

## CAPITOLUL 6

### **AGENȚI ȘI MODELAREA-BAZATĂ-PE-AGENȚI**

*Agenții și sistemele multiagent reprezintă o nouă modalitate de analiză, modelare și implementare a sistemelor complexe. Viziunea bazată pe agenți oferă astăzi o gamă largă de instrumente, tehnici și paradigme cu un uriaș potențial de a îmbunătăți modul în care oamenii concep și utilizează tehnologia informațională. Agenții sunt și vor fi utilizați tot mai mult într-o mare varietate de aplicații, mergând de la sisteme de dimensiuni mici, cum ar fi filtrele personalizate pentru e-mail sau agenții pentru cumpărături (shopbot) și până la sisteme mari, deosebit de complexe, cum sunt organizațiile și sistemele economice virtuale. La o primă vedere, ar putea apărea că aceste tipuri de sisteme sunt extrem de diferite și că nu au nimic în comun unele cu altele. Dar, în toate aceste cazuri, poate fi utilizat conceptul de agent și metodele care derivă din acesta. Este remarcabil cât de mare este varietatea de aplicații ce poate fi caracterizată în termenii teoriei agenților și sistemelor multiagent.*

*Datorită gradului mare de interes și nivelului ridicat de activitate din acest domeniu, la început teoriile și metodele referitoare la agenți pot apărea haotice și incoerente. Ne propunem ca, în acest capitol, să introducem o mai mare coerență și ordine, fără a dezvolta prea mult acest domeniu multidisciplinar deosebit de vast.*

*Înainte de a trece la descrierea unor aplicații economice ale acestei teorii, să definim ce se înțelege prin termeni ca „agent”, „sistem bazat pe agenți” sau „sistem multiagent”. Există astăzi o literatură deosebit de bogată din acest domeniu, care conține o mulțime de definiții date acestor concepte cheie, fără să se manifeste, totuși, o încercare de unificare a diferitelor sensuri. Desigur că acest lucru nu constituie un obstacol în progresul rapid, atât teoretic cât și în ce privește aplicațiile practice ale domeniului, dar noile cunoștințe acumulate, noile paradigme introduse necesită, din timp în timp, reevaluarea termenilor cheie prin reluarea efortului de redefinire a conceptelor, astfel încât să putem înțelege mai bine implicațiile și interdependențele fiecărui termen în parte.*

Acest lucru îl vom face și noi în continuare, pornind de la o bibliografie cuprinzătoare. Mai întâi vom încerca să răspundem la întrebarea esențială: „Ce este un agent ?” Odată introdus conceptul de bază de agent, putem merge mai departe pentru a defini sistemul bazat pe agenți. Acesta, desigur, este un sistem în care elementul principal este cel de agent. În principiu, un sistem bazat pe agenți ar putea fi conceptualizat în termenii specifici agenților, dar implementat fără ca structurile sale să includă vreo referire la agenți. Este cazul multor aplicații practice actuale care, deși se subsumează teoriilor referitoare la agenți, nu menționează acest lucru în mod explicit. Desigur că o astfel de abordare este mai puțin productivă, astfel că ne vom aștepta ca sistemele proiectate ca sisteme bazate pe agenți să fie și implementate în continuare ținând cont de conceptul de agent.

În continuare, în acest capitol, vom introduce sistemele multiagent, formate din mai mulți agenți interconecțați. Sistemele multiagent reprezintă mijlocul ideal de a aborda probleme care au mai multe metode de rezolvare, mai multe modalități de structurare și/sau mai multe entități care le rezolvă (ca în cazul sistemelor distribuite). Astfel de sisteme au, deci, avantajul natural al rezolvării distribuite și concurente a problemelor dar, în același timp, au și avantajul suplimentar al reprezentării modalităților complexe de interacțiune. Tipurile principale de interacțiuni cum sunt cooperarea (lucrul împreună pentru atingerea unui scop comun), coordonarea (organizarea activității de rezolvare a problemelor astfel încât interacțiunile dăunătoare sunt eliminate iar cele favorabile sunt utilizate) și negocierea (ajungerea la un acord care este acceptabil pentru toate părțile implicate) reprezintă aspecte esențiale ale utilizării în practică a metodelor bazate pe agenți.

În ultima parte a acestui capitol vom introduce conceptul de sistem multiagent inteligent, concept care este fundamental în abordarea conducerii sistemelor și proceselor economice din perspectiva agenților și modelării-bazate-pe-agenți. Inteligența unor astfel de sisteme este legată mai mult de capacitatea lor comună de a învăța și a se adapta la cerințele mediului, deși nu este exclus ca, în curând, să vorbim despre agenți care au convingeri proprii sau despre agenți emoționali, deci care sunt capabili să exprime emoții și sentimente umane.

Vom introduce conceptul de inteligență colectivă pentru a descrie un sistem multiagent în care nu există o structură centralizată de comunicare sau control și care are capacitatea de a învăța și a se adapta continuu, în raport cu percepția sa asupra mediului, dar și a interdependențelor interne dintre agenți.

*Sistemele multiagent cu inteligență colectivă sunt considerate astăzi ca fiind tipul de sisteme care se va impune tot mai mult în aplicațiile practice ale viitorului. Biroul inteligent, casa inteligentă, întreprinderea inteligentă etc. tind să iasă din sfera proiectării și să devină, într-un viitor previzibil, realități obișnuite.*

## **5.1 Ce este un agent ?**

Conceptul de agent a devenit, în anii 90 ai secolului XX și în primii ani ai secolului XXI, un concept central în câteva dintre disciplinele științifice cu o dezvoltare de-a dreptul explozivă. Inteligența artificială (IA) și subdomeniul acesteia, inteligența artificială distribuită, științele complexității, cibernetica de ordinul trei, știința calculatoarelor, economia computațională ș.a. fac apel din ce în ce mai frecvent la conceptul de agent și la metodele derivate din acesta. Se vorbește deja despre o teorie a agenților și a sistemelor multiagent ca un domeniu relativ autonom al IA, deși există și alte discipline care revendică acest lucru.

Fără să existe încă o unitate de vederi în ceea ce privește definirea agenților, cercetările în această direcție avansează atât de rapid încât se poate spune că se conturează deja o concepție unitară și unificată asupra agenților, astfel încât ei să poată fi deja obiect de standardizare internațională.

În continuare, vom trece în revistă câteva definiții date agenților, vom introduce principalele proprietăți ale acestora și vom arăta impactul pe care utilizarea acestui concept îl are asupra diferitelor discipline științifice, tehnici și metodologii care sunt astăzi utilizate în diferite științe.

### **5.1.1 Definiții de bază**

Deși noțiunea de agent a devenit centrală în cele mai diferite domenii științifice, există diferențe mari între sensurile date acestui concept precum și diferitelor utilizări ale sale în aceste domenii.

În dicționare, agentul este definit ca „cineva care, sau prin care se exercită putere sau produce un efect”<sup>1)</sup>. Totuși, o astfel de definiție este prea generală pentru a putea fi considerată operațională; cel puțin ea indică faptul că agentul exercită o

---

<sup>1)</sup> The Concise Oxford Dictionary, of Current English, (7 th edition), Oxford University Press, 1988

acțiune, schimbă ceva în mediul înconjurător. Mai precis, Shardlow arată că „*Agenții fac lucruri, ei acționează: de aceea ei se numesc agenți*” (Shardlow, 1990).

Agenții au deci un rol activ, inițiind acțiuni prin care este afectat mediul lor mai degrabă, decât ca ei să fie afectați de acest mediu. Doi termeni pot fi utilizați pentru a descrie această acțiune a agenților: *autonomia* și *raționalitatea* așa cum afirmă Wooldridge și Jennings (1995). *Autonomia* presupune, în general, că un agent funcționează fără intervenția directă a omului sau a altor agenți. *Raționalitatea* presupune că agenții inițiază orice acțiune în scopul maximizării performanței lor în raport cu o funcție de evaluare.

Totuși, acțiunea rațională autonomă, așa cum este definită, reprezintă un criteriu prea general pentru agenți, ceea ce face ca în această categorie să se regăsească o clasă prea largă de obiecte. De exemplu, conform acestei definiții, și un tranzistor care, în esență, reprezintă un dispozitiv electronic simplu, poate fi considerat ca fiind agent.

Poate mai multă precizie în acest domeniu este introdusă de definiția dată de Jennings, Sycara și Wooldridge (1998) pentru care „*un agent este un sistem de calcul **situat** într-un anumit mediu, care este capabil de **acțiune autonomă flexibilă** pentru a realiza obiectivele sale proiectate*” (Jenings, Sykara, Woldridge, 1998, p.8).

Se observă că acum se folosesc trei concepte cheie pentru a defini un agent: poziționarea în raport cu mediul, autonomia și flexibilitatea. Poziționarea, în acest context, înseamnă că agentul primește inputuri de la mediul său și că el poate executa acțiuni care schimbă acest mediu într-un anumit fel. Astfel, Internetul reprezintă un mediu în care poate fi situat un astfel de agent dar, tot așa de bine, acest mediu poate fi și realitatea fizică. Poziționarea reprezintă o proprietate fundamentală a agenților, care-i deosebesc de alte sisteme, de exemplu de sistemele expert. Acestea din urmă nu interacționează direct cu mediul, primind informația și cunoștințele prin intermediul inginerului de cunoștințe, care este un om. În acest mod, sistemul expert nu acționează direct asupra mediului, ci prin intermediul factorului uman.

Autonomia este înțeleasă aici ca absența intervenției umane sau a altor agenți, deci un agent își poate controla complet propriile acțiuni și starea sa internă. Uneori autonomia este înțeleasă, într-un sens mai strict, ca și capacitatea pe care o are agentul de a învăța din propria sa experiență (de exemplu în (Russell, Norvig, 1995)).

Flexibilitatea presupune, în esență, că agentul este: *responsiv* (deci percepe mediul și răspunde la timp la schimbările ce apar în el); *proactiv* (adică acțiunile sale nu reprezintă simple reacții la mediu, ci este capabil să exercite un comportament orientat către un anumit scop și să inițieze acțiuni care îl apropie de aceste scopuri); și *social* (deci agentul este capabil să interacționeze cu alți agenți artificiali sau umani pentru a-și rezolva propriile probleme și a-i ajuta pe alții în activitățile lor).

J. Ferber (1995) detaliază și mai mult lucrurile, el spunând, în esență, că agenții sunt entități reale (fizice) sau virtuale care:

- Acționează într-un mediu specificat;
- Comunică cu alți agenți;
- Urmează un set de tendințe, reprezentând obiective sau optimizează o funcție;
- Dispun de resurse;
- Percep mediul înconjurător până la o anumită limită;
- Reprezintă intern mediul înconjurător (unii agenți doar reacționează);
- Oferă cunoaștere și servicii;
- Se autoreproduc (opțional);
- Satisfac obiective bine definite, ținând cont de resurse, cunoștințe, percepție, reprezentare și stimuli.

Desigur că o astfel de definiție este prea cuprinzătoare pentru a putea separa mai bine agenții de alte tipuri de sisteme. S-a observat astfel că, aplicând o astfel de definiție, putem încorpora în categoria agenților și mușuroaielor de furnici, roiurile de albine sau bancurile de pești.

Poate că acest lucru nu este însă departe de adevăr.

Recent, agenții au fost definiți extrem de sintetic, dar cuprinzător într-un raport pentru Agentlink, comunitatea europeană a oamenilor de știință din acest domeniu, de către Luck, M., ș.a. (2001) La întrebarea „Ce este un agent ?” se răspunde: „*Agenții pot fi definiți ca fiind entități computaționale rezolvitoare de probleme, autonome, capabile să execute operații în medii dinamice și deschise*” (Luck, Mcbumey, Preist, 2001, pag. 9). Dacă prima parte a acestei definiții este compatibilă cu celelalte definiții discutate mai sus, a doua parte a ei arată că interesul s-a deplasat de la sistemele de calcul individuale, staționare, privite mai mult ca instrumente capabile să-l ajute pe om în activitățile sale, către situația în care puterea

acestor sisteme de calcul este utilizată pentru a acționa în medii distribuite, impredictibile, deschise și dinamice. În astfel de medii, sisteme eterogene (oameni, mașini, ecosisteme ș.a.) trebuie să interacționeze, să depășească limitele organizaționale sau naturale și să funcționeze eficient, în condițiile unor situații-problemă care se modifică rapid și dramatic, pentru a-și realiza scopurile proprii sau anumite obiective comune.

Sintetizând conținutul diferitelor definiții date agenților în literatură, se poate spune că se întâlnesc astăzi două mari tipuri de astfel de definiții: definiții în sens larg și, respectiv, definiții în sens restrâns.

