- Présentation du 06/04/2010 -

Cours IFT 6571 :
Métaheuristiques en Optimisation

Les Systèmes Immunitaires Artificiels

Arbi BOUCHOUCHA

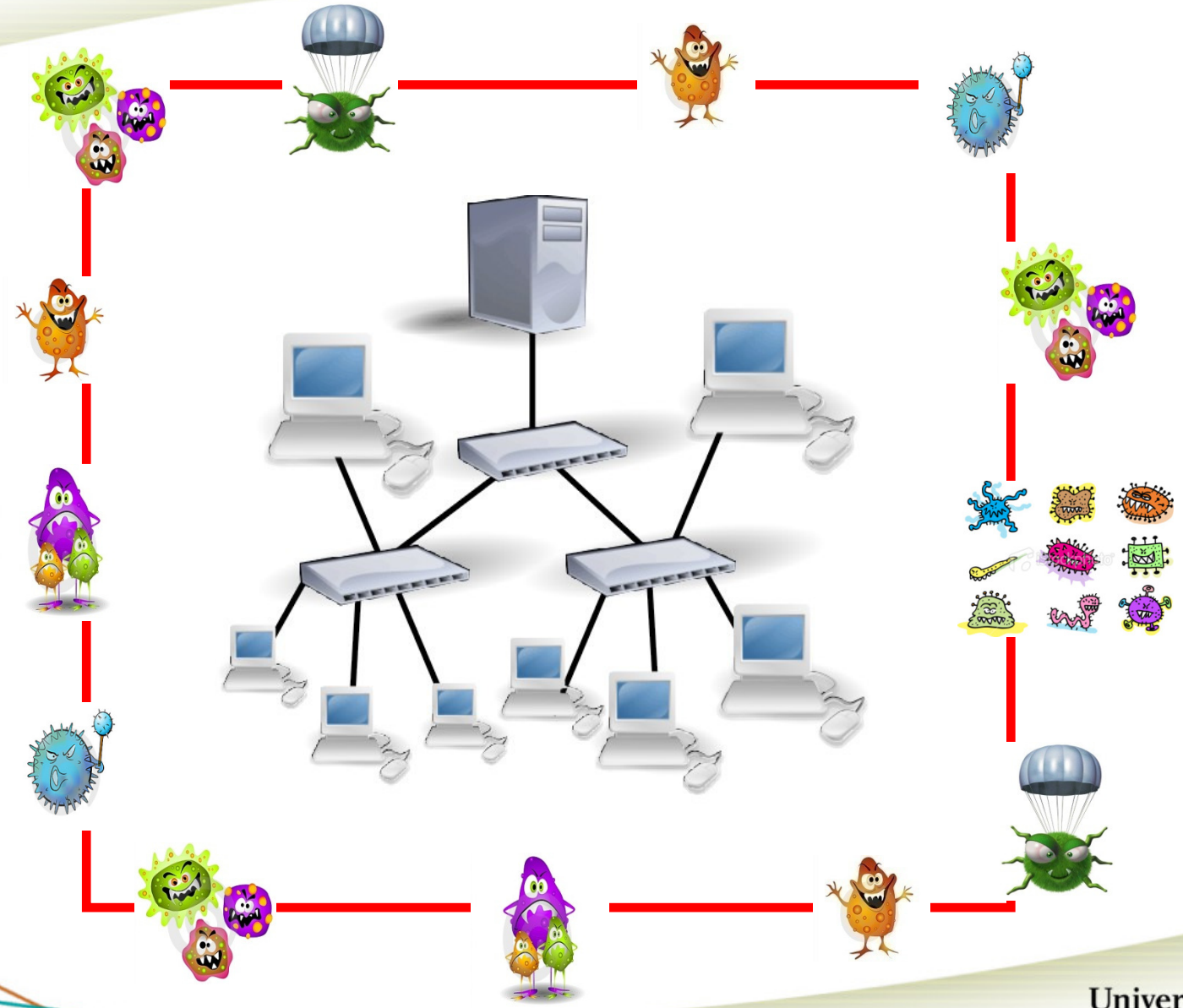
Responsable du Cours : Pr. Jean-Yves POTVIN

DIRO,
Université de Montréal

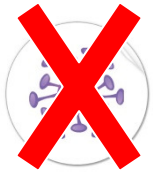
- Hiver 2010 -

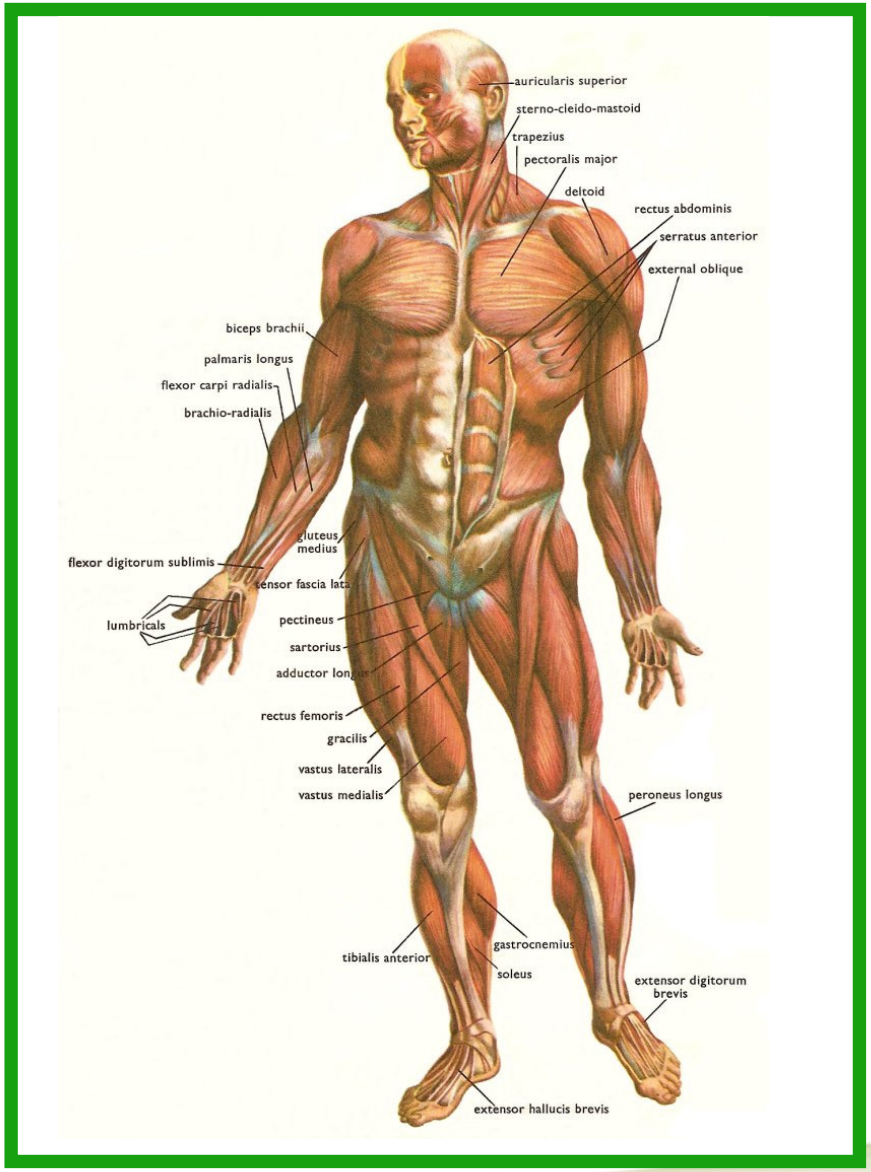
Université de Montréal

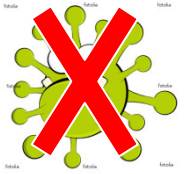
AVANT PROPOS



AVANT PROPOS







Université de Montréal

INTRODUCTION

- La nature a constitué un moyen d'inspiration pour plusieurs domaines en informatique (Robotique, détection d'anomalies, optimisation, …)

