

Corso di Laurea in Ingegneria e Scienze Informatiche

# *slime-mold* Aggregation?

Tesi di laurea in:  
PROGRAMMAZIONE AD OGGETTI

*Relatore*

**Prof. Mirko Viroli**

*Candidato*

**Lorenzo Tosi**

*Correlatore*

**Dott. Gianluca Aguzzi**

---

---

# Abstract

Max 2000 characters, strict. contesto + problema obiettivi e metodi contributi  
risultati conclusioni

---

---

*Optional. Max a few lines.*

---

---

# Acknowledgements

Optional. Max 1 page.

---



---

# Indice

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abstract</b>                             | <b>iii</b> |
| <b>1 Introduzione</b>                       | <b>1</b>   |
| <b>2 Contesto</b>                           | <b>5</b>   |
| 2.1 Alchemist . . . . .                     | 5          |
| 2.1.1 Il meta-modello . . . . .             | 6          |
| 2.2 Simulazione di riferimento . . . . .    | 9          |
| 2.3 Overview su <i>slime-mold</i> . . . . . | 10         |
| <b>3 Analisi</b>                            | <b>11</b>  |
| 3.1 Requisiti . . . . .                     | 11         |
| <b>4 Design</b>                             | <b>13</b>  |
| 4.1 Layer . . . . .                         | 13         |
| 4.1.1 Le posizioni . . . . .                | 14         |
| 4.2 Le entità . . . . .                     | 15         |
| 4.2.1 Direzioni . . . . .                   | 16         |
| 4.3 Il movimento . . . . .                  | 17         |
| 4.4 Reazioni globali . . . . .              | 17         |
| 4.4.1 Rilascio . . . . .                    | 17         |
| 4.4.2 Evaporazione . . . . .                | 17         |
| 4.4.3 Diffusione . . . . .                  | 18         |
| <b>5 Implementazione</b>                    | <b>19</b>  |
| 5.1 Struttura del progetto . . . . .        | 19         |
| 5.2 Layer . . . . .                         | 19         |
| <b>6 Evaluation</b>                         | <b>21</b>  |
| <b>7 Conclusioni e ringraziamenti</b>       | <b>23</b>  |

## INDICE

---

|              |    |
|--------------|----|
|              | 25 |
| Bibliografia | 25 |

---

# Elenco delle figure

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Rappresentazione di una reazione in Alchemist . . . . .      | 7  |
| 2.2 | Il modello di Alchemist . . . . .                            | 8  |
| 2.3 | Il mondo suddiviso in patch . . . . .                        | 9  |
| 4.1 | Rappresentazione grafica dove ogni punto è un nodo . . . . . | 15 |
| 4.2 | Diffusione grafica del feromone . . . . .                    | 18 |
| 5.1 | Struttura PheromoneLayer . . . . .                           | 20 |



---

# List of Listings

## LIST OF LISTINGS

---

---

# Capitolo 1

## Introduzione

Nel vasto campo della ricerca scientifica, negli ultimi anni i comportamenti complessi emergenti sono oggetto di crescente interesse e studio. Questi fenomeni rappresentano il manifestarsi di comportamenti collettivi che sorgono dall'interazione dinamica di molteplici componenti di un sistema, difficilmente prevedibili se si considerano solamente le leggi che regolano il comportamento del singolo.

In natura questa caratteristica comportamentale è osservabile in un grandissimo numero di ambiti: si pensi, ad esempio, al regno animale, dove è possibile ritrovare speciali “forme” e comportamenti di stormi di uccelli oppure di banchi di pesci; lo stesso accade agli esseri umani in contesti come il traffico cittadino, il mercato della borsa valori o il gioco del poker.

Un esempio significativo di comportamento emergente è quello osservabile in biologia in una colonia di formiche. Nonostante le formiche, se considerate come esseri “singoli” seguano regole di comportamento molto semplici, l'interazione tra di esse dà origine ad una “comunità” omogenea e, seppure sia assente una struttura gerarchica, sono presenti una serie di modelli condivisi complessi per quanto riguarda la ricerca del cibo, la costruzione di nidi e la difesa del territorio. Ogni formica reagisce a degli stimoli, ovvero tracce chimiche provenienti da altre formiche e, al contempo, essa stessa lascia segnali agli altri membri della comunità: si crea così una reazione a catena che coinvolge tutte le formiche della colonia, che tendono a imitare il comportamento delle altre. Questo fenomeno è simile ad altre strutture emergenti presenti in natura e riscontrate sia negli “insetti sociali” (e.g. termiti,

---

vespe, api, . . . ), ovvero insetti che formano colonie con mansioni diversificate, sia, in generale, in animali che vivono in gruppo (come pesci, tartarughe, mandrie di mammiferi, . . . ). Questa tipologia di eventi, generalmente, si basa principalmente su feromoni o odori chimici.