Noțiunea de **agent în sens larg** este utilizată pentru un sistem (entitate) computațional cu următoarele proprietăți:

- **autonomie:** agentul operează fără intervenția directă a oamenilor sau a altor sisteme și are un anumit tip de control asupra acțiunilor (activităților) proprii și stării interne;

- **reactivitate:** agentul percepe mediul înconjurător (care poate fi realitatea fizică, un utilizator prin intermediul unui interfețe grafice, o mulțime de alți agenți, Internet sau Intranet, o combinație a acestora ș.a.) și răspunde de o anumită manieră la schimbările continue și neanticipate care au loc în mediu;

- **proactivitate:** agentul nu reacționează doar ca răspuns la schimbările din mediul înconjurător; el este capabil să aibă comportamente orientate către atingerea unor scopuri, având în acest sens inițiativă proprie;

- **abilitate socială:** agentul interacționează cu alți agenți (și posibil oameni) utilizând un anumit limbaj de comunicare, care este înțeles de toți ceilalți agenți (sau oameni).

Uneori, conceptul de agent are un înțeles mai restrâns și mai specific. De exemplu, când noțiunea de agent se utilizează în IA, tehnologia software sau în procesele de control distribuit, acestuia i se asociază, pe lângă proprietățile generale introduse mai sus, și alte proprietăți care nu se regăsesc și la ceilalți agenți.

Astfel de atribute, caracteristice **agentului în sens restrâns**, pot fi următoarele:

- **mobilitatea:** agentul are abilitatea de a se deplasa într-o rețea (de exemplu pe WWW);

- **capabilitatea:** agentul nu comunică informații false;

- *bunăvoința*: agentul nu are scopuri conflictuale în raport cu alți agenți și execută întotdeauna ceea ce i se cere;

- *inteligența*: agentul acționează asemănător, în unele privințe, cu o ființă inteligentă.

În ceea ce privește ultima caracteristică, cea de inteligență, ea presupune înzestrarea unui agent cu calități cum ar fi: cunoașterea, convingerea, intenția, obligația, emotivitatea ș.a. Asupra agenților inteligenți vom reveni pe larg într-un paragraf ulterior.

### **5.1.2 Exemple simple de agenți în economie**

Desigur că oricâte definiții s-ar da și oricât ar fi acestea de complete, ele nu pot suplini prezentarea unor exemple concrete de agenți. Ne vom referi, în aceste exemple, atât la agenți umani cât și la agenți artificiali pentru a arăta faptul că teoria agenților și sistemelor multiagent poate fi extinsă nu numai la sisteme de calcul, ci la orice entitate care execută anumite activități ce implică efectuarea anumitor procese computaționale.

#### **a) Agenți în procesul de creditare**

Vom considera, mai întâi, o aplicație bancară în care mai mulți agenți sunt utilizați pentru a îndeplini anumite roluri în procesul de acordare a unui credit pentru o mică afacere. Avem un proces distribuit, fiecare participant la procesul de aprobare a creditului putând fi considerat un agent autonom. La acest proces participă o bancă, o sucursală a acestei bănci, un ofițer de credite și un client care solicită creditul. Participanții la acest proces pot fi geografic separați unii de alții, dar comunică între ei printr-o rețea (de exemplu prin e-mail sau Internet). Clientul, de regulă, se adresează unei sucursale a băncii care se află în zona sa de interes (acolo unde își dezvoltă afacerea); prin aceasta, procesul de aprobare a creditului este inițiat.

Clientul lucrează cu un ofițer de credite de la nivelul sucursalei. Acesta colectează informațiile financiare și non-financiare despre client și creează un dosar de creditare. Dosarul complet este transmis directorului sucursalei bancare pentru o aprobare preliminară, după care dosarul de creditare este trimis la centrala băncii

pentru analiză și decizie. Dacă creditul este aprobat de centrală, directorul sucursalei trimite înapoi ofițerului de credite dosarul de creditare pentru definitivarea acestuia. După încheierea contractului de creditare, clientul primește împrumutul și procesul se termină.

Toți participanții la acest proces de aprobare a creditului pot fi considerați agenți. Unii dintre ei aparțin de bancă (ofițerul de credite, directorul sucursalei, centrala băncii), alții însă nu (clientul). Între ei are loc un proces continuu de informare, comunicare și negociere. La nivelul centralei băncii are loc și un proces de supraveghere și evaluare a riscului acordării creditului.

Toate aceste procese se pot realiza cu ajutorul agenților. Un Agent de Documentare a Creditului (ADC) este capabil să culeagă și să analizeze documentele care sunt necesare în dosarul de creditare, atât la nivelul sucursalei cât și a centralei bancare. Mai departe, agenții de la nivelul centralei și sucursalei pot utiliza aceste informații pentru a lua decizii privind cererea de creditare.

Acest exemplu arată că mulți dintre pașii necesari în procesul de aprobare a unui credit pot fi făcuți automat utilizând o colecție de agenți. Fluxul de informații din interiorul băncii ca și cu clienții va fi redus la strictul necesar, reducând astfel costurile și crescând viteza de reacție a băncii la cererea de aprobare a unui credit.

### ***b) Agenți de tip asistent personal***

În aplicațiile din domeniul producției, educației, cercetării științifice, marketingului ș.a., este posibil să se utilizeze agenți pentru a executa diferite funcții ale unui *sistem desktop* (de căutare și afișare a rezultatelor). Astfel de agenți, numiți asistenți personali ajută pe oamenii implicați în activități decizionale sau de cercetare să elimine munca rutinieră de căutare și sistematizare a informației necesare adoptării diferitelor decizii. De exemplu, un asistent personal specializat în căutarea pe Internet poate reuni patru agenți diferiți, fiecare fiind orientat către realizarea unei sarcini specifice, necesară pentru a crea o aplicație inteligentă. Astfel, un *agent de interfață* va gestiona toate interacțiunile cu utilizatorul uman, un *agent de monitorizare* va urmări site-urile de interes de pe Internet și-l va informa pe utilizator (prin intermediul agentului de interfață) când apar noi informații pe unul dintre aceste site-uri. Un *agent de domeniu* va acumula cunoștințele din domeniul de interes pentru utilizator. Un *agent de căutare/evaluare* este specializat în localizarea și



evaluarea informației și cunoștințelor de pe Internet și în determinarea gradului în care acestea satisfac nevoile utilizatorului.

### **c) Agenți pentru cumpărături (shopbot)**

Acest exemplu arată cum agenți, proiectați pentru a fi experți în domeniile lor (interfață, ingineria cunoștințelor, căutare etc.) pot fi utilizați împreună pentru a realiza funcții complexe necesare într-un sistem de nivel superior, asistentul personal.

Agenții nu sunt utilizați, de regulă, individual, ci în sisteme incluzând mai mulți agenți diferiți care interacționează la acțiunile celorlalți agenți sau la cererile mediului. Acestea sunt numite sisteme bazate pe agenți și ne vom referi la ele mai târziu.

## **5.2. Tipologia (clasificarea) agenților**

Să introducem, în continuare, tipurile principale de agenți care pot să apară în astfel de aplicații bazate pe agenți. Tipologia agenților este, în prezent, destul de ramificată, utilizându-se criterii de clasificare diferite cum ar fi: proprietățile agenților, funcțiile realizate, numărul de agenți de diferite tipuri încorporați ș.a.

În raport cu **proprietățile** pe care le au agenții, distingem (Brodshaw, 1997):

- **agenți autonomi**: agenți proactivi, orientați către un scop și acționând conform acestuia, fără să fie necesară intervenția utilizatorului, confirmarea și acordul acestuia;

- **agenți adaptivi**: agenți care se adaptează dinamic și învață despre și din mediul lor înconjurător. Deci acești agenți se adaptează la incertitudine și schimbare;

- **agenți reactivi**: agenți care sunt activați de evenimente și senzitivi la conjunctura din domeniul realității înconjurătoare. Acești agenți sunt capabili să simtă și să acționeze;

- **agenți mobili**: agenți care se deplasează unde este nevoie, posibil urmând un itinerar. Deplasarea se poate face într-un spațiu real sau virtual;

- **agenți interactivi**: agenți care interacționează cu oamenii, alți agenți, sisteme legale și surse informaționale;

- **agenți cooperativi**: agenți care își coordonează acțiunile și negociază pentru a atinge obiective comune;

- *agenți sociali*: agenți care colaborează cu alți agenți și/sau oameni pentru a atinge scopuri comune;

- *agenți cu personalitate*: agenți având caracteristici de personalitate umane cum ar fi emoții, intenții, convingeri, răspunderi ș.a.;

- *agenți inteligenți*: agenți care încorporează caracteristici ce definesc inteligența umană cum sunt introspecția, învățarea, adaptarea, ș.a.

După **funcțiile realizate**, agenții se pot clasifica în:

- *agenți informaționali*: agenți care colectează informație din surse multiple eterogene și trimit informație către surse multiple;

- *agenți interfață utilizator*: agenți care comunică cu oamenii utilizând diferite tipuri de interfețe, inclusiv limbajul natural;

- *agenți reactivi* (actori): agenți care execută anumite operații în mod autonom și în timp real ca urmare a apariției anumitor evenimente sau mesaje în mediul înconjurător;

- *agenți mediator*: agenți care mijlocesc alocarea resurselor de orice fel între oameni și/sau alte categorii de agenți.

Clasificările referitoare la agenți sunt mult mai numeroase, dar considerăm că cele două clasificări introduse mai sus satisfac, deocamdată, cerințele construirii modelelor.

### **5.3 Sisteme bazate pe agenți**

Prin *sistem bazat pe agenți (SBA)* se înțelege un sistem de calcul în care elementul cheie îl reprezintă agentul. În principiu, un astfel de sistem poate fi proiectat în funcție de agenți, dar implementat fără ca structurile sale să corespundă într-un fel agenților. Acest lucru este similar software-ului orientat obiect, în care este posibil să se proiecteze un program în funcție de obiecte, dar acesta să fie realizat fără utilizarea unui mediu de programare orientat obiect.

Desigur că o astfel de abordare nu este cea mai de dorit, atât în cazul sistemelor bazate pe agenți cât și în cel al software-ului orientat obiect.

Un *SBA* este deci un sistem care poate conține unul sau mai mulți agenți. Pot exista sisteme care conțin un singur agent și sisteme cu mai mulți agenți. Există aplicații practice în care un singur agent este suficient. Astfel, sistemele asistent personal, în cadrul cărora agentul acționează ca un expert, ajutând un utilizator să

execute pe calculator anumite operații, reprezintă astfel de sisteme. Totuși, sistemele multiagent în care sistemul bazat pe agenți este proiectat și implementat ca un sistem care conține mai mulți agenți interactivi este considerat ca fiind mai general și mai interesant din punct de vedere practic, dar și mai greu de realizat.

Sistemele multiagent reprezintă sisteme bazate pe agenți care sunt apte să reprezinte probleme care au multiple metode de rezolvare a problemelor, perspective multiple și/sau entități rezolvitoare de probleme multiple. Deci ele au avantajele sistemelor distribuite și concurente de rezolvare a problemelor, dar mai au și avantajul suplimentar al modalităților sofisticate de interacțiune.

Tipurile principale de interacțiune ce pot fi găsite în sistemele multiagent includ: *cooperarea, coordonarea și negocierea*.

Mai întâi vom descrie sistemele bazate pe agenți care conțin un singur agent autonom, după care ne vom referi, în general, la sistemele multiagent.

### **5.3.1 Sisteme cu agenți autonomi**

Sistemele care încorporează un singur agent autonom se poate spune că reprezintă puntea de legătură între *sistemele expert* și *sistemele multiagent*. Desigur că sistemele bazate pe agenți nu au apărut pe un loc gol. Principala contribuție la dezvoltarea lor, după cum am mai spus, o are inteligența artificială. În esență, inteligența artificială își propune să realizeze sisteme artificiale inteligente care, dacă acționează într-un anumit mediu, pot fi considerate agenți. În ciuda faptului că agenții reprezintă astfel de sisteme artificiale, până la mijlocul anilor 80 ai secolului trecut aceștia au fost foarte puțin studiați în mod direct.

Cauza acestei rămăneri în urmă trebuie căutată în tendința care s-a manifestat în domeniul cercetărilor de a aborda în mod separat diferitele componente al comportamentului inteligent, cum ar fi învățarea, raționamentul, rezolvarea problemelor, recunoașterea formelor și a vorbirii etc. Deși s-au făcut progrese însemnate în fiecare din aceste domenii, sinteza lor pentru a crea un agent inteligent integrat nu s-a realizat. În acea perioadă, singurul domeniu în care se făceau progrese și care era strâns conectat cu sistemele bazate pe agenți era planificarea inteligentă: acesta încerca să răspundă la întrebarea ce trebuie făcut, deci ce acțiune trebuie întreprinsă, atunci când mediul înconjurător are o anumită stare. În esență, un sistem bazat pe agenți este exact un sistem care execută acțiuni într-un anumit

mediu, deci nu este surprinzător faptul că inteligența artificială în general și planificarea inteligentă în particular joacă un rol atât de important în studiul agenților.