- Plusieurs algorithmes ont été inspirés du domaine biologique (algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires, réseaux de neurones, …)

- Le système immunitaire fait preuve de *robustesse* (tolérance aux fautes, capacité d'adaptation, …)

➔ **Pourquoi donc ne pas exploiter ces propriétés en Informatique ??**

“ Artificial Immune Systems ”

«Julie Greensmith», «Amanda Whitbrook» and «Uwe Aickelin»

School of Computer Science, University of Nottingham, UK

PLAN

- Système Immunitaire (SI)
- SIA : Approches Proposées
- Exemples de SIA
- Conclusion et Perspectives

DÉFINITION

- Collection « d'éléments » de **reconnaissance** et de **défense** au sein d'un organisme

- Multitude d'**organes**, **cellules** (molécules) qui interagissent ensembles pour **détecter** et **éliminer** des agents **pathogènes**

- Système Immunitaire (SI) → **reconnaît**, **attaque**, **détruit** et **enregistre** tout type de pathogène qui entre dans le corps

- **Discriminer** entre le « **soi** » et le « **non-soi** »

→ Maintenir un **équilibre** biologique

MÉCANISMES DE DÉFENSE

- Deux mécanismes (systèmes) :

✓ Mécanismes **non-spécifiques** (ou **Système inné**)
→ Les barrières physiques (la peau), muqueuses, acidité gastrique, larmes, …

✓ Mécanismes **spécifiques** (ou **Système adaptatif**)
→ Reconnaissance du soi et du non-soi (actions dirigées par les *lymphocytes*)

QUELQUES DÉFINITIONS

- Pathogène (Ennemi)

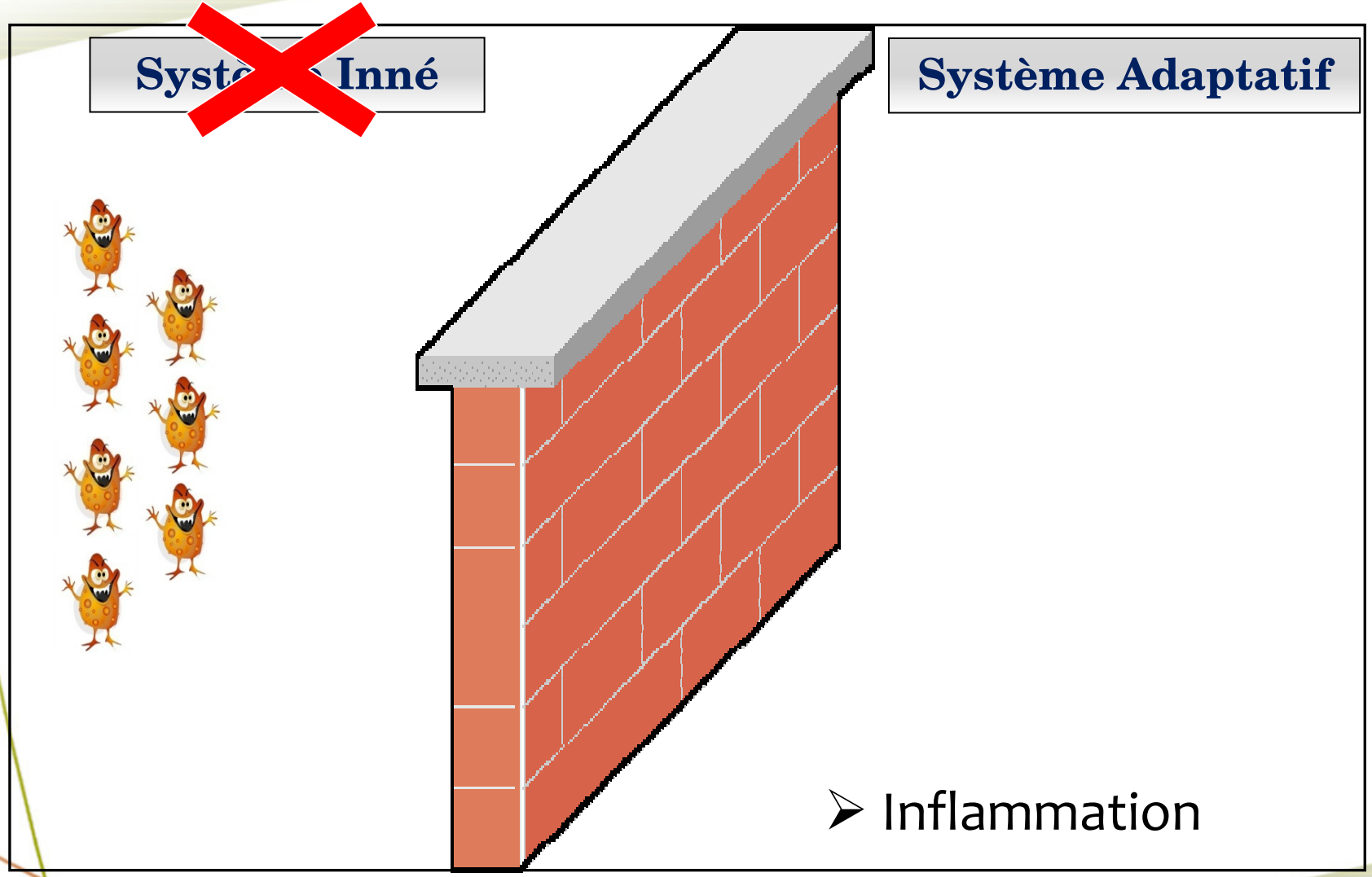
- Macrophage

- Cellules-B (Leucocytes)