Nel contesto scientifico, simulare in un ambiente protetto questo tipo di fenomeni è estremamente importante per diversi motivi:

- Comprimerne la complessità: i fenomeni complessi, come detto sopra, sono caratterizzati da interazioni dinamiche tra i componenti del sistema di riferimento. La simulazione diventa una risorsa chiave per esplorare, studiare e comprendere moltissimi aspetti di queste dinamiche e permette di osservare le interazioni dei diversi elementi in infiniti modi.
- Prevedere il comportamento del sistema: poiché questi fenomeni sono altamente aleatori, la simulazione può essere eseguita per cercare di prevedere e avere maggior consapevolezza del comportamento futuro di un sistema emergente in modo tale da poter prendere delle decisioni informate.

L'obiettivo di questa tesi è esplorare il fenomeno dell'aggregazione di questi organismi, sviluppando un sistema software che si interfacci ed utilizzi a pieno tutti gli elementi chiave del simulatore Alchemist. Quest'ultimo, infatti, permette di riprodurre eventi appartenenti a domini estremamente differenti tra loro, come simulazioni chimiche o il comportamento di pedoni in diverse situazioni.



---

La tesi presenta la seguente struttura:

- **Contesto**
- **Analisi**
- **Design**
- **Implementazione**
- **Evaluation**
- **Conclusioni**

---

---

# Capitolo 2

## Contesto

### 2.1 Alchemist

Alchemist [PMV13] è un simulatore DES (Discrete Event System) che estende il modello computazionale base delle reazioni chimiche in modo tale da favorirne l'applicabilità a situazioni complesse, pur mantenendo elevate prestazioni. In particolare, Alchemist si fonda su una versione ottimizzata dell'algoritmo di Gillespie[Gil77] chiamata Next Reaction Method[GB00], esteso in modo tale da poter lavorare con un ambiente agile e dinamico dove è possibile aggiungere o rimuovere reazioni, dati e connessioni topologiche. Le applicazioni già implementate sono varie e comprendono, ad esempio, simulazioni di reazioni biochimiche e movimento di pedoni. Il punto di forza del sistema è il meta-modello estremamente astratto, la cui effettiva realizzazione è demandata alle “incarnazioni”, le quali rappresentano l'implementazione vera e propria delle diverse categorie di simulazioni eseguibili all'interno. Attualmente troviamo 4 incarnazioni:

- Protelis
- SAPERE
- Biochemistry
- Scafì

### 2.1.1 Il meta-modello

Come accennato in precedenza, il meta-modello è uno dei punti di forza maggiori di Alchemist. Per meta-modello si intende un tipo di paradigma che descrive la struttura, le regole e le relazioni che i modelli di dati devono seguire all'interno di un sistema. Rappresenta in modo astratto i concetti e le relazioni all'interno del dominio di interesse e stabilisce i vincoli e le convenzioni che tutti i modelli devono usare. Dunque, tutte le incarnazioni sviluppate presentano le stesse entità "base". Poichè Alchemist è sviluppato partendo da un'ispirazione orientata alla chimica/biochimica, le entità presentano nomi riconducibili a quei mondi. Infatti troviamo:

- **Molecole** (*molecule*): il nome di un dato, concettualmente interpretabile come il nome di una variabile.
- **Concentrazioni** (*concentration*): il valore associato alla molecola.
- **Nodi** (*node*): il "contenitore" di molecole e reazioni.
- **Ambiente** (*environment*): l'astrazione dello spazio; è un "contenitore" di nodi e svolge i seguenti compiti:
  - Restituire la posizione dei nodi.
  - Restituire la distanza tra due nodi.
  - Supportare il movimento dei nodi, se presente.
- **Vicinato** (*neighborhood*): un entità composta da un nodo centrale e un insieme di nodi vicini.
- **Regola di collegamento** (*linking rule*): una funzione relativa allo stato corrente dell'ambiente che associa ad ogni nodo un vicinato.
- **Reazione** (*reaction*): un qualsiasi evento che provoca un cambiamento dello stato dell'ambiente. È definita da una lista di condizioni, una o più lista di azioni e una distribuzione temporale. La frequenza con la quale avviene una reazione dipende da:

- Un parametro statico “rate”.
  - Il valore di ogni condizione.
  - Una “rate equation”, ovvero una equazione che combina il parametro statico (rate) con i valori delle condizioni, restituendo un “instantaneous rate”.
  - Una distribuzione temporale.
- **Condizione** (*condition*): una funzione che, dato lo stato attuale dell’ambiente (environment), restituisce un booleano ed un numero. Se il booleano è falso la reazione non può avvenire. In caso contrario, invece, avviene. Il numero può invece influenzare la velocità della reazione a seconda della reazione e della distribuzione temporale.
  - **Azione** (*action*): un cambiamento nell’ambiente.

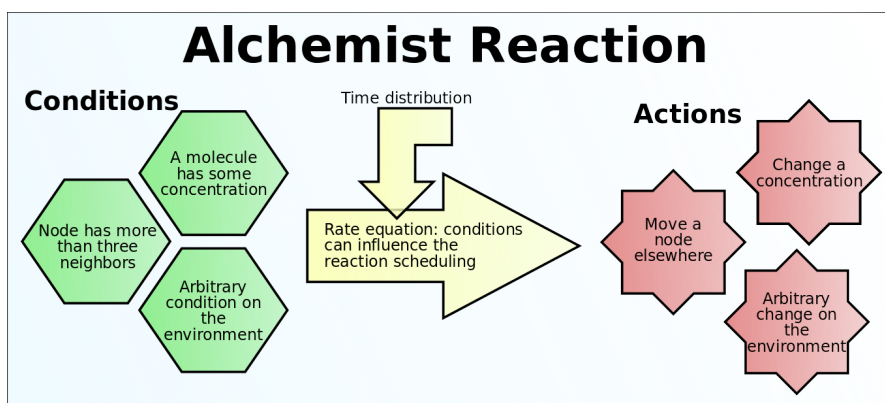


Figura 2.1: Rappresentazione di una reazione in Alchemist

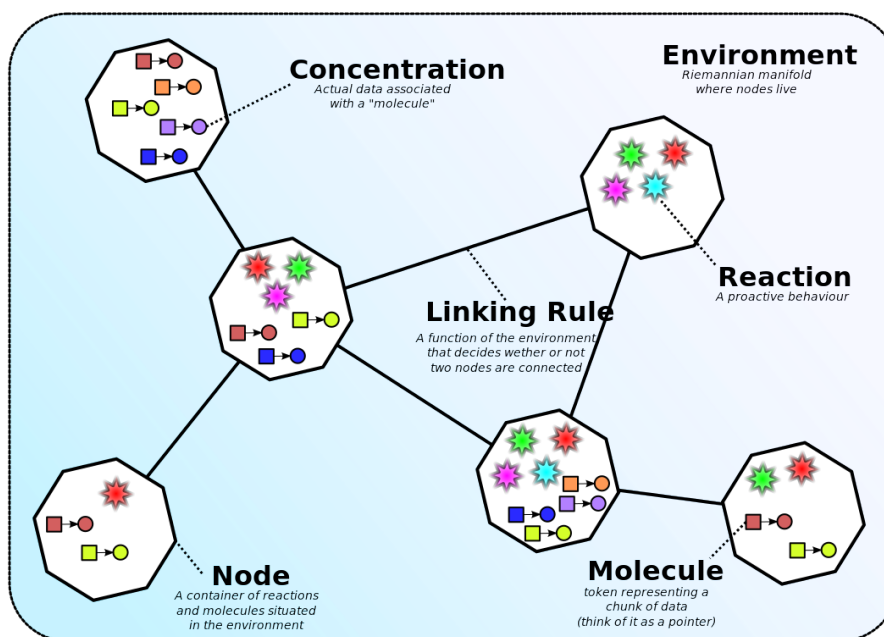


Figura 2.2: Il modello di Alchemist

## 2.2 Simulazione di riferimento

La simulazione utilizzata come riferimento per questo progetto di tesi è presente nella libreria di modelli di NetLogo [Wil97]. Il modello di riferimento è “Slime” [Wil97] e per simulare l’aggregazione di tanti singoli organismi in un gruppo si fa riferimento al comportamento delle tartarughe. Quest’ultime si muovono in uno spazio a griglia e durante il loro movimento rilasciano una particolare molecola chiamata “feromone” che si deposita in una posizione precisa. L’intero mondo è quindi suddiviso in tantissime “micro-aree” chiamate *patch*. La tartaruga per muoversi “annusa” davanti a se, ovvero percepisce se nelle *patch* vicine è presente del “feromone”. Se il valore di quest’ultimo è abbastanza alto, la tartaruga si sposterà nella posizione “annusata”, mentre, in caso contrario la tartaruga si muoverà in modo randomico nello spazio circostante. Durante tutto ciò, le *patches* diffonderanno del “feromone” alle varie posizioni vicine e, con il passare del tempo, il “feromone” tende ad evaporare (ovvero sparire) dalla griglia.

