto estendersi ulteriormente per adattarsi ad altri risultati sperimentali, per acquisire un carattere ancora più esteso, generale, capace di interpretare non solo i fenomeni chimici, ma anche una parte dei fenomeni fisici, acquisendo così gradualmente lo statuto di una teoria.

IMPLICAZIONI DIDATTICHE

Si sostiene oggi che la formazione dei giovani deve fare riferimento all'*approccio per competenze* basato sulla didattica laboratoriale: l'appropriazione del sapere scientifico da parte dell'allievo dipende essenzialmente dalla sua attività personale, dato che la competenza implica responsabilità e autonomia. È opportuno soffermarsi brevemente sulla nozione di "attività", sovente fonte di malintesi. Vergnaud et al. [26] ricordano che Piaget ha mostrato che l'attività di *manipolazione* di oggetti non gioca un ruolo decisivo nel processo di conoscenza; questo tipo d'attività, così come l'*osservazione*, non sono né una condizione necessaria, né una condizione sufficiente all'apprendimento, e questo d'altra parte è ormai largamente provato [27] per quanto attiene alla produzione del sapere scientifico. Larcher et al. [28] hanno potuto constatare, unitamente ad altri ricercatori, che non è possibile fare elaborare dagli allievi un modello particellare della materia a partire da attività sperimentali.

La tesi semiotica di Peirce porta a ritenere che il dato sperimentale giochi un ruolo importante a un livello più profondo, nella relazione dialettica tra un sistema di segni in continua costruzione-mutazione e l'oggetto che essi designano; quest'ultimo entra in queste relazioni, sia quando è concretamente presente, sia quando viene pensato. È il trittico OSI che funziona da motore del processo di significazione. Però si deve anche ricordare, come sottolinea Peirce, che la sola prova logica possibile di un'ipotesi arbitraria è la sperimentazione.

Questa analisi semiotica ed epistemologica consente di concepire il lavoro intellettuale degli allievi come un processo abducente di invenzione di ipotesi esplicative analogo a quello degli scienziati, naturalmente in un contesto ben diverso. Peirce afferma che «il segno non può fare conoscere né riconoscere l'oggetto» perché «la conoscenza è un presupposto per potere comunicare informazioni supplementari relative all'oggetto», il che richiama il trittico OSI. È ciò che succede al sistema di Dalton che viene proposto agli allievi come ipotesi: le conoscenze disponibili a livello empirico, per esempio i rapporti tra volumi nel caso di trasformazioni chimiche di gas, permettono agli allievi di costruire il modello di particella divisibile mediante il quale sono in grado di interpretare le trasformazioni chimiche.

L'approccio storico-epistemologico all'insegnamento delle scienze

Il quadro teorico adottato e l'analisi storica dell'evoluzione delle idee permettono di identificare gli ostacoli per anticiparli e soprattutto tenerne conto nella progettazione delle attività d'apprendimento. In assenza di tali riferimenti, c'è il pericolo che l'insegnamento generi ostacoli cognitivi insormontabili. Le sequenze che sono state progettate e sperimentate nel corso di alcuni anni e in scuole differenti permettono agli allievi di padroneggiare la struttura particellare della materia, di costruire la costituzione atomica delle molecole, di elaborare i primi rudimenti di calcolo stechiometrico, di comprendere la struttura dell'atomo e alcuni suoi modelli, sempre in riferimento ai problemi scientifici affrontati nel corso del tempo da chimici e fisici, ma adattati al contesto attuale degli allievi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fochi G., *Il segreto della chimica*, TEA, Milano, 2006
- [2] Lijnse, P., Didactics of science: the forgotten dimension of science education research. In R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving science education. The contribution of research*. Buckingham: Open University Press, 2000, pp. 308-326.
- [3] Hmelo-Silver C., Problem-Based Learning: What and How Do Students Learn? *Educational Psychology Review*, Vol. 16, No. 3, 2004, pp. 235-267
- [4] Matthews M., *Science Teaching: The role of history and philosophy in science*. Routledge, New York - London, 1994.
- [5] AA.VV. *Didactique et histoire des sciences*. Aster, n.5, I.N.R.P. Paris, 1987
- [6] Cannizzaro S., *La teoria atomica e molecolare* (a cura di Antonio Di Meo), Edizioni Teknos, Roma, 1994
- [7] Wandersee J., Griffard P., The History of Chemistry: Potential and Actual Contributions to Chemical Education. In J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-Based Practice*, Kluwer, Dordrecht, 2002, pp. 29-46.
- [8] Martinand J.L., Histoire et didactique de la physique et de la chimie: quelles relations?, *Didaskalia*, n.2, 1993, pp. 89-99
- [9] Peirce C., *Scritti scelti*, UTET, Torino, 2005
- [10] Buty C., Peterfalvi B., Représentations graphiques dans l'enseignement scientifique et technologique, Aster, n. 48, I.N.R.P. Paris, 2009
- [11] Kozma R.; Elaine Chin E.; Russell J., Marx N. The Roles of Representations and Tools in the Chemistry Laboratory and Their Implications for Chemistry Learning. *Journal of the Learning Sciences*, Vol.9, n°2, 2000, p.105-143
- [12] Stanford Encyclopedia of Philosophy, <http://plato.stanford.edu/entries/peirce-semiotics>
- [13] Duval R., *Semiosis et pensée humaine*, Peter Lang, Berne, 1995
- [14] Geymonat, *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Vol. 3, Garzanti, Milano, 1971
- [15] Laugier A., Dumon A., D'Aristotele à Mendeleïev. Plus de 2000 ans de symbolisme pour représenter la matière et ses transformations. *L'Actualité Chimique*, n. 3, 2001, pp 38-50,
- [16] Hassenfratz J.H., Adet P.A., *Méthode de nomenclature chimique*, Paris, 1787
- [17] Crosland M., *Historical studies in the language of chemistry*, Heinemann, London, 1962
- [18] Delacré M., *Histoire de la chimie*, Gauthiers-Villars, Paris 1920
- [19] Di Meo A., *Storia della chimica in Italia*. Theoria, Roma, 1989
- [20] Padeloup M., Laugier A., Le concept de réaction chimique en gestation. Entre les affinités électives et l'attraction universelle. Aster, n.14, 1994, pp.165-182.
- [21] Gaudin A. M., *Annales de Chimie et de Physique*, Paris, 1833
- [22] Scheidecker-Chevallier M., Le débat sur les atomes au XIX^{ème} siècle. In *La pluridisciplinarité dans les enseignements scientifiques*, Poitiers, 2003
- [23] Mendeleev D.I., *Il sistema periodico degli elementi*, a cura di S. Tagliabue, Edizioni Teknos, Roma, 1994
- [24] Scheidecker-Chevallier M., L'hypothèse d'Avogadro et d'Ampère: la distinction atome/molecole et la théorie de la combinaison chimique. *Revue d'Histoire des Sciences*, 50, pp. 159-194, 1997
- [25] Bensaude-Vincent B., Stengers I., *Histoire de la chimie*, La Découverte, Paris, 1993
- [26] Vergnaud G., Halbwachs F., Rouchier A., Structure de la matière enseignée, histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève, *Révue Française de Pédagogie*, n. 45, pp. 7-15, 1978
- [27] Popper K., *Congetture e confutazioni*, Il Mulino, Bologna, 1972, p. 84
- [28] Larcher C., Chomat A., Méheut M., À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états, *Révue Française de Pédagogie*, n. 93, pp. 51-62, 1990