- Cellules-T

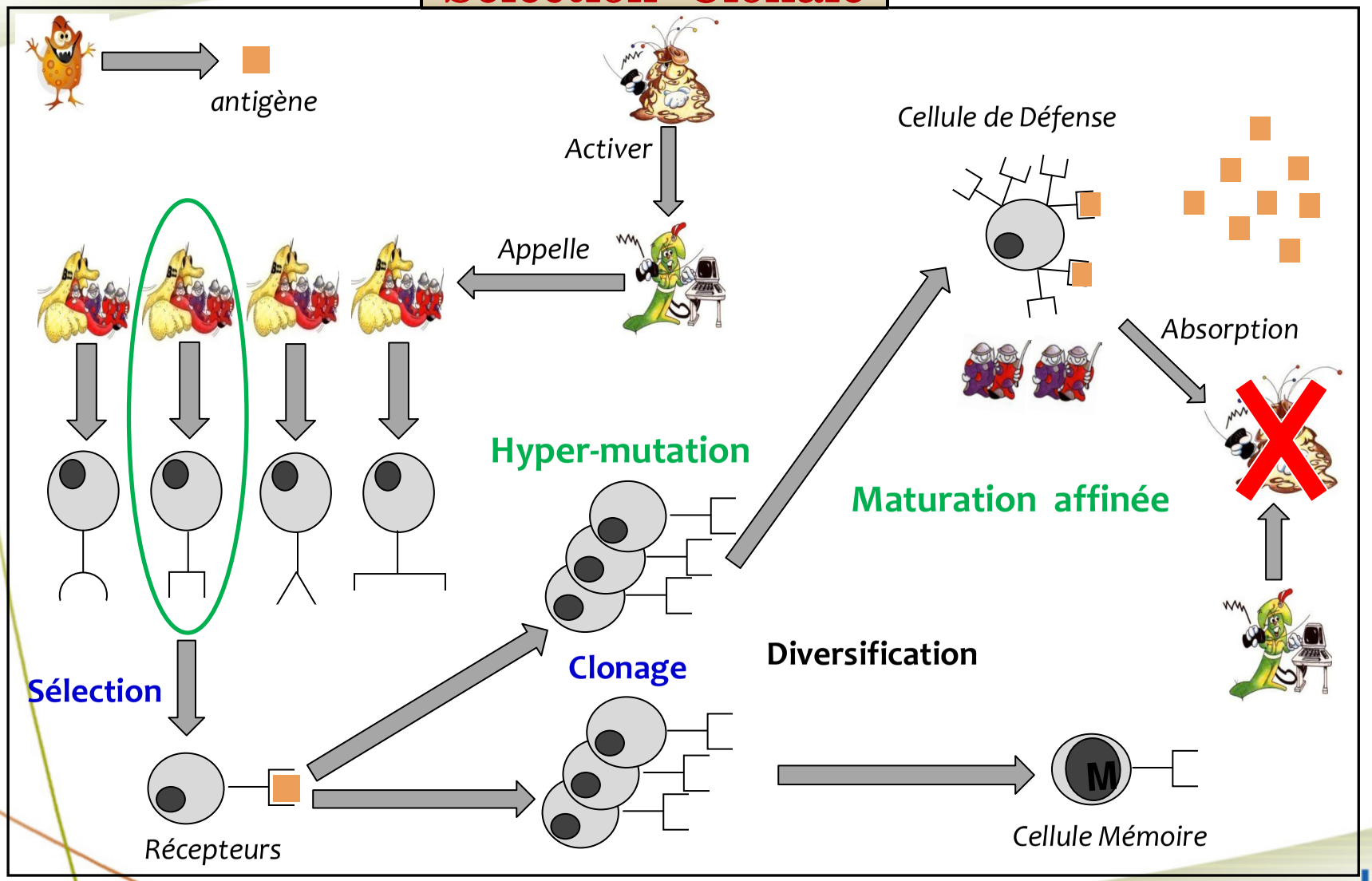
- Anticorps

COMMENT ÇA FONCTIONNE ?



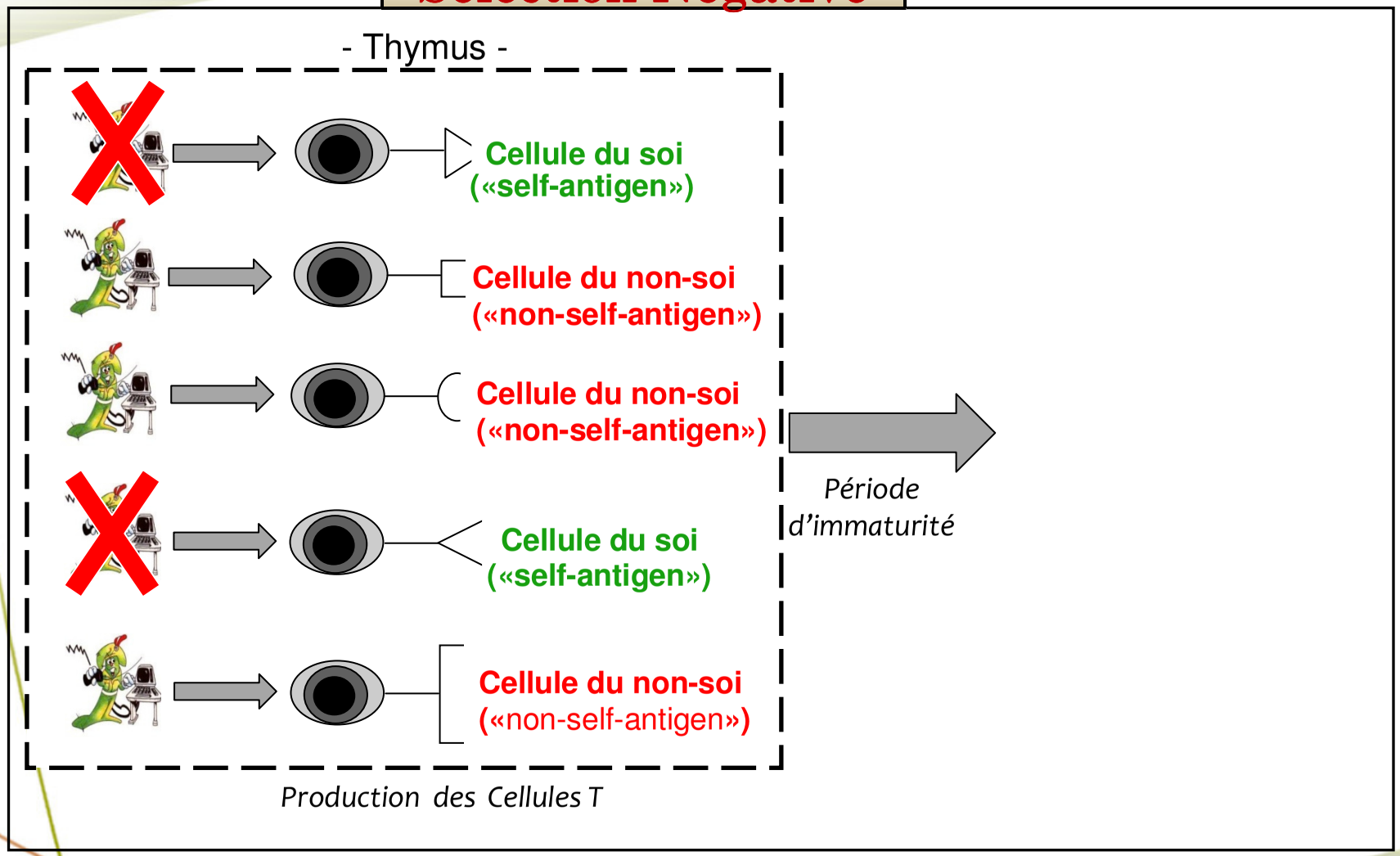
COMMENT ÇA FONCTIONNE ?

Sélection Clonale [Burnet]



COMMENT ÇA FONCTIONNE ?

Sélection Négative [Lederberg]

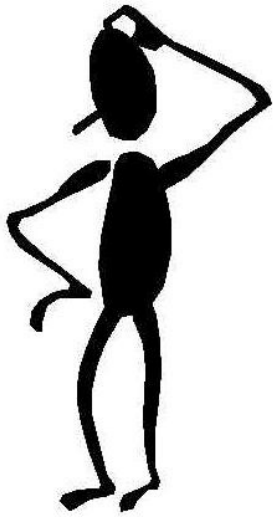


SOI ? / NON-SOI ?