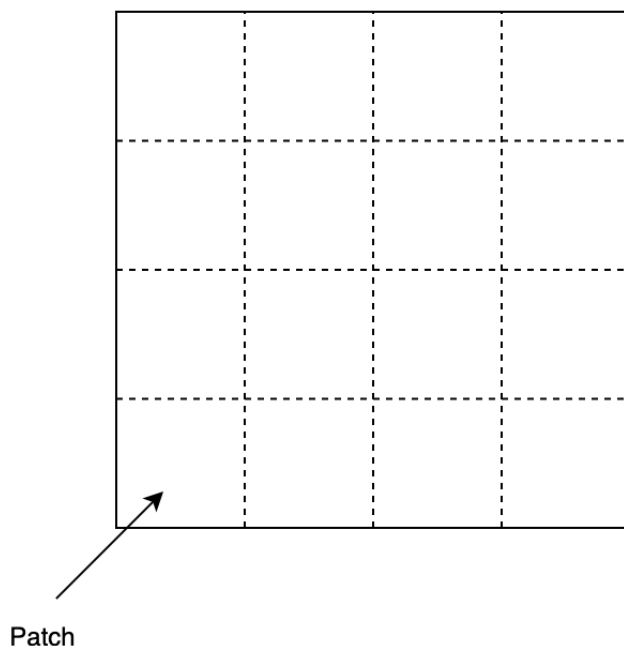


Figura 2.3: Il mondo suddiviso in patch

## 2.3 Overview su *slime-mold*

Nel contesto della presente tesi, sulla base della simulazione di riferimento 2.2 e i comportamenti osservati in essa, si è scelto di indagare un altro fenomeno dalle caratteristiche estremamente simili: la muffa mucillaginosa. In natura, l'aggregazione delle cellule di muffa mucillaginosa (detti anche funghi mucilluginosi o, in inglese, *slime-mold*) rappresenta comportamento in cui entità individuali interagiscono tra di loro per formare strutture complesse e funzionali. Lo *slime-mold* è un organismo unicellulare ma, talvolta, può trovarsi anche ad agire come un'entità multicellulare. Pur non essendo un fungo è spesso classificato nella stessa categoria per via delle sue caratteristiche affini a quelle di questi organismi. La particolarità principale della muffa mucillaginosa è che può comportarsi come un organismo unicellulare o multicellulare a seconda delle diverse condizioni ambientali in cui si trova. L'habitat principale di questi organismi è il terreno umido, dove di solito si nutrono di foglie morte o di tronchi di alberi in putrefazione. Quando trova una fonte di cibo, lo *slime-mold* si aggrega, formando una massa citoplasmatica detta "plasmodio", composta da un grande numero di cellule. Inoltre, questa massa può muoversi, "navigando" attraverso il terreno in cerca di cibo. Infatti, se le risorse alimentari scarseggiano o l'ambiente diventa meno ospitale, lo *slime-mold* può assumere forme diverse: può formare spore, resistenti per sopravvivere in condizioni avverse, oppure aggregarsi insieme ad altri individui simili per formare una struttura multicellulare che si comporta come un'unica entità, condividendone di conseguenza risorse e compiti.