Planificarea inteligentă, ca domeniu de cercetare din cadrul inteligenței artificiale, își are originile în programul GPS (General Problem Solver) al lui Newell și Simon și în sistemul de planificare STRIPS, apărut în 1971 și dezvoltat ulterior (vezi pentru o prezentare istorică a dezvoltării IA lucrarea lui Russell și Norvig (1995)).

De regulă, un program de planificare inteligentă cuprindea următoarele componente:

- *un model simbolic al mediului înconjurător*, reprezentat, de regulă, printr-un număr limitat de propoziții din logica predicatelor de ordinul întâi;

- *o specificare simbolică a acțiunilor disponibile*, reprezentate sub forma (condiție, acțiune);

- *un algoritm de planificare*, ce avea inputul format din reprezentarea mediului, specificații ale acțiunilor și o reprezentare a stării dorite și care producea ca output un plan, ce specifică acțiunile ce trebuiau întreprinse pentru a atinge scopul.

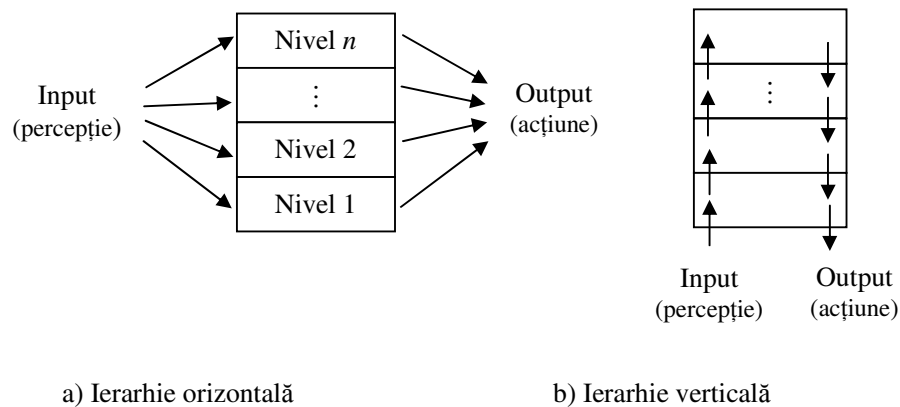
La baza sistemelor de planificare inteligentă stăteau însă principiile logice care, după cum a arătat D. Chapman (1992), *“conduceau la situații de indecidabilitate”* (Chapman, 1992, p. 23). De aceea, apariția agenților, care pot răspunde la schimbările din mediul lor înconjurător în timp real, reprezintă tocmai încercarea de a depăși impasul în care ajunseseră sistemele de planificare inteligentă.

A. Newell, într-o celebră lucrare apărută în 1990, a fost cel care a arătat necesitatea unificării cunoștințelor obținute în diferitele domenii ale inteligenței artificiale și *“elaborării unor sisteme care să țină seama de schimbarea continuă a mediului înconjurător”* (Newell, 1990). Acest lucru necesită schimbarea a însăși elementelor de bază ale raționamentului din cadrul sistemelor respective. Așa au apărut *sistemele bazate pe cunoaștere*, din care se poate spune, fără a greși prea mult, că fac parte și sistemele bazate pe agenți.

Depășirea etapei în care raționamentele din sistemele de inteligență artificială se bazau pe logica simbolică a dus la un progres rapid în anii 90 către așa numita *inteligență comportamentală*, în care, conform lui R. Brooks (1991), inteligența este produsul interacțiunii dintre un agent și mediul său. În plus, Brooks afirmă faptul că *“comportamentul inteligent emerge din interacțiunea dintre comportamente mai simple, dar diferite între ele”* (Brooks, 1991, p. 1419). Aceste comportamente interacționează între ele în moduri diferite. De exemplu, un comportament poate

decurge din outputul altui comportament. Aceste comportamente sunt organizate în ierarhii multinivel, în care la nivele de bază se află comportamente mai puțin abstracte (de exemplu, ocolirea unui obstacol în cazul agenților fizici de tip robot) și la nivele superioare se află comportamente din ce în ce mai abstracte.

La sfârșitul anilor 90 mulți cercetători au ajuns totuși la concluzia că astfel de arhitecturi pentru sistemele bazate pe agenți nu ar fi adecvate. Drept urmare, au fost propuse arhitecturi hibride, care să încorporeze atât proprietățile metodei de organizare bazată pe raționamentul logic, cât și ale celei bazate pe comportamentul reactiv la mediu. Astfel de arhitecturi erau organizate fie vertical (astfel încât doar un singur nivel să aibă acces la *senzorii* și *efectorii* agentului), fie orizontal (astfel ca toate nivelele să aibă acces la senzorii de intrare și la acțiunea de ieșire a agentului). În figura 5.1 sunt reprezentate aceste două tipuri de arhitecturi.



**Figura 5.1**

Se observă că nivelele sunt aranjate într-o ierarhie, fiecare nivel din ierarhie operând cu informații despre mediu la diferite nivele de abstractizare. Multe arhitecturi consideră ca fiind suficiente trei nivele. Astfel, la nivelul cel mai de jos din ierarhie se află un agent „reactiv”, care ia decizii privind acțiunile ce le va întreprinde doar pe baza inputului asigurat de senzori. Nivelul din mijloc acționează ca un agent al cunoașterii, generalizând comportamentele relevate de primul nivel și folosind reprezentări simbolice. Al treilea nivel al arhitecturii, cel superior, tinde să opereze cu aspecte sociale ale mediului și de aceea se numește agentul cunoașterii sociale sau meta-agent. Aici găsim reprezentări despre ceilalți agenți – scopurile acestora, convingerile, comportamente posibile ș.a.

Pentru a produce comportamentul global al agentului, aceste nivele interacționează între ele; modul specific de interacțiune depinde de arhitectură. În unele cazuri, fiecare nivel produce el însuși sugestii privind acțiunea pe care o va executa. În acest caz, medierea dintre aceste nivele astfel încât să se asigure un comportament general și consistent al agentului devine ea însăși o problemă. Deseori, medierea este realizată de un subsistem de control care determină care nivel ar trebui să aibă controlul general al agentului. Acest subsistem de control poate fi el însuși un agent, numit și agent mediator, ale cărui intrări sunt informații privind stările nivelelor controlate, iar ieșiri sunt acțiuni care asigură consistența și coerența de comportament a agentului.

O ultimă tendință în proiectarea arhitecturilor agenților este cea care pornește de la agenții care au raționamente practice. Aceștia sunt acei agenți a căror arhitectură este inspirată din modalitatea practică de gândire a oamenilor. Prin raționament practic se înțelege un mod pragmatic de a decide și acționa. Teoriile despre raționamentul practic fac, de regulă, referire la o psihologie a populației, în care comportamentul este înțeles ca un rezultat al atitudinilor, cum ar fi credințele, dorințele, intențiile ș.a.m.d. Comportamentul uman poate fi privit ca apărând din interacțiunile dintre aceste atitudini.

Arhitecturile raționamentului practic sunt modelate ținând cont de aceste interacțiuni. Modelele de acest tip se numesc *modele BDI* (Belief–Desire–Intention) (Georgeoff, Kinny, (1997)). Agenții *BDI* sunt caracterizați de o anumită „stare mentală” care specifică valorile atribuite celor trei componente: convingeri, dorințe și intenții. Foarte general, *convingerile* corespund informației pe care agentul o are despre mediul său înconjurător. *Dorințele* reprezintă opțiuni disponibile agentului – diferite stări posibile ale afacerilor pe care agentul le poate alege și pentru care ar trebui să aloce resurse. În sfârșit, *intențiile* reprezintă stări ale afacerilor pe care agentul le-a ales și cărora le-a alocat resurse.

Funcționarea unui agent BDI include actualizarea repetată a convingerilor utilizând informația despre mediu, decizia privind opțiunile care sunt disponibile, filtrarea acestor opțiuni pentru a determina noi intenții și acțiunea pe baza acestor intenții. Astăzi, arhitecturile *BDI* sunt cele mai utilizate în proiectarea sistemelor bazate pe agenți.

### 5.3.2 Agenții și mediul

Agenții există și funcționează într-un anumit mediu. Poate în nici un tip de sistem, mediul nu joacă un rol atât de important ca în cazul agenților.

Agenții percep mediul prin senzori și acționează asupra lui prin efectori (figura 5.2).

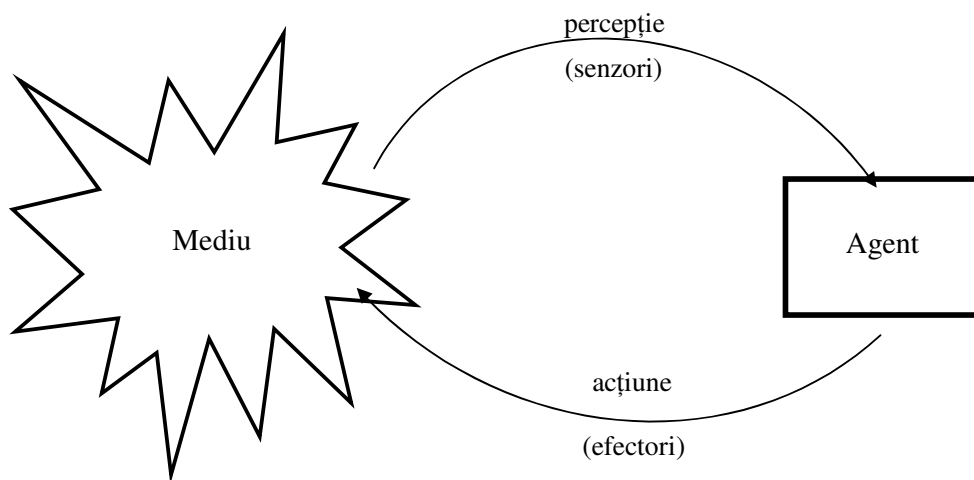


Figura 5.2

Am văzut că o proprietate fundamentală a agenților este *autonomia*. Totuși, autonomia nu trebuie înțeleasă în mod absolut. Practic, agenții nu pot fi nici total autonomi de influențe externe și nici complet dependenți de acestea. Ei întotdeauna depind într-o anumită măsură de factorii externi.

Un *mediu* reprezintă, în esență, condițiile în care există și funcționează un agent. Astfel spus, mediul definește proprietățile lumii în care agenții se află. Un mediu constă, deci, nu numai din toate entitățile aflate în jur, dar și din acele principii, legi și procese în care agenții există și interacționează. Proiectarea și implementarea agenților necesită luarea în considerare a acestor factori.

Un exemplu tipic de agent situat într-un mediu este mușuroiul de furnici. Furnicile interacționează una cu cealaltă prin intermediul feromonilor pe care ele îl depozitează în mediu și acesta le ghidează acțiunile. Numeroase interacțiuni individuale conduc la dezvoltarea emergentă a drumurilor urmate de furnici prin mediu. Totuși, mediul este mai mult decât un canal de comunicare. Agenții depind

atât de suportul fizic, tangibil, cât și de ceilalți agenți. Două aspecte sunt deci critice pentru mediile agenților: cel *fizic* și cel *comunicațional*.

**Mediul fizic** definește acele principii și procese care guvernează și susțin o populație de entități (agenți). De exemplu, pentru agenții biologici (animale și plante), ne referim la mediul lor fizic ca la o nișă ecologică. În ce privește agenții artificiali, aceștia pot avea diferite cerințe pentru a supraviețui (funcționa), dar au nevoie de un mediu fizic (similar nișei ecologice) pentru a exista.

Din definiția dată mediului fizic se observă că elementele fundamentale ce îl definesc sunt *principiile* și *procesele*. *Principiile* sunt legile naturii ce exprimă adevărurile fundamentale care sunt esențiale în lumea care ne înconjoară. Pentru agenți, principiile mediului fizic se pot introduce sub forma unor legi, reguli, restricții și politici care guvernează și susțin existența fizică a agenților. După (Weiss, 1999) și (Russell, Norvig, 1995), caracteristicile de bază pentru un mediu fizic se pot referi la:

- *accesibilitate*: în ce măsură mediul este cunoscut de către agent? Un mediu se spune accesibil dacă agentul poate să aibă acces la starea mediului relevantă pentru alegerea acțiunii următoare.

- *determinism*: în ce măsură agentul poate să prezică evenimente din mediu? Mediul este determinist când următoarea stare a acestuia poate fi determinată din starea curentă și din acțiunile alese de agenți.

- *diversitate*: cât de omogene sau de eterogene sunt entitățile din mediu?

- *controlabilitate*: în ce măsură agentul poate modifica mediul său?

- *volatilitate*: cât de mult poate mediul să se schimbe în timp ce agentul alege o acțiune următoare?

- *temporalitate*: este timpul divizat într-o manieră bine definită? De exemplu, acțiunile agentului se desfășoară continuu sau discret în timp?