- Théorie du « horror autotoxicus » [Ehrlich, 2005]

Exemples :

- Vaccinations (nécessité des adjuvants)
- Le soi → Notion « relative » qui change (« changing self »)
- Intestins : Colonies de bactéries (non-soi), mais, aucun feed-back observé par le SI !!
- Maladies auto-immunitaires
- …



→ « *Dirty Little Secret* »

SOLUTIONS

- Trois théories :

✓ Co-stimulation

• Fournir des signaux depuis de SI inné (***Cellules Dendritiques - CD***)

→Première réponse immunitaire effective

✓ Le non-soi infectieux

• CD pourvues de *récepteurs* → Discrimination entre le soi et le non-soi à l'aide des molécules **PAMP** (***P****athogen-****A****ssociated* ***M****olecules* ***P****atterns*)

✓ Reconnaissance de signal dangereux

• Une cellule meurt de façon *inattendue* → **Danger** → signal déclenché

• Les CD sont attirées vers la zone du danger

→ « Le SI ne réagit pas contre une substance *étrangère*, mais, plutôt ***dangereuse*** » [Matzinger, 1994]

Université de Montréal

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES

- Théorie proposée par [Jerne, 1974] (complémentaire à l'existant)

- Les interactions entre les cellules du SI influent sur son comportement interne → **Mémoire immunitaire**
→ Aptitude du SI à ***se rappeler*** des anciens pathogènes rencontrés

- Une cellule B « supprime » sa voisine dès que cette dernière a un ***degré d'affinité*** inférieur à un certain *seuil*
→ Maintenir une **stabilité** au sein du réseau

PLAN

- Système Immunitaire (SI)
- SIA : Approches Proposées
- Exemples de SIA
- Conclusion et Perspectives

DÉFINITION

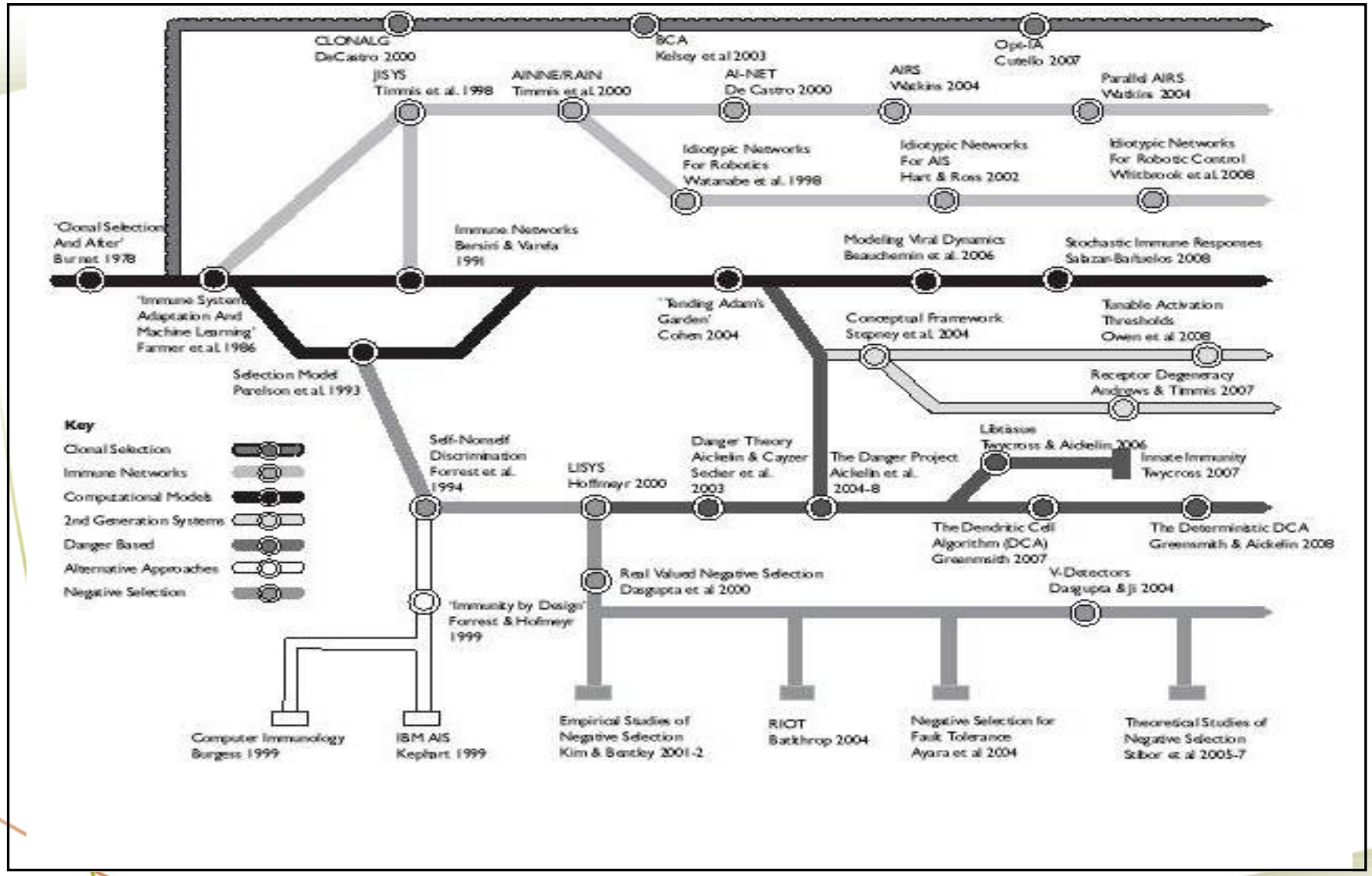
« Artificial Immune Systems are adaptive computational systems inspired by theoretical immunology and applied to problem solving »

[De Castro and Timmis, 2002]

→Ensemble d'algorithmes et de méthodes s'inspirant du mode de fonctionnement du SI (des Vertébrés)

- Exploiter les caractéristiques du SI : **Apprentissage** + **mémorisation** pour résoudre certains problèmes