---

# Capitolo 3

## Analisi

### 3.1 Requisiti

Analizzando il modello presente su NetLogo[Wil97], possiamo individuare le caratteristiche e i requisiti che la simulazione dovrà avere:

- Entità “vive”, che si muovono e depositino il feromone.
- Un ambiente che gestisca la presenza del feromone; in particolare dovrà:
  - Permettere il depositarsi della sostanza.
  - Diffondere la sostanza.
  - Evaporare la sostanza.
- Le entità dovranno avere un concetto di direzione.
- Il movimento deve seguire delle regole ben precise.



---

# Capitolo 4

## Design

### 4.1 Layer

Si pensi alla simulazione come se fosse un micro-mondo, una “città” complessa e ricca di informazioni. È di interesse capire il livello di temperatura oppure di inquinamento nelle varie aree cittadine, dati invisibili all’occhio umano ma comunque presenti nell’ambiente e percepibili da chi lo abita. Si ha bisogno di inserire nell’ambiente degli “strati” invisibili che hanno il compito di raccogliere queste informazioni. È possibile, in Alchemist, definire questi “strati” di dati, chiamati Layer.

Nel contesto di questo progetto è stato necessario l’utilizzo di un Layer che avesse la funzione di “rete di raccolta” dei feromoni che, nella simulazione di riferimento 2.2, venivano rilasciati dalle tartarughe nelle varie posizioni dello spazio. In questo caso il layer ha la stessa dimensione dell’ambiente, in modo tale da poter suddividere l’intera area nelle varie *patch* di cui si è discusso sopra. Il layer, chiamato *PheromoneLayer* ha come compiti:

- Implementare una struttura dati per tenere traccia della quantità di feromone presente in ogni posizione.
- Offrire un modo per aggiornare i valori del feromone.
- Condividere con le altre classi la struttura dati contenente la quantità di feromone per una specifica posizione.

- Lasciare la possibilità all'utente di decidere le dimensioni dell'area totale di riferimento e di ogni *patch*.

#### 4.1.1 Le posizioni

Un aspetto di particolare rilevanza è stato il processo decisionale relativo alla gestione delle posizioni collegate al deposito del feromone. Nella simulazione di riferimento 2.2 si trova uno spazio a griglia, dove l'area totale è suddivisa in “micro-aree” chiamate *patch*. In Alchemist, tuttavia, non è presente il concetto di “area” o “spazio”, necessario per individuare una *patch*, in quanto le posizioni sono puntiformi e non necessariamente hanno coordinate intere. Il layer sviluppato ricalca l'area (rettangolare o quadrata) del sistema iniziale, implementando anche un sistema di conversione che trasforma la posizione puntiforme in modo tale da emulare la presenza di una “area” bidimensionale, a forma di quadrato, che corrisponde alla *patch*. Entrambe le misure, ovvero quella della griglia e quella della *patch* sono dinamiche e possono essere modificate dall'utente.

## 4.2 Le entità

Una volta definito l'ambiente di simulazione è importante determinare la struttura e la logica delle entità che lo abiteranno. Nella simulazione di riferimento 2.2 è possibile individuare come abitanti le tartarughe che, muovendosi, rilasciano una traccia chimica chiamata “feromone”. Dunque, concettualmente, la tartaruga è un “contenitore” infinito di feromoni e, muovendosi, ne rilascia una parte nell'ambiente. Alchemist possiede il concetto di nodo 2.1.1 che, per definizione, è un contenitore di molecole che vive in un ambiente. È stato quindi necessario solamente definire la tipologia di molecola appartenente al nodo per tradurre questo aspetto della simulazione (ma anche del mondo reale) in Alchemist.