- *localizare*: are agentul o locație distinctă în mediu care poate sau nu poate să fie aceeași ca locația altor agenți cu care el împarte mediu. Sau, toți agenții virtuali sunt colocatari? Cum se exprimă coordonatele care localizează agentul (sistem de coordonate, distanțe metrice, poziționare relativă) ?

*Procesele* reprezintă cea de-a doua caracteristică esențială a mediului. După (Parunak, 1996), un mediu se poate exprima sub forma:

$$\mathbf{Mediu} = \langle \mathbf{Stare}_e, \mathbf{Proces}_e \rangle$$



unde  $Stare_e$  reprezintă o mulțime de valori care definesc complet mediul. Structura, domeniile de valori și variabilitatea acestor valori nu sunt restricționate în această definiție, fapt ce face ca să apară foarte multe diferențe între diferitele tipuri de medii.  $Proces_e$  reprezintă o acțiune executată autonom care schimbă starea mediului,  $Stare_e$ . Executată autonom înseamnă că procesul de desfășurare fără să fie invocat de o entitate exterioară.

Cel mai important fapt în definiția de mai sus dată mediului este că mediul însuși este activ, el având propriul său proces care schimbă starea sa – ce include agenții și obiectele din cadrul mediului – independent de acțiunile în care sunt implicați acești agenți.

Diferite medii fizice vor fi necesare pentru agenți de tipuri diferite și reciproc. În cazul agenților artificiali, mediul fizic este de cele mai multe ori mediul informațional, care poate include mijloace de transmisie, stocare și prelucrare a informației, mijloace de detecție și orientare în spațiu ș.a.

Pentru a susține această structură variată de mijloace tehnologice de procesare a informației se utilizează platforme de prelucrare comune. O platformă reprezintă baza pe care aplicațiile conținând agenți se realizează și care conține toate cerințele de mediu specifice ale agenților. FIPA (Federația Internațională a Agenților Fizici) a elaborat un standard, „Agent Platform” (FIPA, 1998) care definește o arhitectură abstractă pentru dezvoltarea aplicațiilor sistemelor bazate pe agenți.

În figura 5.3 se reprezintă această platformă.

Mediul fizic este un loc populat, deci poate conține și alți agenți. De aceea, atunci când se definește o aplicație, trebuie specificat dacă luăm sau nu alte entități, dacă mediul este deschis (deci pot intra în viitor alți agenți) sau închis. Populația mediului reprezintă totalitatea entităților luate în considerare.

Dacă în medii cu un singur agent, agenții sunt priviți ca *entități independente*, în medii cu mai mulți agenți, aceștia devin *entități interdependente*. Dacă în primul caz, agentul poate să acționeze singur, în al doilea caz el trebuie să comunice cu ceilalți agenți. Apare, astfel, conceptul de **mediu comunicațional**. Acesta conține, în primul rând, principiile și procesele care guvernează și susțin schimbul de idei, cunoștințe, informații și date. De asemenea, el conține acele funcții și structuri care sunt utilizate pentru a asigura comunicarea cu ceilalți agenți, cum ar fi roluri, grupuri și protocoale de interacțiune dintre roluri și grupuri.

Sistemul de Management al Agentului	<b><u>Execuția și monitorizarea acțiunilor agenților</u></b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Funcții de bază</li><li>• Identificare</li><li>• Evidență</li><li>• Înregistrare</li><li>• Căutare</li><li>• Mobilitate</li></ul>
Managerul de Securitate al Platformei	<b><u>Securitatea transferului de mesaje și obiecte</u></b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Protocoale de securitate</li><li>• Codificarea datelor</li><li>• Semnătură digitală</li><li>• Salvarea datelor</li></ul>
Canalul de Comunicații al Platformei	<b><u>Asigurarea funcțiilor de comunicare de bază</u></b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Protocoale de comunicare</li><li>• Formate de documente</li><li>• Modalități de comunicare</li><li>• Siguranța comunicării</li></ul>

**Figura 5.3**

Mediul comunicațional se poate atunci defini ca acele principii, procese și structuri care asigură o infrastructură pentru ca agenții să schimbe informații.

În esență, comunicarea presupune transmiterea informației de la o entitate la alta. Acest transfer de informație poate îmbrăca forme foarte simple (comunicare prin semne, de exemplu), până la forme extrem de complexe (de exemplu, comunicarea într-un proces de negociere).

Comunicarea se presupune că are loc doar dacă starea internă a agentului care a primit mesajul se schimbă. Altfel vorbim de transmitere de informație. O modalitate de a determina dacă comunicarea a avut loc este deci să se ia în considerare rezultatul interacțiunii dintre doi agenți. În figura 5.4 sunt reprezentate diferite situații care pot apărea în comunicare. Se observă că avem cinci posibilități, dintre care cea mai complexă este situația e) în care cei doi agenți interacționează.

Interacțiunea dintre doi agenți presupune, deci, comunicarea bidirecțională dintre aceștia, altfel spus transmiterea de informație de la unul la celălalt și invers, informație care modifică starea internă a fiecărui agent în parte. Activitățile care sunt realizate de fiecare agent în procesul de comunicare se specifică în *protocoalele de comunicare*.

În sistemele bazate pe agenți, comunicarea și interacțiunea pot fi utilizate împreună. Acest lucru necesită introducerea, pe lângă protocoalele de comunicare, și a *protocoalelor de interacțiune*. Luarea în considerare a interacțiunilor dintre agenți duce la necesitatea introducerii conceptului de mediu social.

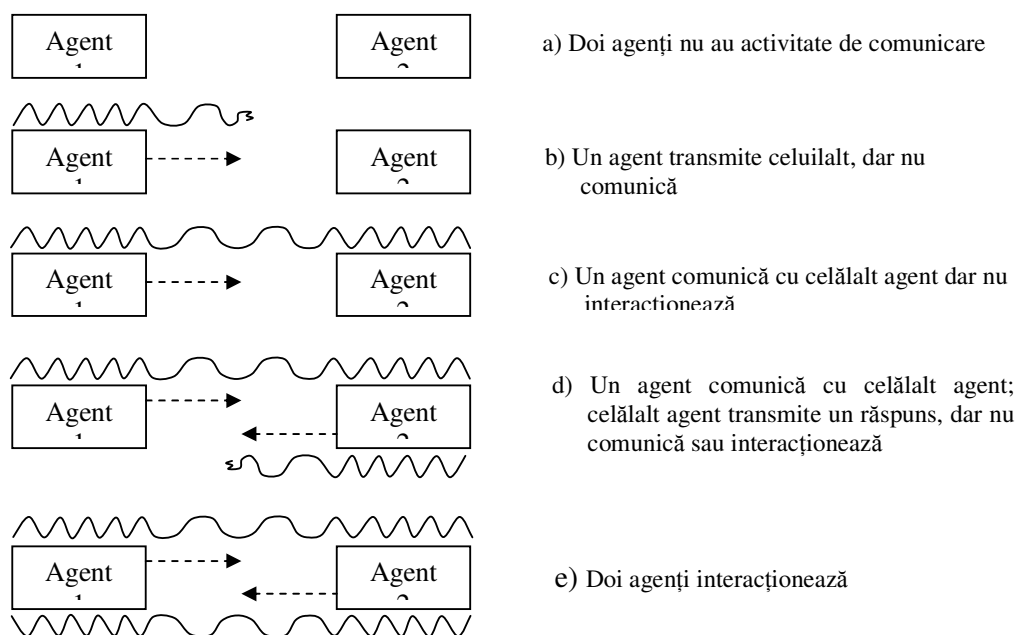
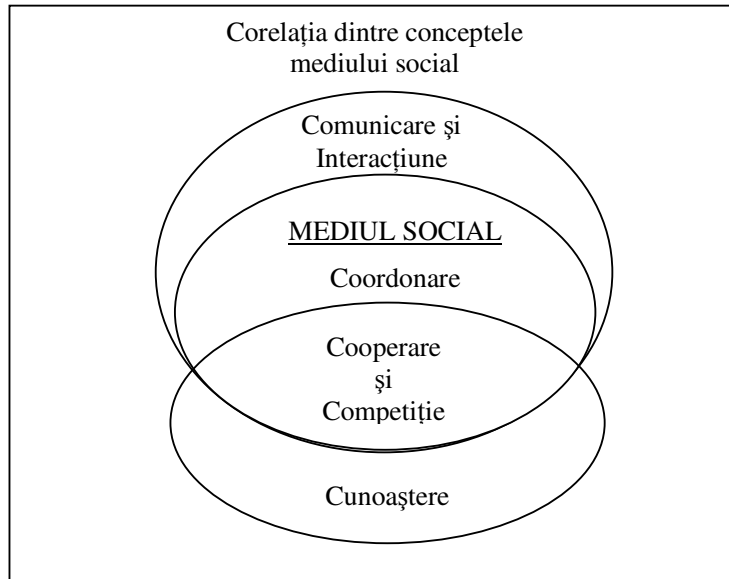


Figura 5.4

Un **mediu social** este un mediu comunicațional în care agenții interacționează într-o manieră coordonată.

Rezultă deci că mediul social este inclus în mediul comunicațional. Nu toate comunicațiile dintre agenți sunt sociale, dar activitatea socială a agenților necesită comunicarea dintre aceștia. Mediul social este definit de coordonare, cooperare și competiție. În figura 5.5 se reprezintă raporturile dintre aceste concepte.

Mediul social este caracterizat de principii și procese, ca și celelalte medii, dar și de conținut, care îl diferențiază de mediul fizic și mediul comunicațional.



*Figura 5.5*

**Principiile** mediului social sunt reprezentate de norme, obiceiuri, valori, obligații, dependențe ș.a. Acestea sunt incluse într-o serie de reglementări care caracterizează mediul social și anume:

- *Limbajul de comunicare*: agenții comunică pentru a înțelege și a se face înțeleși. Mediile sociale bazate pe agenți trebuie să definească principiile sintactice, semantice și pragmatice ale limbajului de comunicare. În plus, trebuie definite tipurile de mesaje care vor fi utilizate (de exemplu, aserțiuni, lanțuri de aserțiuni, replici, cereri de comunicări) și antologia acestora. Deja au fost create limbaje de comunicare de tip agent cum ar fi FIPA ACL sau KQML.

- *Protocoale de interacțiune*: un protocol de interacțiune între agenți descrie o modalitate de comunicare ca o secvență acceptată de mesaje între entități și restricțiile privind conținutul acestor mesaje.

- *Strategii de coordonare*: agenții comunică pentru a-și atinge scopurile proprii și scopurile grupului social la care ei iau parte. Cooperarea, competiția, planificarea și negocierea sunt principii comune utilizate pentru a executa activități într-un mediu distribuit.

- *Politici sociale*: regulile care impun un comportament social acceptabil. Ele includ reguli implicite și explicite de comportament, raportul dintre influență și putere etc.

- *Cultura*: o mulțime de valori, credințe, dorințe, intenții, reguli morale care determină caracteristicile de mai sus (cultura afectează limbajul, protocolul de interacțiune, politicile sociale).

**Procesele** mediului social se referă la condițiile care determină ca agenții să interacționeze în mod productiv. În particular, acestea se referă la:

- *Managementul interacțiunii*: gestiunea interacțiunilor dintre entități pentru a asigura că ele aparțin protocolului de interacțiuni dintre agenți care a fost ales. Apartenența la acest protocol poate fi asigurată de agenții participanți la interacțiuni fără ca mediul să fie implicat.

- *Prelucrarea limbajului*: limbajul de comunicare poate fi analizat corect, el poate fi analizat corect dar să nu fie adecvat (de exemplu este contradictoriu), sau este corect dar neadecvat cu contextul agentului.

- *Servicii de coordonare*: care pot fi servicii de evidență ce localizează agentul prin metode de tip pagini albe (pentru agentul individual), pagini galbene (pentru colectivități de agenți) și pagini verzi (servicii oferite), precum și servicii de mediere ce acționează prin intermediul unui agent mediator.

Pentru mediul social, spre deosebire de celelalte medii ale agenților, este important și conținutul acestuia.

**Conținutul** mediului social se referă la:

- unitățile sociale (grupurile) la care agenții aderă;
- rolurile jucate de aceștia în interacțiunile sociale;
- toți ceilalți membri care joacă roluri în acele unități sociale.

Fiecare *unitate socială* (grup) reprezintă o mulțime de agenți asociați care au un interes sau un scop comun. Un grup poate fi vid dacă nu există agenți participanți; el poate conține un singur agent sau poate să aibă agenți multipli.

Un *rol* este o reprezentare abstractă a unei funcții, serviciu sau identitate a unui agent în cadrul unui grup.

Pentru grupurile cu un singur agent definirea rolurilor este destul de simplă; reprezentarea rolurilor în sistemele cu agenți multipli (sisteme multiagent) devine însă extrem de complicată, necesitând abordarea distinctă în cadrul teoriei agenților a unor astfel de sisteme.