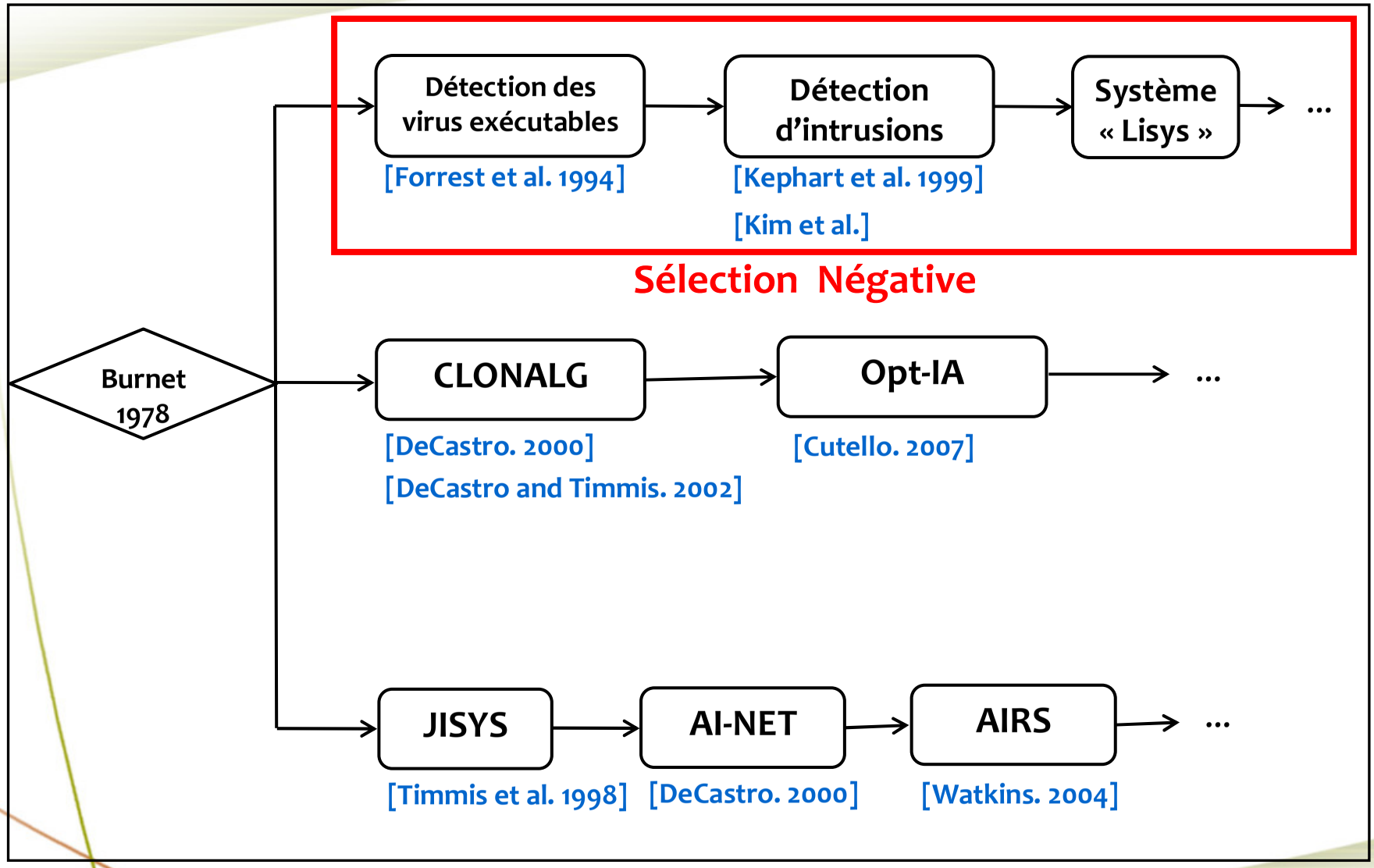
EVOLUTION : APPROCHES



[Greensmith et al.]