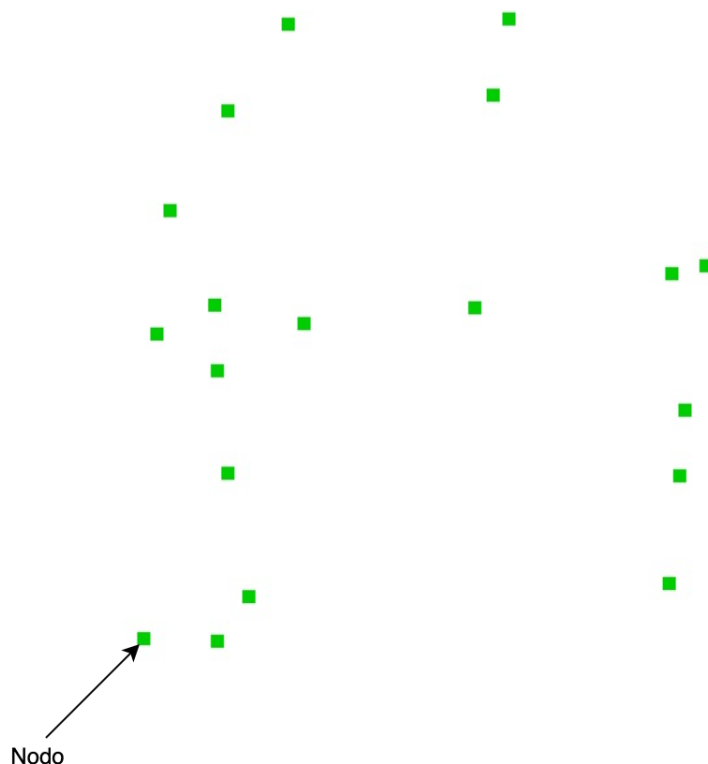


Figura 4.1: Rappresentazione grafica dove ogni punto è un nodo

### 4.2.1 Direzioni

Un aspetto importante da considerare è la direzione del movimento delle tartarughe. Nella simulazione di riferimento 2.2 le tartarughe si muovono e seguono un percorso che deriva dalla loro direzione. Essendo questo un attributo proprio delle tartarughe, è stato necessario sviluppare una soluzione che permettesse di inizializzare i nodi della simulazione con delle direzioni facilmente accessibili e modificabili in base alle esigenze.

Alchemist rende possibile la definizione di attributi personalizzati per i nodi, chiamati *Node Property*. Il corretto utilizzo di questa funzionalità ha permesso di definire un attributo di tipo *Direction* per ogni nodo che rappresentasse la direzione in modo tale da poter simulare in modo realistico questo aspetto della simulazione.

## 4.3 Il movimento

## 4.4 Reazioni globali

La Reazione Globale o *Global Reaction* rappresenta uno strumento fondamentale per descrivere le interazioni e i processi che avvengono all'interno di un sistema simulato. Possono essere utilizzate per modellare una vasta gamma di fenomeni, dalla diffusione chimica alla dinamica dei sistemi biologici. Contrariamente alle reazioni locali, le *Global Reaction* hanno effetti concreti sull'intero contesto in esame. Realizzare una modellazione precisa e realistica di questi fenomeni può essere di grande interesse per indagare tutti i risultati possibili.. Nell'ambito di questa tesi si individuano 3 tipi di reazioni, tutte collegate ai feromoni:

- Rilascio (*Deposit*)
- Evaporazione (*Evaporation*)
- Diffusione (*Diffusion*)

### 4.4.1 Rilascio

Questa reazione coinvolge in modo diretto il nodo, l'ambiente e il layer. Durante ogni movimento il nodo rilascia nell'ambiente una certa quantità di feromone in una posizione discreta. Il layer si occupa della raccolta del feromone, posizionandolo in una *patch* ed incrementando il valore della sostanza collegato ad essa.

### 4.4.2 Evaporazione

L'evaporazione riguarda solamente il layer. In natura, con il passare del tempo, la traccia chimica diventa sempre più lieve fino a sparire completamente. Questa reazione si occupa esattamente di questo: ogni *patch* caratterizzata dalla presenza di un livello di feromone positivo viene individuata e il valore collegato ad essa viene decrementato in modo graduale.

### 4.4.3 Diffusione

La diffusione del feromone è un evento che caratterizza in modo diretto il layer e i nodi. Ogni volta che il nodo rilascia il feromone e questo si deposita in una *patch*, il layer diffonde nelle *patches* vicine delle tracce dello stesso.