## **5.4 Sisteme multiagent (SMA)**

Sistemele multiagent diferă de sistemele cu un singur agent prin aceea că includ mai mulți agenți, fiecare dintre aceștia putând executa acțiuni autonome și urmărind scopuri proprii.

Un SMA poate fi definit deci ca o rețea slab cuplată de rezolvitori de probleme care lucrează împreună pentru a rezolva probleme care depășesc capacitățile individuale sau cunoștințele fiecărui rezolvitor (Durfee, Lesser, 1989).

Acești rezolvitori de probleme care reprezintă agenți în sensul definit mai sus, sunt autonomi și pot fi diferiți unul de celălalt.

Principalele caracteristici ale *SMA* sunt următoarele:

- fiecare agent are informație incompletă sau capacitate redusă de a rezolva problema, deci ei sunt limitați în raport cu complexitatea acestei probleme;
- nu există un sistem de control global;
- datele disponibile sunt descentralizate (distribuite); și
- calculul este asincron.

Pe lângă cerințele impuse sistemelor bazate pe agenți, în cazul *SMA* apar noi cerințe privind proiectarea și implementarea acestora. Astfel, un *SMA* trebuie să aibă o funcționare robustă și eficientă, să fie capabil să conlucreze cu sisteme existente și să aibă capacitatea de a rezolva probleme în cazul în care datele, expertiza sau controlul sunt distribuite. Datorită acestor cerințe, *SMA* ridică dificultăți deosebite atât în proiectare și implementare cât și în funcționare.

Pentru a discerne mai bine natura acestor probleme, vom trece în revistă câteva dintre acestea așa cum sunt ele prezentate în literatură (vezi Bond, Gasser, 1988, Weiss, 2000).

1) Cum formulăm, descriem, descompunem și alocăm problemele ce trebuie rezolvate și sintetizăm rezultatele între un grup de agenți?

2) Cum facem pe agenți să comunice și interacționeze între ei ? Ce limbaje de comunicare și protocoale utilizăm? Ce și când comunică agenții între ei ?

3) Cum asigurăm ca agenții să acționeze coerent în luarea deciziilor sau îndeplinirea acțiunilor, ținând cont de efectele distribuite ale deciziilor locale și de evitarea interacțiunilor dăunătoare?

4) Cum facem ca agenții individuali să reprezinte și să raționeze despre acțiunile, planurile și cunoașterea celorlalți agenți pentru a se coordona cu aceștia?

5) Cum recunoaștem și reconciliem punctele de vedere diferite dintre agenți și intențiile de acțiuni conflictuale dintre aceștia pentru a coordona acțiunile lor?

6) Cum realizăm efectiv echilibrul dintre calculul local și comunicare? Mai general, cum se face alocarea resurselor limitate în cadrul sistemului?

7) Cum se evită sau se rezolvă comportamente generale ale sistemului nedorite, cum ar fi cel haotic sau oscilant ?

8) Cum se realizează practic SMA? Ce platforme de proiectare și metodologii de dezvoltare sunt cele mai adecvate?

Evident că răspunsurile la aceste întrebări sunt încă incomplete în prezent. Domeniul de cercetare al SMA este în plină expansiune și vor trece încă mulți ani până când vom reuși să avem răspunsuri complete și corecte la toate aceste întrebări. Se pare însă că SMA inteligente se apropie cel mai mult de forma optimă a SMA în raport cu criteriile de mai sus. De aceea, vom insista mai mult asupra realizărilor din acest domeniu.

#### **5.4.1 Sisteme multiagent inteligente**

În 1980 un grup de cercetători de la MIT s-a reunit pentru a discuta aspectele privind rezolvarea inteligentă a problemelor utilizând sisteme ce conțin mai mulți rezolvitori. O concluzie majoră a fost că astfel de sisteme nu trebuie să aibă nici o arhitectură paralelă, ca în cazul procesării distribuite pe diferite mașini, dar nici o arhitectură centralizată strict, în care să se controleze toate fazele rezolvării problemei. Ei au propus o arhitectură în care rezolvitorii de probleme inteligenți pot să se coordoneze eficient în rezolvarea problemelor.

Această concluzie are, în perspectiva progreselor realizate de atunci, o importanță excepțională, punându-și practic amprenta asupra întregii dezvoltări a SMA inteligente. Ca și în cazul sistemelor bazate pe agenți, vom trece în revistă câteva dintre etapele parcurse, tipurile de arhitecturi și principalele realizări în domeniul SMA inteligente.

#### **5.4.2 Primele sisteme inteligente**

Printre primele sisteme realizate din perspectiva celor de mai sus se numără sistemele de rezolvare a problemelor cu actori (Agha, Hewitt, 1987, 1988). Actorii

sunt componente autonome, interactive ale unui sistem de calcul care comunică între ei prin mesaje asincrone. Funcțiile de bază ale unui actor sunt:

- *crează*: crearea unui actor pornind de la o descriere de comportament și o mulțime de parametrii, posibil incluzând actori existenți;

- *trimite*: trimiterea unui mesaj către un actor;

- *devine*: schimbarea stării locale a unui actor.

Sistemele cu actori reprezintă o modalitate naturală de a efectua calcule concurente. Totuși, astfel de sisteme, în raport cu alte tipuri de sisteme inteligente propuse, s-au dovedit mai puțin coerente.

Granularitatea de nivel redus a actorilor a pus problema privind realizarea unor comunități mai largi de actori și atingerea unor performanțe mai ridicate în realizarea scopurilor generale folosind doar cunoștințele locale ale agenților. Pentru depășirea acestor deficiențe, Hewitt, principalul susținător al acestor tipuri de sisteme cu actori, a propus o arhitectură deschisă care poate include noi caracteristici ale actorilor și noi actori în cazul problemelor de dimensiuni mari.

O altă direcție de cercetare a fost cea legată de alocarea flexibilă a sarcinilor între rezolvitori de probleme multipli (numiți noduri). Astfel, Davis și Smith propun, încă din 1983, Contract Net Protocol, în care agenții pot juca dinamic două roluri: *manager* și *contractor*. Dacă se dă o problemă ce trebuie rezolvată, un agent determină mai întâi dacă ea poate fi descompusă în subprobleme ce pot fi rezolvate în paralel (concurrent). Se utilizează Contract Net Protocol pentru a anunța transferul acestor subprobleme către noduri și a primi de la aceste noduri informații privind modalitățile pe care le pot folosi pentru a rezolva subproblemele. Un nod care primește un anunț relativ la o subproblemă trimite înapoi un anunț indicând, deci, cât de bine crede el că va rezolva acea subproblemă. Contractorul colectează aceste anunțuri și distribuie subproblemele către cele mai bune noduri. La baza Contract Net Protocol se află o metodă de coordonare pentru alocarea problemelor, care printr-o alocare dinamică, permite agenților să liciteze pentru mai multe subprobleme în același timp și asigură un echilibru al încărcării acestora cu subprobleme (agenții ocupați nu este necesar să liciteze). Limitele sistemului erau legate de imposibilitatea de a detecta și rezolva conflicte, de faptul că agenții nu erau informați atunci când nu primeau subprobleme, agenții nu puteau refuza subproblemele alocate și nu exista o preempțiune în executarea sarcinilor (agenții



care mai rezolvaseră anumite tipuri de probleme puteau primi alte tipuri, chiar dacă sistemul conținea probleme din primul tip).

Acest tip de abordare este important deoarece el stă la baza cercetărilor actuale privind mecanismele de piață și utilizarea acestora în coordonarea SMA (Sandholm, Lesser, 1996).

### **5.5 Cooperare și interacțiune în SMA inteligente**

O problemă fundamentală în SMA este cea a cooperării dintre agenți, care pot eventual fi eterogeni, în vederea atingerii unor obiective comune. Dacă, în cazul sistemelor cu un singur agent, prin planificare se putea construi o secvență de acțiuni pornind doar de la scopuri, resurse și restricții de mediu, în cazul SMA planificarea necesită luarea în considerare a rolului celorlalte activități ale agenților în alegerea de către un agent anumit a strategiei sale de acțiune.

În sistemele inițiale, în care grupuri de agenți urmăreau scopuri comune, interacțiunile dintre agenți erau determinate prin strategii de cooperare construite pentru a îmbunătăți performanța lor colectivă. Rezultă de aici necesitatea planificării complete înainte de acțiune. Pentru a produce un plan coerent, agenții trebuiau să recunoască interacțiunile dintre subscopuri și fie să le elimine, fie să le rezolve.

Într-o arhitectură propusă de Georgeff, această problemă se rezolvă prin includerea unui agent sincronizator care recunoaște și rezolvă astfel de interacțiuni. Ceilalți agenți trimit sincronizatorului planurile lor; acesta examinează planurile pentru regimurile critice în care, de exemplu disponibilul de resurse poate determina agenții să nu le îndeplinească. Agentul sincronizator inserează mesaje de sincronizare care funcționează ca niște semafoare pentru a asigura excluderea mutuală și a evita astfel coliziunea dintre agenți în îndeplinirea planurilor acestora.

O altă modalitate de abordare a interdependențelor dintre subprobleme este Modelul Corect Funcțional (FA/C) (Duffee, Lesser, 1991). În FA/C, nu este necesar ca agenții să cunoască toate informațiile locale pentru a rezolva subproblemele lor, ci acționează asincron și schimbă rezultatele parțiale obținute.

Începând cu FA/C, o serie de alte arhitecturi distribuite pentru coordonarea agenților au fost dezvoltate, folosind un *meta-nivel static* cu informații privind organizarea generală a problemei ce trebuie rezolvată și un *meta-nivel dinamic*, numit Planificator Global Parțial (PGP) [Duffee, 1988]. PGP este o modalitate flexibilă

de coordonare care nu presupune o distribuție inițială dată a subproblemelor, expertizei și a resurselor, ci permite nodurilor să se coordoneze ele însele dinamic. Interacțiunile dintre agenți iau acum forma comunicării planurilor și scopurilor având un anumit nivel de abstractizare. Aceste interacțiuni permit unui agent care le primește să-și elaboreze așteptări privind comportamentul viitor al agentului care a trimis comunicarea, deci îmbunătățește predictibilitatea agenților și coerența sistemului. Deoarece agenții sunt cooperativi, agentul primitor utilizează informația primită pentru a ajusta propriul său plan local, astfel încât scopurile comune sunt atinse. Totuși, înainte de utilizarea *PGP*, agenții trebuie să conțină anumite cunoștințe privind modul și momentul utilizării *PGP*. Decker și Lesser, 1995 au proiectat un *PGP* generic, numit TAEMS pentru comunicare în timp real și meta-control, care evită necesitatea de a face o planificare detaliată la toate nodurile posibile.

O altă modalitate de abordare a cooperării în *SMA* s-a orientat către conceptul de „echipă de lucru” (Cohen, Levesque, 1991). Aplicabilă mai ales în mediu dinamic, metoda presupune că agenții dintr-un *SMA* formează o echipă care poate greși sau care poate avea noi oportunități în îndeplinirea sarcinilor stabilite. Fiecare membru al echipei este monitorizat în privința performanței și echipa se reorganizează în funcție de situația curentă.

Arhitectura bazată pe intenții comune [Levesque, Cohen, 1990] este o modalitate de a extinde cooperarea bazată pe echipa de lucru. Ea face apel la o stare mentală a echipei, denumită o intenție comună prin care o echipă intenționează să întreprindă o acțiune comună dacă membrii echipei sunt obligați să ia parte la o acțiune comună a echipei, chiar dacă ei cred individual că nu ar trebui să facă acest lucru. O obligație comună este definită ca un scop comun persistent al *SMA*.

Pentru a intra într-o obligație comună, toți membrii echipei trebuie să-și declare convingerile individuale și celelalte obligații. Acest lucru este făcut printr-un schimb de informații reciproce. Protocolul de obligații sincronizează echipa, astfel că toți membrii ei intră simultan într-o acțiune comună obligatorie pentru realizarea unei sarcini a echipei.

În plus, toți membrii echipei trebuie să confirme participarea la un scop obligatoriu comun, ei putând refuza dacă li se propun mai multe scopuri.

În acest ultim caz, se impune ca agenții să negocieze la care scop comun participă fiecare.

### **5.6 Negocierea și învățarea în SMA inteligente**

Dacă agenții dintr-un SMA inteligent sunt autointeresați (deci urmăresc și scopuri proprii) atunci accentul cade pe negociere. Negocierea este o metodă de coordonare și rezolvare a conflictelor între agenți. Astfel de conflicte pot să apară în planificarea activităților și sarcinilor, în rezolvarea problemelor de alocare a resurselor critice, rezolvarea inconsistenței dintre sarcini și activități în determinarea structurii organizatorice etc. Negocierea este necesară în procesul de comunicare a schimbării planurilor, alocării sarcinilor sau în rezolvarea centralizată a încălcării restricțiilor.