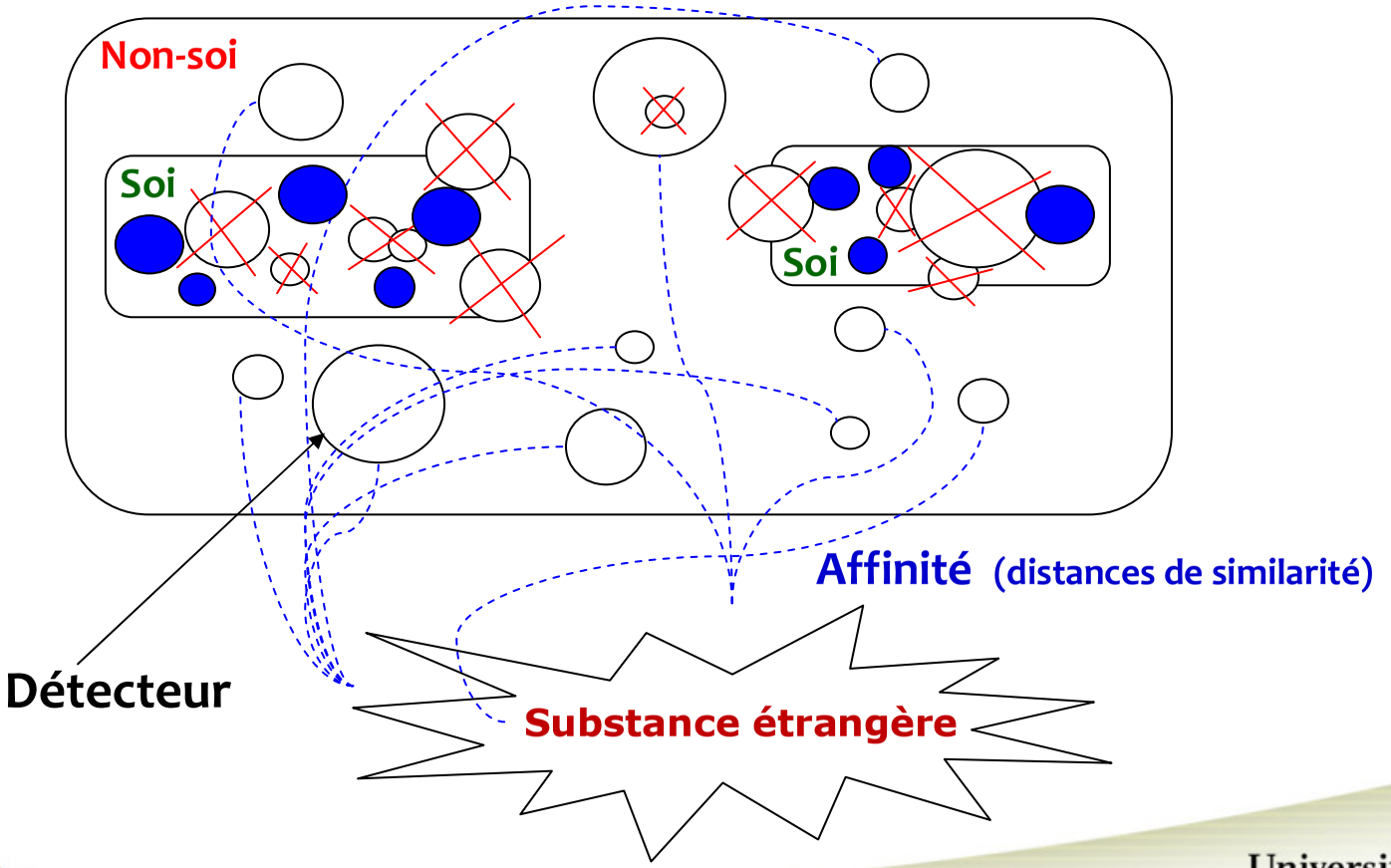
Université de Montréal

EVOLUTION : APPROCHES

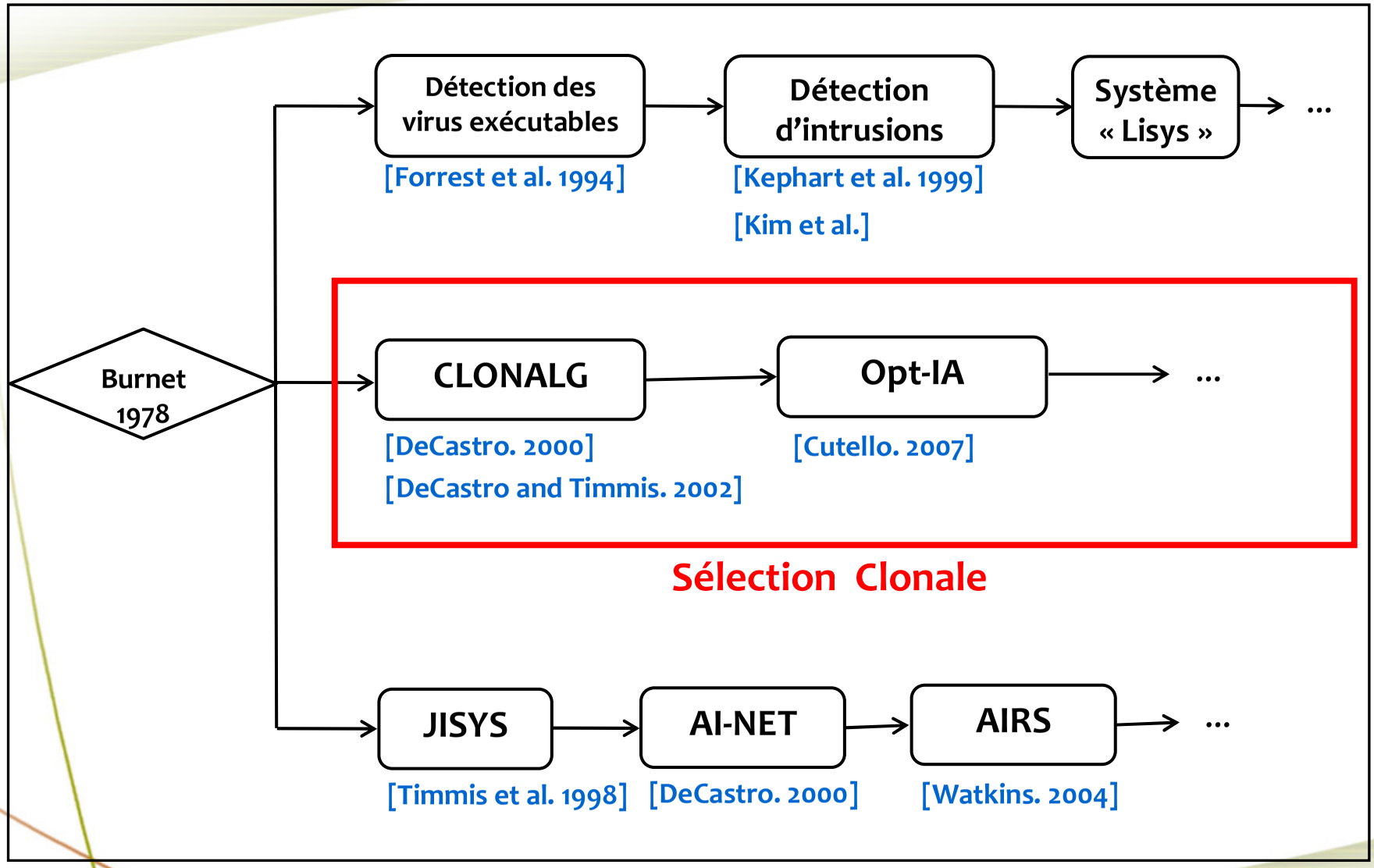


PRINCIPE

- Détection de défauts de conception [Kessentini et al. 2009]
- « *Self / non-self discrimination* »



EVOLUTION : APPROCHES

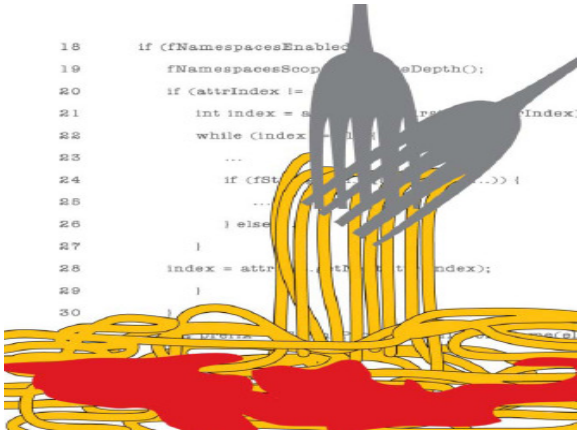


SÉLECTION CLONALE

- Reconnaissance des patrons de conception
(« *Pattern Recognition* ») [DeCastro and Timmis. 2002]

- ***Patron de conception*** = Concept en Génie Logiciel permettant de résoudre des problèmes récurrents suivant le paradigme Objet
[Livre de GoF : Design pattern]

Exemples (*anti-patterns*) :
- Bugs, duplication de codes, architectures spaghetti, Blob, … etc



ALGORITHME

1. Soit **P** l'ensemble des patterns à reconnaître (donné)

2. Choisir aléatoirement une population initiale d'individus (**M**)

3. ***Pour*** i ***de*** 1 ***à*** taille(**P**) ***faire***
Choisir un pattern ($\mathbf{p_i}$)
Pour j ***de*** 1 ***à*** taille(**M**) ***faire***
Choisir un individu ($\mathbf{m_j}$)
Calculer *mesure_affinité*($\mathbf{p_i}$, $\mathbf{m_j}$)
fin pour
fin pour

4. ***Sélectionner*** les **n1** *meilleures* cellules de **M** en se fondant sur leurs mesures d'affinité ; *Selon mesure_affinité*, générer un certain nombre de copies (***clones***)

ALGORITHME

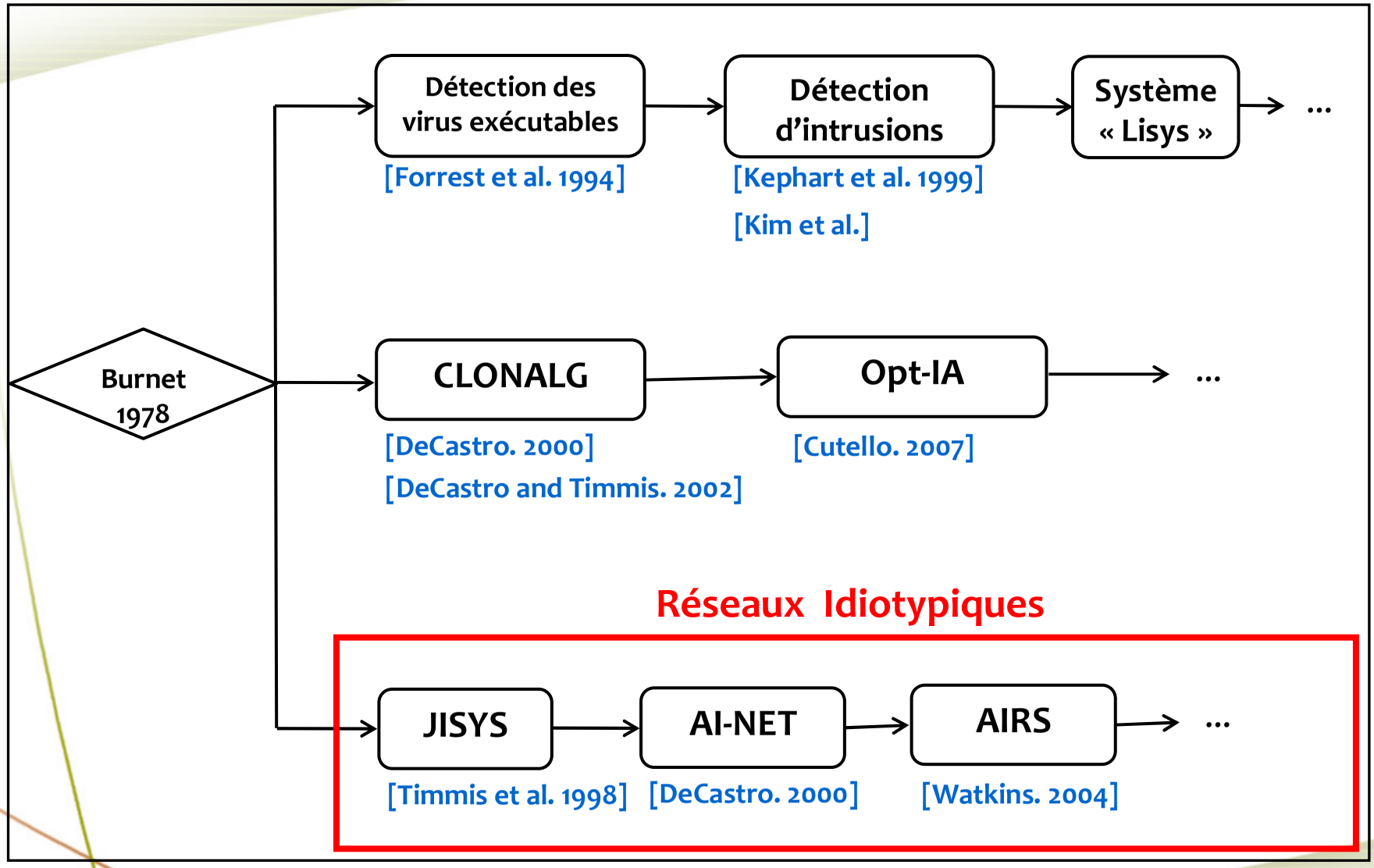
5. Effectuer une ***hyper_mutation*** des clones pour engendrer une autre population (**M***)
(le taux de mutation est inversement proportionnel à *mesure_affinité*)