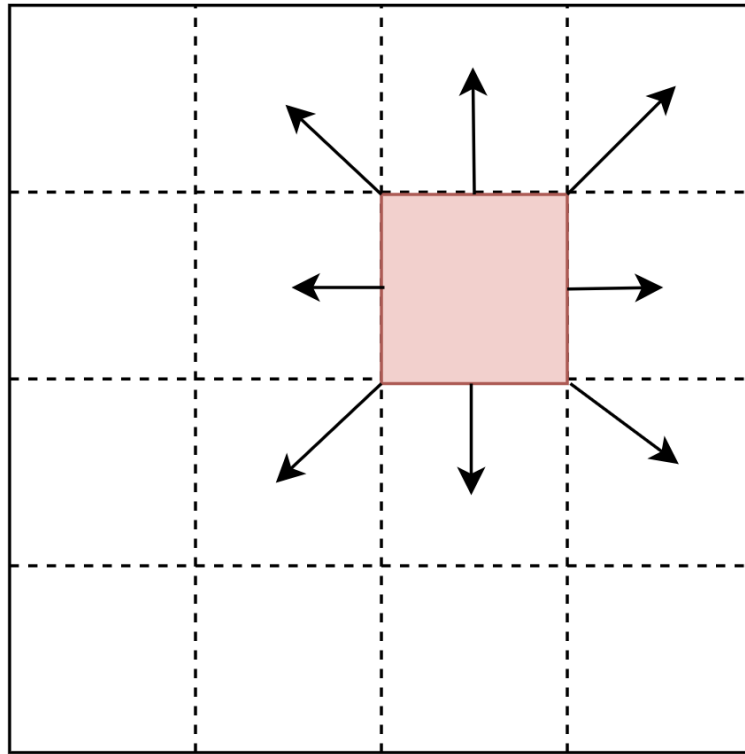


Figura 4.2: Diffusione grafica del feromone



---

# Capitolo 5

## Implementazione

### 5.1 Struttura del progetto

La struttura del progetto, organizzato in package, è la seguente:

- **Actions**: le azioni della simulazione.
- **GlobalActions**: le azioni globali della simulazione.
- **Layer**: il layer personalizzato della simulazione.
- **NodeProperty**: le proprietà dei nodi della simulazione.

### 5.2 Layer

Il *PheromoneLayer*, layer personalizzato della simulazione, è stato implementato come una interfaccia che estende **Layer**, interfaccia propria di Alchemist. I metodi che sono definiti sono:

- `void evaporate(P position, Double value)`: metodo che permette di far evaporare il feromone. Richiede in input la posizione e il valore del feromone.
- `void deposit(P position, Double value)`: metodo che permette di far diffondere il feromone. Richiede in input la posizione e il valore del feromone.

- Rectangle `getLayerBounds()`: metodo che restituisce un oggetto di tipo Rectangle.

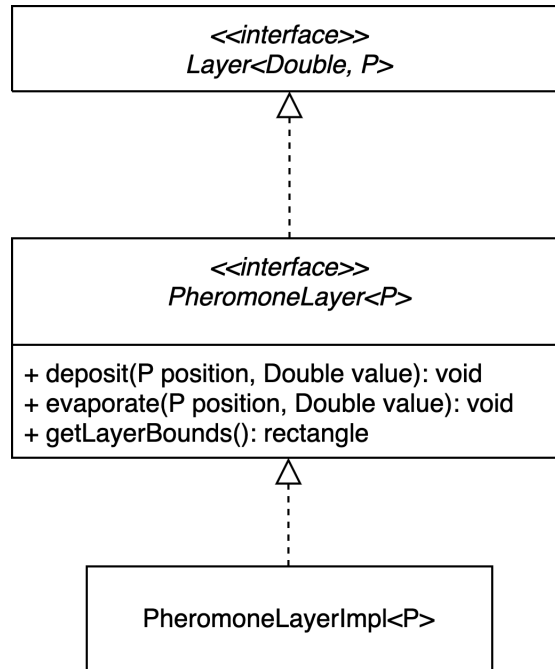


Figura 5.1: Struttura PheromoneLayer

---

# Capitolo 6

## Evaluation

---

---

## Capitolo 7

# Conclusioni e ringraziamenti

---

---

# Bibliografia

- [GB00] MA Gibson and J Bruck. Efficient exact stochastic simulation of chemical systems with many species and many channels. *Journal of Physical Chemistry A*, 104(9):1876–1889, 2000.
- [Gil77] DT Gillespie. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. *The Journal of Physical Chemistry*, 81(25):2340–2361, 1977.
- [PMV13] D Pianini, S Montagna, and M Viroli. Chemical-oriented simulation of computational systems with alchemist. *Journal of Simulation*, 7(3):202–215, August 2013.
- [Wil97] Uri Wilensky. Netlogo slime model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Slime>, 1997.
- [Wil99] Uri Wilensky. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, 1999.