Principalele caracteristici ale unui proces de negociere într-un SMA sunt (Jenning, Sycara, Wooldridge, 1998):

- a) prezența unei anumite forme de conflict care trebuie să fie rezolvat într-o manieră descentralizată;
- b) existența în SMA a unor agenți autointeresați (care au și scopuri proprii) sau egoiști (care au numai scopuri proprii);
- c) raționalitate mărginită; deci agenții au posibilitatea de a lua decizii raționale independent dar în anumite limite;
- d) informație incompletă;
- e) comunicare între agenți;

Sycara (1990) și Rosenschein, Zorkin, (1994) au fost primii care au studiat negocierea între agenți autointeresați din SMA. Metoda lui Rosenschein se bazează pe teoria jocurilor. Fiecare agent are asociată o funcție de utilitate. Valorile acestei funcții sunt reprezentate într-o matrice de plăți care este cunoscută de ambii agenți incluși în negociere. Fiecare agent apreciază și o lege alternativă care-i va maximiza utilitatea. Deși metoda bazată pe teoria jocurilor este simplă și elegantă, ea are ipoteze restrictive foarte puternice care fac ca ea să poată fi cu greu aplicată situațiilor practice. Negocierile din lumea reală au loc în condiții de incertitudine parțială sau completă, includ criterii multiple care nu pot fi sintetizate doar de o funcție de utilitate iar utilitățile agenților nu sunt cunoscute, deci agenții nu sunt omniscienți (atoatecunoscători).

Metoda propusă de Sycara este inspirată din domeniul negocierilor salariale. Se consideră trei agenți (un sindicat, o companie și un mediator). Ei fac propuneri și contrapropuneri pe care le transmit fiecare celorlalte două părți implicate. Negocierea

se referă la multiple aspecte cum ar fi salarii, pensii, bonusuri, subcontractare ș.a. Modelul utilității multidimensionale al fiecărui agent este cunoscut doar de către acesta. Agenții își schimbă treptat convingerile în cadrul negocierii până când se ajunge la un acord acceptat de toate părțile. Metoda de modificare se numește *argumentare persuasivă* (Sycara, 1990) și stă la baza multor SMA care includ procese de negociere. Ulterior metoda argumentării a încorporat și tehnici de învățare bazate pe cazuri, ceea ce a scurtat considerabil durata procesului de negociere în sine.

Rolul timpului în procesul de negociere a fost abordat pe larg de Kraus (2001). Utilizând un mecanism de negociere distribuit, agenții din cadrul unui SMA negociază și pot ajunge la acorduri eficiente fără întârzieri. Viteza de negociere este importantă în comerțul electronic, caz în care acest proces se desfășoară în condiții de informație incompletă, termene limită stabilite și posibile valori ale contractelor încheiate. De aceea, unele sisteme de negociere prevăd penalități pentru încălcări de termene sau contracte.

Un alt aspect important în negocierea dintre agenții auto-interesați este abilitatea de a-și adapta comportamentul la circumstanțe schimbătoare (Stone, Veloso, 1998). Acest aspect este legat de procesul de învățare. Învățarea în SMA inteligente este dificil de abordat datorită faptului că pe măsură ce ceilalți agenți învață, mediul înconjurător al agentului se schimbă. În plus, acțiunile celorlalți agenți pot fi neobservabile, astfel că agentul care învață poate face erori mari în privința tipurilor noi de comportamente pe care le va întâlni.

Hu și Wellman (1998) au introdus conceptul de *echilibru conjectural*, definit ca situația în care toate așteptările agenților privind comportamentele celorlalți agenți se realizează și fiecare agent răspunde optimal la așteptările sale. În SMA de acest tip, fiecare agent construiește un model al răspunsurilor celorlalți agenți la modificările sale de comportament ca urmare a învățării.

Într-un model de negociere recent, denumit *modelul bazarului*, învățarea se face prin interacțiunile dintre agenți, deci este un proces care se desfășoară continuu, pe măsură ce SMA funcționează. Studiul acestui model de negociere și învățare a arătat în esență că:

a) când toți agenții învață, utilitatea întregului sistem este aproape de optim și utilitățile agenților individuali sunt similare;

b) când nici un agent nu învață utilitățile agenților individuali sunt aproape egale dar utilitatea întregului sistem este foarte scăzută;

c) când doar un agent învață, utilitatea individuală a acestuia crește, dar utilitatea individuală a celorlalți agenți ca și utilitatea întregului sistem descrește [Zeng, Sycara, 1998].

## **5.7 Modelarea-bazată-pe-agenți în economie**

### **5.7.1 Ce sunt modelele-bazate-pe-agenți?**

A-life este numele unui domeniu de cercetare multidisciplinară care încearcă să dezvolte modele pentru a demonstra cum cresc și evoluează organismele vii. Se speră că prin acest mod se va pătrunde mai adânc în cunoașterea naturii vieții organice și se va înțelege mai bine procesele aflate la originea vieții. A-life a stimulat apariția unor noi metode în cibernetică. Termenul de „a-life” a fost introdus de Christopher Longton care a organizat prima conferință despre a-life la Santa Fe, ca în 1987. Aceasta nu înseamnă că studii similare, sub diferite nume nu ar fi apărut înainte de 1980.

De fapt, doi savanți au avut cercetări teoretice similare, părintele teoriei automatelor, John von Neumann, matematician celebru și pionier al științei calculatoarelor și matematicianul polonez Stanislan Ulam care, spre sfârșitul anilor 50, au început să exploreze natura automatelor celulare. Intenția lor era să aplice aceste teorii în studii privind creșterea, dezvoltarea și reproducerea ființelor vii. Aceste celule matematice pot fi utilizate pentru a simula procese fizice, biologice și economice prin supunerea celulelor unei mulțimi simple de reguli care se aplică în mod repetat (de exemplu, fiecare celulă își schimbă culoarea în raport cu regulile respective și cu culorile celulelor vecine).

Von Neumann și Ulam au arătat că, prin utilizarea unui set de reguli destul de simple, este posibil ca o configurație de celule să revină la configurația inițială (de exemplu la culorile inițiale) ceea ce înseamnă că ele s-au „reprodus”. Aceste automate celulare apar sub forma unor lățite de celule. Fiecare celulă este caracterizată prin valori specifice care pot fi schimbate în raport cu regulile fixate. O nouă culoare a celulei este determinată pe baza valorii sale curente și a valorilor vecinilor imediați. Astfel de automate celulare formează forme, se reproduc și mor.

Langton a utilizat lucrările lui von Neumann ca punct de plecare pentru a proiecta un sistem a-life care poate fi simulat pe un calculator. În 1979 el a dezvoltat un „organism” care avea proprietăți asemănătoare organismelor vii. Această creatură se reproducea singură într-un mod care, cu fiecare generație nou apărută, ducea mai departe proprietățile organismului inițial, dar apăreau și noi proprietăți. Astfel de comportament simula deci procesul de mutație și evoluție din organisme vii.

Economistul Thomas Schelling a fost unul din primii cercetători care a încercat să aplice metodele a-life în științele economice. El a creat o lume artificială utilizând nu un calculator ci o masă de șah pe care monede de diferite dimensiuni se mișcau pe baza unor reguli simple. În acest mod, el a creat o lume artificială (virtuală) și a arătat că, pe lângă alte proprietăți, o are și pe aceea că chiar și preferințe foarte slabe pentru a locui și lucra într-o anumită parte a mesei conduc la diferențe mari între indivizi (monede).

Pornind de aici, au apărut **modelele-bazate-pe-agenți** (MBA). Biologul Tom Ray a creat programe „agent” pe laptop-ul său. Scopul fiecărui agent era să facă o copie a lui însuși în memorie. Ray a presupus un timp de viață finit pentru fiecare program. El a lăsat programele să ruleze toată noaptea și dimineața a observat că agenții săi erau angajați în activități echivalente digital cu competiția, colaborarea și sexul. Când agenții-programe realizau copii ale lor în calculator, schimbau aleatoriu codul apărut. Astfel se poate spune că ei sufereau mutații destructive care duceau la „moartea” programelor, dar unele schimbări făceau un agent să-și îndeplinească mai bine sarcina, în sensul că ei aveau nevoie de mai puține instrucțiuni și erau capabili să se autocopieze mai rapid, mai sigur și să ruleze mai repede. Versiunile mai scurte se reproduceau și mai repede și, foarte curând, îi înlăturau pe „competitorii” lor mai lenți.

Metoda a-life a generat „modelarea-bazată-pe-agenți”, care este denumită în acest fel pentru a face distincția cu „modelarea-bazată-pe-ecuații”. Putem scrie, de exemplu, ecuații diferențiale pentru a modela interacțiunile dintr-o populație de indivizi (de exemplu modelul Lotka-Volterra), dar putem la fel de bine să urmărim evoluția individuală a fiecărui animal (element, agent) și să concentrăm această evoluție în anumite caracteristici agregate. Aceste două metode sunt esențial diferite și este dificil acum să spunem care este mai bună.

Cercetările actuale în MBA sunt orientate către identificarea comportamentelor individuale ale ființelor vii și apoi către utilizarea acestora pentru a simula cum „se

mișcă, zboară, și cooperează” fără să încorporeze aceste caracteristici în mod explicit în tipurile de comportament al acestor elemente. Multe creaturi a-life constau în nu mai mult decât câteva linii de program și trăiesc în medii artificiale compuse din pixeli și mulțimi de date. Rețeta pentru a realiza o astfel de creatură este destul de simplă: se pregătește un mediu în care experimentele sintetice vor acționa, se creează câteva sute de indivizi care vor popula acest mediu și se definește un set de reguli pe care aceștia le vor urma. Se încearcă să se simplifice problema cât mai mult posibil pentru a păstra doar esențialul. Se scrie un program care simulează regulile simple ale interacțiunilor în comportamentele elementelor. Se rulează programul de multe ori cu diferite numere aleatoare așteptând să înțelegem cum reguli simple dau naștere la comportamentul observat. Se localizează sursa de comportament și efectele diferiților parametrii. Se simplifică simularea cât mai mult posibil sau se adaugă elemente adiționale dacă este necesar.

De fapt se rezolvă o simplă ecuație:

$$\text{Agenți (entități micro)} + \text{Mediu} + \text{Dinamică} = \text{A-life}$$

### **5.7.2 Exemple de modele-bazate-pe-agenți**

(vor fi studiate în anul IV)

### **5.7.3 Cum se construiește un MBA?**

Nimeni nu cunoaște cel mai bun mod de a construii MBA. Diferite arhitecturi (deci proiecte) au merite depinzând de scopul simulării. Desigur că fiecare MBA trebuie să includă mecanisme pentru primirea inputurilor din mediu, pentru stocarea unei istorii privind inputurile și acțiunile precedente, pentru determinarea a ceea ce este de făcut, pentru realizarea acțiunilor și pentru distribuirea outputurilor. Arhitecturile de agenți pot fi împărțite în cele care sunt realizate utilizând paradigma simbolică a AI și metode non-simbolice, cum ar fi cele bazate pe rețele neuronale. În plus există MBA hibride (Kluver, 1998).

### **5.7.3.1 Tehnici pentru construirea agenților**

#### **1) Sisteme de producție**

Una din cele mai simple dar eficiente metode de construire a MBA este utilizarea unui sistem de producție. Un sistem de producție are trei componente:

- o mulțime de reguli;
- o memorie de lucru;
- un interpretator al regulii.

Regulile constau din două părți: o condiție care specifică când regula va fi executată și o parte de acțiune.

De exemplu, un agent poate fi proiectat să se plimbe într-un mediu simulat colectând orice mâncare care o întâlnește în drumul său. Un astfel de agent poate să includă o regulă care spune: DACĂ eu dau de o anumită mâncare ATUNCI o adun. Acesta ar fi una din multele reguli, fiecare cu o condiție diferită. Unele reguli vor include acțiuni care însumează fapte care se petrec în memoria de lucru și alte reguli vor avea condiții care testează stări ale memoriei de lucru.

Interpretatorul de reguli consideră fiecare regulă la rând, alege pe cele pentru care partea de condiție este îndeplinită, execută acțiunile indicate și repetă acest ciclu într-un număr nedefinit de ori. Reguli diferite pot fi executate la fiecare ciclu deoarece mediul imediat s-a schimbat sau deoarece o regulă a modificat memoria de lucru într-un astfel de mod încât o nouă regulă a devenit eligibilă. Utilizând un sistem de producție este relativ ușor să construiești agenți reactivi care răspund la stimuli din mediu prin anumite acțiuni. Este, de asemenea, posibil dar mai dificil să construiești agenți care au capacitatea să reflecte acest mediu prin decizii și deci să modelezi cunoașterea. O altă posibilitate este să construiești agenți care își schimbă propriile reguli utilizând un algoritm adaptiv care favorizează regulile ce generează acțiuni relativ eficiente și le penalizează pe celelalte. Aceasta este baza **sistemelor clasificatoare**.