6. Ajouter les individus de **M*** à **M**

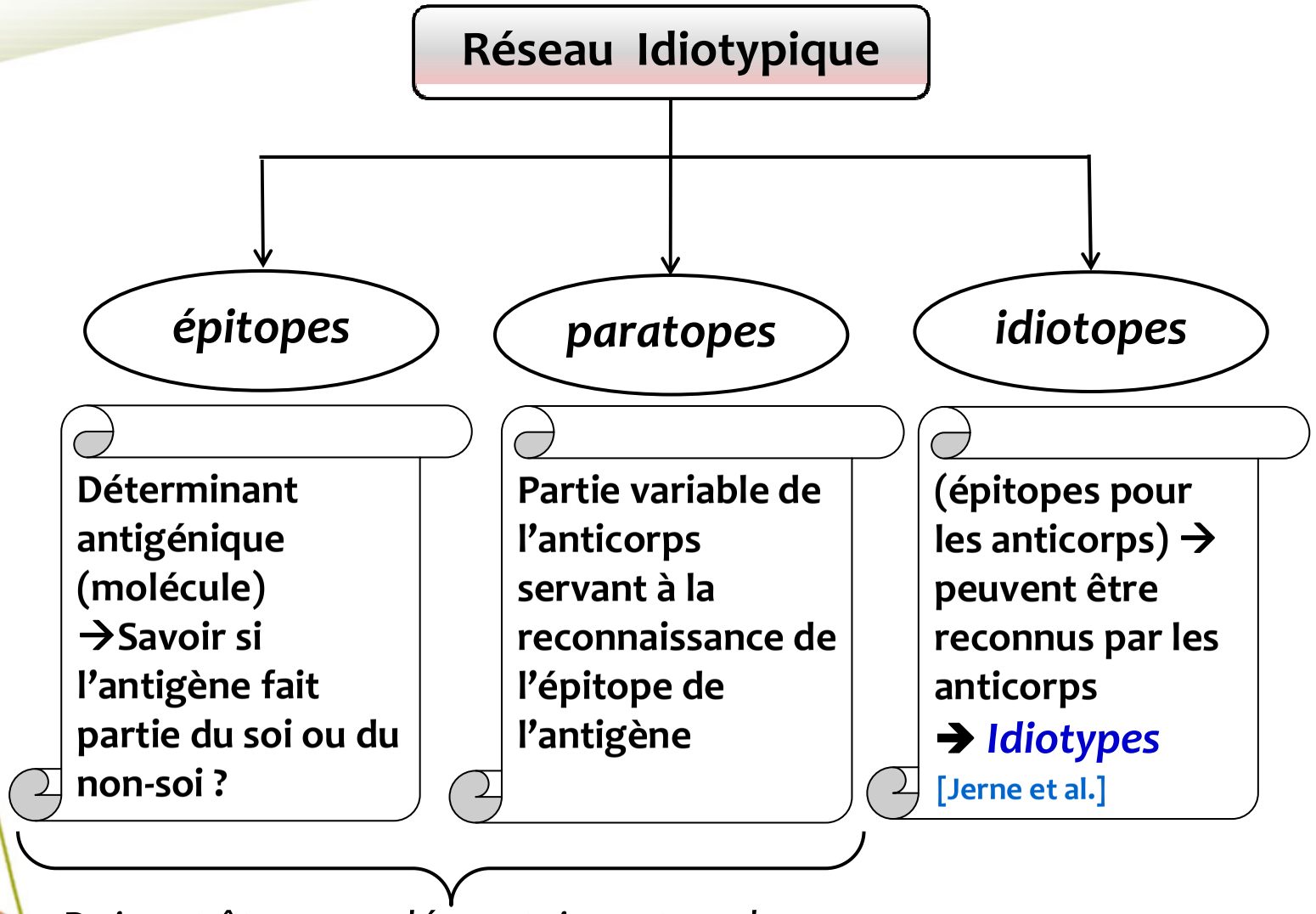
7. ***Re-sélectionner*** **n2** individus parmi les individus *matures* (optimisés) pour former la *population mémoire* $\mathbf{P_M}$

8. Si un critère d'arrêt n'est pas atteint, retourner à l'étape **3**
(un critère d'arrêt peut être une erreur lors de la classification ou la reconnaissance d'un pattern minimum)

EVOLUTION : APPROCHES



NOTIONS DE BASE



APPROCHE

- ***Principe :*** SI = Réseau complexe où les paratopes et les idiotopes se connaissent simultanément
→Les cellules-B communiquent et interagissent entre elles

- Même en absence d'antigènes, les anticorps continuent à communiquer entre eux (échange des ***niveaux de concentrations***) [Jerne et al.]

- ***Inspirations :*** Comportement du réseau « ***intelligent*** »
→ Robotique mobile, logiciels (programmes) ayant des modules liés, les réseaux de communication, … etc

LA THÉORIE DU DANGER

- Extrait du principe du « Dirty Little Secret » et de la théorie du « horror autotoxicus » [Ehrlich, 2005]

- ***Idée de Base :*** Le SI ne répond pas au non-soi, mais plutôt au « ***danger*** » [Matzinger. 1994, 2001]

- ***Preuves:***

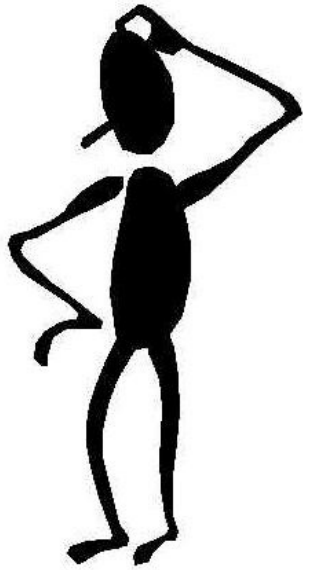
• Repas, intestins : Multitude de bactéries (étrangères), mais, aucune réaction n'est déclenchée par le SI !!!

• La notion de self/non-self est *relative* et *évolue* au cours du temps

• Observations d'auto-attaques par l'organisme lui-même (maladies *auto-immunitaires*)

• …

LA THÉORIE DU DANGER



- ***Comment distinguer entre un « danger » et un « non-danger » ???***

- [Bretscher and Cohn] : Deux signaux :
  - **Signal 1 :** Reconnaissance d'antigène (danger)
  - **Signal 2 :** Co-stimulation (CD)

  Est-ce que cet antigène est vraiment dangereux ?

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS

Application 1 : *Sécurité des réseaux de communication*

[Homfeyer and Forrest, 2000]

• ***Objectifs :***

- Contrôler le trafic réseau
- Filtrer les connexions « désirées » des connexions « non-désirées »

• ***Analogie :***

- Danger → @IP en dehors de la politique de sécurité en vigueur
- Non-danger → @IP faisant partie des @autorisées et/ou provenant de réseaux « connus » et de confiance

• ***Comment ?***

- Utiliser des **détecteurs** (types de communications qui servent de références pour des comparaisons, proxy, @IP)

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS

Application 2 : *Détection des virus d'ordinateurs*

[Aickelin and Cayzer, 2002]

• ***Objectifs :***

- Détecter les anomalies (virus, codes malicieux, …)
- Décider si le comportement du système est « normal » ou « anormal »

• ***Analogie :***

- Dangers → Lenteur/Utilisation excessive des ressources de la mémoire, changements inattendus du contenu et/ou taille des fichiers, activités inappropriées du disque, … etc

• ***Comment ?***

- Observation des signaux SIGABRT (cas du système UNIX)
- Comparaison avec des anciens scénarios (Base de données de virus)
- …

PLAN

- Système Immunitaire (SI)
- SIA : Approches Proposées
- Exemples de SIA
- Conclusion et Perspectives

GÉNÉRATIONS DES SIA

- Deux générations de SIA :

✓ ***Première génération***

• Inspirée des modèles immunitaires théoriques

• Sélection clonale, sélection négative

✓ ***Deuxième génération***

• Encore dans une phase de développement

• Des résultats préliminaires ont fait preuve de leur efficacité et robustesse

CAS D'ÉTUDES

- Deux cas d'études de SIA : [Greensmith et al.]