#### **2) Metode evolutive**

Agenții bazați pe sisteme de producție au potențialul să învețe despre mediul lor și despre alți agenți prin adăugarea unor cunoștințe în memoria de lucru. Regulile agenților însuși, totuși, rămân neschimbate. Pentru anumite probleme, este de dorit ca să se creeze agenți care sunt capabili să învețe: deci structura internă și



prelucrarea regulilor să se adapteze la circumstanțe schimbătoare. Există două tehnici care se utilizează în acest sens: **rețelele neuronale și algoritmi evolutivi**.

Rețelele neuronale sunt inspirate din analogia cu conexiunile din creier. O rețea neuronală constă din trei sau mai multe straturi de neuroni cu fiecare neuron conectat la toți ceilalți neuroni de pe straturile adiacente. Primul strat acceptă inputuri din mediu, le prelucrează și le trece următorului strat. Semnalul este transmis prin straturi până când ajunge la stratul de ieșire. Fiecare neuron acceptă inputuri de la stratul precedent, ajustează inputurile cu ponderi pozitive și negative, le însumează și transmite semnalul mai departe. Utilizând un algoritm denumit backpropagare a erorii, rețeaua poate fi reglată astfel încât fiecare model de input să dea naștere la un model diferit de output. Acest lucru este făcut prin antrenarea rețelei cu exemple cunoscute și ajustând ponderile până sunt generate outputurile dorite dându-se inputuri particulare. Spre deosebire de sistemul de producție, o rețea neuronală poate modifica răspunsurile sale la stimuli în lumina experienței anterioare. Un număr de topologii de rețele au fost utilizate pentru a modela agenți astfel încât ei să fie capabili să învețe din acțiunile lor și din răspunsurile celorlalți agenți.

Un alt mod de a permite unui agent să învețe este utilizarea unui algoritm evolutiv. Aceștia sunt bazați pe analogia cu biologia, decurgând din teoria evoluției prin selecție naturală. Cel mai frecvent utilizat algoritm de acest tip este algoritmul genetic (GA).

Acesta lucrează cu o populație de indivizi, fiecare dintre ei având un anumit nivel măsurabil de „fitness” utilizând o metrică definită de constructorul de model. Indivizii cei mai adaptați sunt „reproduși” prin înmulțire cu alți indivizi adaptați pentru a produce urmași care împart caracteristici luate de la fiecare părinte. Înmulțirea continuă mai multe generații, având drept rezultat că fitnessul mediu al populației crește pe măsură ce populația se adaptează la mediul său.

Atât în cazul utilizării rețelelor neuronale cât și a algoritmilor genetici, constructorul de modele trebuie să ia o decizie privind scala la care vrea ca modelul să lucreze. De exemplu, în cazul modelelor genetice, este posibil să se considere întreaga populație ca un singur agent. Algoritmul genetic va fi atunci o „cutie neagră” utilizată pentru a da agentului abilitatea să învețe și să se adapteze. Alternativ, fiecare individ poate fi un agent având ca rezultat că vom avea o populație de agenți privită ca un întreg care evoluează. Similar, este posibil ca fiecare agent individual să fie modelat utilizând o rețea neuronală, sau o întreagă societate (economie) să fie

reprezentată ca o rețea, cu fiecare neuron dându-se o interpretare ca agent (deși, în ultimul caz, este greu să construim toate atributele agenților).

#### **5.7.4 Aplicații ale modelelor–bazate–pe–agenți**

Aplicațiile agenților și modelelor–bazate–pe–agenți sunt extraordinar de diversificate în privința domeniilor abordate: economic, industrial, comercial, financiar, militar, informatic, ș.a.

În economie s-a constituit un domeniu nou ce se ocupă exclusiv cu studiul aplicării agenților în rezolvarea diferitelor tipuri de probleme economice, domeniu denumit **Economia bazată pe agenți**. Scopul acesteia derivă din Alife: crearea de economii artificiale cu ajutorul unor interacțiuni economice între agenți care, la început nu au cunoștințe despre mediul înconjurător, dar au abilitatea de a învăța și apoi se observă ce tipuri de piețe, instituții și tehnologii dezvoltă agenții, cum ei își coordonează acțiunile și se organizează ei înșiși într-o economie.

Economiile de piață sunt privite ca sisteme adaptive complexe, constând dintr-un mare număr de agenți adoptivi întreținând interacțiuni paralele locale. Aceste interacțiuni locale dau naștere anumitor regularități macroeconomice cum ar fi protocoale de împărțire a pieței și norme de comportament care, la rândul lor, au o reacție inversă asupra determinării interacțiunilor locale. Rezultatul este un sistem dinamic complicat de lanțuri cauzale recurente conectând comportamente individuale, rețele de interacțiuni și rezultate sociale.

Desigur că acest dublu feedback între nivelul micro și cel macroeconomic este cunoscut în cibernetica economică de mult timp. Ceea ce a lipsit până acum au fost mijloacele ca acest feedback cantitativ să fie modelat în întreaga sa complexitate dinamică. Economia bazată pe agenți ca metodă de studiu a economiilor modelate ca sisteme evolutive formate din agenți autonomi interactivi, aduce sistemul economic în laboratoare, pentru a studia evoluția economiilor de piață descentralizate în condiții experimentale controlate. Două aspecte fundamentale decurg din aceste studii. Primul este descriptiv, axat pe explicarea constructivă a comportamentului global emergent.

De ce apar regularități globale în aceste economii în ciuda unei planificări și a unui control de sus în jos? Cum aceste regularități globale sunt generate de jos în

sus, prin interacțiunile locale repetate dintre agenți interacționând autonom? Și cum e apar aceste regularități și nu altele?

Al doilea aspect este normativ, axat pe proiectarea de mecanisme de reglare și control. Dându-se o entitate economică particulară, existentă sau virtuală, care sunt implicațiile acestei entități pentru performanțele economiei ca un întreg? De exemplu, cum poate un protocol de piață anumit sau o reglementare guvernamentală afecta eficiența economică?

În laboratorul experimental, se începe cu construirea unei economii cu o populație inițială de agenți. Acești agenți pot include atât agenți economici (de exemplu: investitori, bănci, ....) cât și agenți reprezentând diferite fenomene sociale sau din mediu (de exemplu guvernul, pământul, vremea, ....). starea inițială a economiei este specificată prin specificarea atributelor inițiale ale agenților. Atributele inițiale ale unui agent pot include caracteristici asupra tipului de agent, norme comportamentale internalizate, moduri interne de comportament (inclusiv modul de comunicare și învățare) și informația stocată intern despre sine și despre ceilalți agenți din economie. Economia evoluează apoi în timp, fără alte intervenții din afară. Toate evenimentele care apar ulterior trebuie să decurgă din interacțiunile agent – agent care au loc în timpul simulării. Nici o coordonare exterioară nu este permisă. Rezultatele obținute sunt utilizate pentru a modifica constructiv sistemele economice reale sau a crea, pornind de la sistemele virtuale, noi sisteme economice care au performanțe superioare.

Se observă similaritățile dintre construirea unei economii bazate pe agenți și metoda a-life. Totuși există o deosebire fundamentală între cele două domenii. Dacă a-life consideră modelele sale ca o **sinteză** a lumii vii pe calculatoare, mașini sau alte medii alternative, economia – bazată – pe – agenți privește modelele sale ca reprezentări ale proceselor economice existente sau virtuale realizate în scopul perfecționării acestora. Direcțiile principale în care s-au dezvoltat aplicații ale economiei-bazată-pe-agenți pot fi considerate următoarele: Învățarea; Evoluția normelor de comportament; Modelarea „bottom-up” a proceselor economice de piață; Formarea rețelelor economice; Modelarea organizațiilor; Proiectarea agenților pentru piețe automatizate; Experimente paralele cu agenți reali și computaționali; Construirea de laboratoare computaționale.

Să trecem în revistă câteva dintre realizările obținute în domeniile amintite.

#### **5.7.4.1 Învățarea**

Învățarea este o caracteristică de bază a agenților economici. Primele aplicații ale proceselor de învățare în economie au fost cele ale algoritmilor genetici, programării genetice și al altor forme de învățare evolutivă în modelarea proceselor sociale.

Mulți astfel de algoritmi de învățare s-au dezvoltat inițial având formulate obiective de optimizat. Pentru modelele - bazate – pe – agenți, algoritmi de învățare sunt motivați de necesitatea utilizării unor scheme de învățare globală în care strategiile agenților sunt îmbunătățite continuu pentru a realiza un anumit criteriu exogen de „fitness”(de exemplu eficiența pieței). Pe de altă parte, pentru modelele proceselor economice cu participanți umani, algoritmi de învățare utilizați în MBA vor fi necesari pentru a încorpora caracteristici fundamentale ale comportamentului decidenților umani. În astfel de cazuri, se pot utiliza scheme de învățare locale în care diferite „vecinătăți” de agenți (cum ar fi firmele în cadrul unei industrii) evoluează în mod separat conform unor strategii care sunt învățate pe măsură ce criteriul de fitness este îndeplinit (de exemplu, profitabilitatea relativă a firmei).

Într-un studiu recent, Daniol abordează performanțele algoritmilor de învățare în diferite contexte economice. El dovedește utilitatea deosebită a algoritmilor genetici utilizați în implementarea strategiilor individuale de evoluție. El a arătat că aspectele particulare ale implementării cum ar fi configurația precisă a valorilor date parametrilor pot influența puternic rezultatele potențiale pe termen lung. Această lucrare a avut un impact substanțial asupra cercetărilor în domeniul MBA deoarece algoritmi genetici au fost utilizați tot mai mult pentru reprezentarea învățării la agenții economici.

De asemenea, un studiu al lui Rust ș.a. a avut o influență mare în acest domeniu. El face o analiză comparativă a algoritmilor utilizați în licitația dublă continuă pe piețele valutare. Licitația dublă continuă este o licitație pentru unități standardizate de activ real sau financiar în care oferta de cumpărare și vânzare sunt efectuate și ajustate continuu. Astfel de licitații duble au loc pe bursele cele mai mari din lume, Chicago, New York și Tokio. S-a arătat că eficiența alocativă a acestui tip de licitație decurge din structura sa, independent de efecte de învățare. Mai precis, s-a arătat că, în acest caz, nivele de eficiență a pieței apropiate de 100% sunt atinse

chiar dacă agenții au o „inteligență zero”, deci ei acționează în mod aleatoriu, având în vedere doar restricția bugetară.

#### **5.7.4.2 Evoluția normelor de comportament**

Conceptul de „normă” este foarte important în MBA, deoarece pornind de la acestea, definim regulile după care agentul se comportă. Axelrod arată că „o normă” există într-un context social dat pentru a determina indivizii să acționeze în mod obișnuit într-un anumit fel și a-i pedepsi când nu acționează în acest fel.

Procesul de apariție, creștere și decădere al normelor este un proces evolutiv. Utilizând MBA, Axelrod a demonstrat că cooperarea reciprocă poate evolua chiar în cazul unor agenți egoiști care nu au relații stabile de cooperare. Cartea sa „Teoria cooperării” scrisă în 1997 a avut un impact major asupra cercetărilor în domeniul agenților.

Alte cercetări în acest domeniu, care au influențat profund pe economiști sunt cele ale lui Thomas Schilling. Utilizând exemple obișnuite, fără utilizarea unui aparat matematic sofisticat, el a arătat că comportamentul social poate apare ca o consecință a unor interacțiuni locale repetate între agenți care urmează reguli de comportament simple. De exemplu, el a arătat că segregarea rasială poate apărea ca urmare a unor reactivi în lanț locale dacă unii agenți preferă să aibă cel puțin jumătate dintre agenții învecinați de aceeași rasă cu ei.

#### **5.7.4.3 Modelarea „bottom-up” a proceselor economice de pe piață**

Proprietățile autoorganizatoare ale piețelor sunt recunoscute. MBA a studiat diferite tipuri de piețe: financiară, a electricității, a muncii; cu amănuntul; a resurselor naturale; e- comerțul ș.a. pentru a explica aceste mecanisme de piață.

Robert Marks este unul dintre primii cercetători din domeniu care a abordat aceste probleme. Mai precis, el a abordat o piață oligopolistă pentru a studia cum firmele vânzătoare (care sunt în număr mic pe astfel de piețe) pot concura cu succes. Modelul său utilizează un algoritm genetic pentru a reprezenta firma în procesul de învățare interactivă. Astfel, operații de mutații și recombinări au fost aplicate în mod repetat strategiilor de determinare a prețurilor utilizate de firme astfel ca să permită firmelor să experimenteze noi idei (mutație) și să se angajeze în imitația socială

(recombinare), obținând astfel strategii ce pot fi utilizate în mod profitabil de către firme.

Piețele financiare au constituit, de asemenea, un domeniu de mare interes al aplicațiilor MBA. Modelele piețelor financiare au oferit explicații plauzibile unor regularități observate pe astfel de piețe. Piața bursieră artificială construită de Arthur ș.a. la Institutul Santa Fe, Ca., USA a permis testarea unor modele cu agenți eterogeni care își actualizează prețurile individual și iau decizii pe baza unor sisteme de clasificare a volatilităților observate.

Le Baron a elaborat modele din ce în ce mai perfecționate ale regularităților observate pe piețe. El calibrează aceste modele în funcție de evoluția datelor macroeconomice și a datelor financiare. Toți investitorii utilizează performanțele obținute în trecut pentru a-și evalua performanțele actuale, dar investitorii respectivi se presupune că au memorie de diferite lungimi. Un algoritm genetic este utilizat pentru a reprezenta coevoluția unei colecții de reguli disponibile agenților.

Piețele valutare au fost de asemenea studiate intens de MBA. Izumi și Ueda propun o nouă metodă bazată pe agenți pentru a modela o astfel de piață. Agenții din model concurează unii cu alții pentru a dezvolta metode de previziune a schimbărilor în ratele de schimb valutar, având drept măsură a fitnessului profitabilitatea.

Chen și Yeh arată că învățarea socială sub forma unor strategii de imitare este importantă pe piețele bursiere. Ei construiesc un model de analiză a piețelor bursiere care include un mecanism suplimentar de învățare, numit „școală”. Aceasta constă dintr-un grup de agenți (de exemplu membrii unei facultăți) care concurează unul cu altul pentru a oferi publicului cel mai bun posibil model de previziune a evoluției cursului acțiunilor. Succesul (fitnessul) membrilor școlii este măsurat prin acuratețea programelor elaborate cu ajutorul modelelor propuse de ei, în timp ce succesul investitorilor de pe piața bursieră este măsurat de averea acumulată de aceștia. Fiecare investitor alege între a acționa pe piața bursieră sau a aștepta ca să testeze un model propus de școală și a alege unul care i se pare mai bun și a-l folosi în mod curent.

Membrii școlii și investitorii calculează în timp într-o buclă feedback continuă. Testele făcute pe 14000 de perioade au arătat că dacă la început investitorii care au

ales modelele școlii s-au bucurat de succes, ulterior ei nu au mai avut același succes pe măsură ce problemele școlii erau adoptate de tot mai mulți investitori.

#### **5.7.4.4 Formarea rețelelor economice**

Un important aspect al piețelor competitive imperfecte cu agenți interactivi este maniera în care agenții determină metodele de tranzacționare, ceea ce influențează forma rețelelor de tranzacții ce evoluează în timp. Un tip particular de rețea este așa numita „rețea mică”. Ea este o rețea conectată care are două proprietăți: (a) fiecare nod este legat de o mulțime relativ bine cunoscută de noduri învecinate; (b) prezența unor conexiuni directe între anumite noduri face ca lungimea medie a drumului minim dintre noduri să fie mică. Astfel de rețele au atât conectivitate locală cât și accesibilitate globală.

Astfel de rețele sunt foarte importante în schimburile comerciale între-țări sau inter agenți. Wilhite utilizează un MBA pentru a studia consecințele unor bariere comerciale în astfel de rețele. El analizează patru tipuri de rețele: (i) rețele comerciale complet conectate (fiecare agent poate face schimburi comerciale cu orice alt agent); (ii) rețele comerciale local deconectate constând din grupuri disjuncte de agenți; (iii) rețele comerciale local conectate, constând din grupuri de agenți aflați în jurul unui cerc cu un agent suprapus fiecărui punct de intersecție; și (iv) rețele comerciale mici construite din rețele comerciale local conectate ce permit realizarea unor legături directe cu unul până la cinci membrii ai unui grup comercial separat. Pentru fiecare tip de rețea, agenții înzestrați fiecare cu câte două bunuri, caută metode de schimb, negociază prețuri și apoi fac comerț cu acei agenți care oferă cel mai bun preț dar sunt și accesibili. Rezultatul simulărilor efectuate a fost că cea mai bună rețea comercială este a patra, cea mică, ce oferă cea mai mare eficiență fiecărui agent participant. El a descoperit că există anumite stimulente la nivel micro pentru formarea rețelelor comerciale mici, deoarece comercianții care utilizează acest tip de rețea tind să facă mai bine comerț decât ceilalți.

O extensie naturală a acestor lucrări este cea privind modul în care aceste forme inițiale evoluează. Albin și Foley, Kirman și Tesfatsion ș.a. au demonstrat emergența unei rețele comerciale formată dintr-o mulțime de cumpărători și vânzători ce determină partenerii lor comerciali în mod adaptiv, pe baza experienței trecute cu acești parteneri.

Mai recent, cercetările în domeniu au fost orientate către tipuri de piețe specifice. Tesfatsion a abordat piața forței de muncă. Este studiată, în acest context, relația dintre structura de piață, interacțiunea angajat-angajator, comportamentul legat de alegerea locului de muncă și rezultatele asupra bunăstării. Muncitorii și angajatorii formează între ei relații de interacțiune modelate cu jocuri de tipul Dilema Prizonierului și elaborează strategii de-a lungul timpului pe baza câștigurilor asigurate de aceste strategii în interacțiunile anterioare. Simularea acestui model a urmărit două lucruri: concentrarea slujbelor (număr de muncitori raportați la număr de angajatori) și capacitatea slujbelor (total slujbe potențiale raportate la totalul ofertei de muncă). A rezultat că dacă capacitatea slujbelor este constantă atunci schimbările în concentrarea slujbelor au efecte semnificative asupra nivelelor de putere pe piață atinse. Un alt rezultat a fost acela că efectele de interacțiune sunt puternice, ele determinând adaptarea comportamentelor celor doi agenți de pe piață, muncitori și angajatori.

#### **5.7.4.5 Modelarea organizațiilor**

În cadrul unei economii, un grup de oameni este considerat o organizație dacă grupul are un obiectiv sau un criteriu de performanță care transcede obiectivelor individuale din cadrul grupului. Pionierul studierii organizațiilor ca sisteme, Norbert Simon, laureat al Premiului Nobel, arată că organizațiile sunt capabile de o inteligență colectivă, deci ele se comportă ca un organism unitar ce se adaptează la mediu, suferă mutații, imită alte organizații, etc. pentru a-și asigura supraviețuirea. Una dintre cale mai flexibile organizații este birocrăția.

Studiile lui Carley și ale grupului său de la Carnegie Mellon University au arătat că organizațiile pot fi modelate ca sisteme – bazate – pe – agenți și au dus chiar apariția unui domeniu similar economiei – bazate – pe – agenți în cadrul teoriei organizației.

Studiul firmelor ca organizații s-au orientat în două direcții principale: perfecționarea organizării interne a firmei și organizațiile realizate de firme la nivelul piețelor.

Dawid ș.a. a considerat o mulțime de firme din cadrul unei industrii. La începutul fiecărei perioade, fiecare firmă alege dacă să producă un produs existent pe piață sau să introducă un nou produs. Cererea pentru fiecare tip de produs dispare după o



anumită perioadă de timp determinată stohastic, deci fiecare firmă trebuie să se angajeze într-o activitate inovativă pentru a-și susține profitabilitatea.

Firmele diferă între ele în privința abilității de a imita produse existente și în abilitatea de a proiecta un nou produs datorită efectelor aleatoare și a efectelor „learning by doing” care schimbă structura organizațională a fiecărei firme. Fiecare firmă are o regulă de inovare determinată de decizia de a inova sau nu și firmele coevoluează (schimbă) aceste reguli în timp pe baza profitabilității anticipate.

Autorii au făcut experimente cu modelul obținut pentru a vedea cum, pentru a atinge o profitabilitate optimală, regula de inovare a unei firme ar trebui adaptată atât structurii industriei ca un tot cât și structurii organizaționale a unei firme individuale.

#### **5.7.4.6 Proiectarea agenților computaționali pentru piețe automatizate**

Dezvoltarea piețelor automatizate (bursa automată, e-comerț, ș.a.) a dus la creșterea preocupărilor pentru elaborarea unor agenți specializați în această direcție.

De exemplu, contractele utilizate pe piețe automatizate sunt contracte licitate între agenți. Acești agenți sunt astfel proiectați încât să desfășoare un proces de negociere conform unei anumite metode de licitare. Agenții negociatori sunt penalizați în raport cu anumite obiective pe care nu le ating în cursul negocierii și au rutine de învățare astfel încât ei devin tot mai performanți pe măsură ce participă la mai multe procese de negociere. Dezvoltarea explozivă a e-comerțului în ultima perioadă a făcut ca preocuparea pentru agenți mobili negociatori să devină prioritară. Agenții mobili se „mișcă” pe INTERNET căutând produsele dorite și negociază peer-to-peer sau multiplu pentru obținerea acestora.

Se prevede că, în curând, tot mai multe gospodării își vor face achizițiile de produse în acest fel.

#### **5.7.4.7 Experimente paralele cu agenți reali și virtuali**

Experimentele economice cu subiecți umani sunt destul de dificile și costisitoare. Totuși, comportamentul uman este foarte important în anumite situații.

Având în vedere posibilul rol sinergetic al experimentelor paralele cu subiecți umani și agenți virtuali, comportamentul uman poate fi utilizat ca un ghid pentru procesele încorporate agenților virtuali. Invers, comportamentul agenților virtuali poate fi utilizat pentru a formula ipoteze privind cauzele de bază care determină anumite comportamente observate la subiecți umani. În cadrul economiei experimente de acest fel au făcut Miller și Andreoni, Arifovic, Arthur ș.a.

Marimon ș.a.și Duffy au efectuat, astfel, un experiment paralel de acest fel pentru a examina emergența posibilă a unui mediu de schimb general acceptat (de exemplu banii). Agenții de tip  $i$  doresc să consume bunul  $i$  dar produc bunul  $i+1$ . În fiecare perioadă, agenții sunt împerecheați în mod aleatoriu și trebuie să decidă dacă schimbă bunurile pe care le produc. Un agent poate accepta un bun fie pentru că îl dorește, fie pentru a-l stoca pentru a-l utiliza mai târziu ca mijloc de schimb. Bunurile au costuri de stocare diferite. Rezultatul urmărit este dacă agenții converg către a accepta un anumit bun ca monedă pe care ei sunt de acord să o folosească în schimburile viitoare și nu să o consume.

Regulile comportamentale utilizate în proiectarea agenților virtuali din acest experiment au fost cele pe care le folosesc oamenii în schimburile lor comerciale. Un agent virtual va selecta adoptiv între regulile sale admisibile utilizând un algoritm de învățare. Duffy arată că, treptat, agenții virtuali capătă caracteristicile de bază ale agenților umani.

#### **5.7.4.8 Construirea de laboratoare de studiu cu agenți computaționali**

Ultima direcție de aplicare este cea a utilizării agenților în laborator pentru testarea teoriilor economice. Robert Lucas Jr., laureat al Premiului Nobel pentru economie și unul dintre cei mai marcanți economiști ai zilelor noastre, scria: „(O teorie) nu este o colecție de afirmații despre comportamentul economiei actuale ci mai degrabă o mulțime explicită de instrucțiuni pentru construirea unui sistem paralel sau analog – o economie mecanică, imitativă. Sarcina noastră este să scriem un program care va accepta regulile politicii economice specifice ca „intrare” și va genera ca „ieșiri” statistici descriind caracteristicile de funcționare ale seriilor dinamice pe care le dorim, care sunt permise de rezultatele obținute din aceste politici”.

Realizarea de laboratoare computaționale cu agenți permite construirea în cadrul acestora a unor economii virtuale, piețe virtuale (artificiale), întreprinderi virtuale, gospodării virtuale ș.a. pe care se pot testa diferite ipoteze și situații pe care le întâlnim în economiile reale. În astfel de laboratoare, prin interfețe grafice se pot face simulări și testa sensibilitatea sistemelor la schimbările de parametri, se pot elabora și încerca sisteme care ulterior vor fi puse în practică.

De exemplu, Mc Fadzean ș.a. dezvoltă un astfel de laborator computațional numit „*Trade Network Game Lab*”, care cuprinde cumpărători, vânzători și dealeri ce încearcă să-și găsească parteneri comerciali preferați, sunt angajați în schimburi comerciale riscante, modelate ca jocuri necooperative și își dezvoltă strategii comerciale în decursul timpului. Evoluția rețelei comerciale este vizualizată dinamic cu ajutorul animației în timp real și date privind performanțele fiecărui agent sunt oferite în timp real.

**Aplicațiile economice ale MBA sunt infinite și ele ne vor ajuta să cunoaștem și să reglăm mai bine procesele economice reale. Pe măsura dezvoltării acestui nou domeniu de cercetare, el va oferi mult mai multe posibilități economiștilor ciberneticieni de a-și pune în valoare cunoștințele și abilitățile de a construi modele, de a le simula și a le implementa în diferite contexte pe care le oferă economia tot mai dinamică și complexă a viitorului.**