✓ ***Première génération***

• Les réseaux idiotypiques (*Idiotypic Network Approach*)

✓ ***Deuxième génération***

• Les algorithmes utilisant le principe des cellules dendritiques (*DCA – Dendritic cell Algorithm*)

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES

• ***Principe :***

- Etudier les interactions entre : Anticorps ←→ Anticorps
  Anticorps ←→ Antigène

✓ Anticorps → [**p**, **e**]
✓ Antigène → [**e**]

- Degré de correspondance entre les *strings* « e » et « p »
←→ Mesure d'affinité entre *vrais épitopes et paratopes*

s : *valeur seuil* sur les mesures d'affinités susceptibles de déclencher des *réactions*

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES

- Algorithme d'***alignement global*** entre 2 chaînes de caractères
[Needleman - Wunsch]

Anticorps : `--GTGACATGCGAT--AAGAGG---CCTT--AGATCCGGATCTT`
Antigène : `GGGAGAC-TGCGATACAAG---TTACCTTGTAGATCTG-TCTT`

μ : Nombre de bits de liaisons au-delà du seuil (**s**)
G = 1+μ : Longueur de la réaction

Exemple :
s = 16 ; Nombre de liaisons = 27
➔ μ = 11 et G = 12

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES

- ***Définitions Mathématiques :***

$\mathbf{m_{ij}}$ = Longueur de la réaction pour toutes les possibilités d'alignements entre deux anticorps i et j :

$$m_{ij} = \sum_{k=1}^{q} G_k$$

où **q** = Nombre des alignements possibles

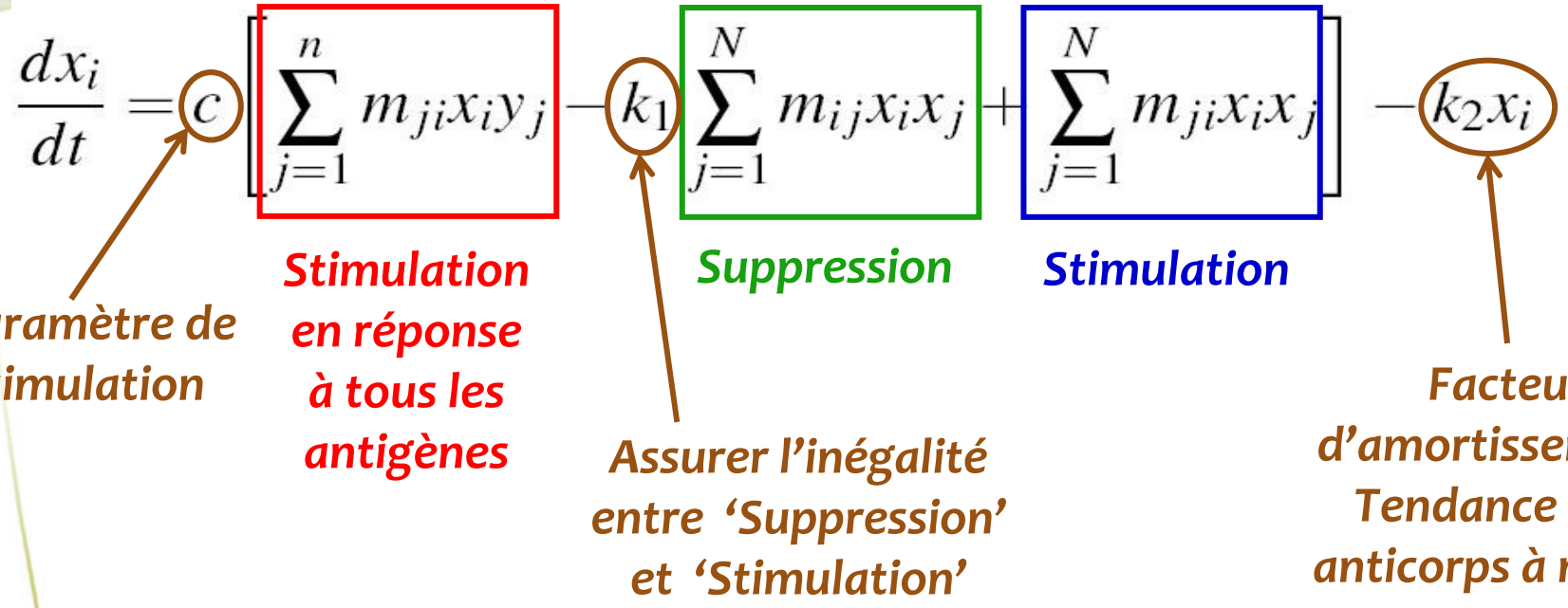
N = Nombre d'anticorps

n = Nombre d'antigènes

$\mathbf{x_i}$: Degré de concentration du i ème anticorps

$\mathbf{x_i y_j}$: Probabilité de « *matching* » entre le i ème anticorps et le j ème antigène (ou anticorps)

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES



C : *Constante (taux) simulant le nombre de collisions par unité de temps et le taux de production d'un anticorps lors d'une collision.*

RÉSEAUX IDIOTYPIQUES

- *Réduction* de la concentration des anticorps

$$x_i(t+1) = \frac{1}{1+\exp(0.5 - x_i(t+1))}$$

- Le prochain anticorps sélectionné (pour lutter un antigène) est celui ayant *la plus grande concentration*

- ***Exemple d'applications :***

- *Robotique mobile*
  - ✓ Antigènes → signaux environnementaux
  - ✓ Anticorps → Comportements du Robot

ALGORITHMES DENDRITIQUES

- ***Principe :***

- S'inspirer du mode de fonctionnement des CD

→ Constituent les premiers contacts avec les pathogènes

→Interactions entre de SI inné et le SI adaptatif

→ Déclencher la réponse immunitaire adaptative

→ Maintenir « la tolérance centrale » du soi (sélection négative)

- Métaheuristiques dont le principe découle de la théorie du danger

→ Discrimination entre ce qui « normal » et « anormal » à l'aide des *signaux*

- ***Exemples d'applications :***

- Détection d'intrusions (dans le domaine du réseau)

- Sécurité des Robots

ALGORITHMES DENDRITIQUES

• ***Idées de l'Algorithme :***

- Population de cellules de taille **fixe** (chaque cellule éliminée est immédiatement remplacée)

- Cellule → durée de vie (*lifespan*)

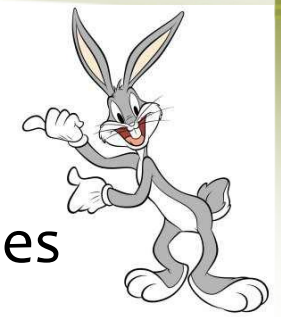
➔Maintenir une **diversité** au sein de la population

- Cellule morte → présente les antigènes collectés (**k-value**)
→ initialisation de son *lifespan*

➔Effet d'***apprentissage*** et de ***mémorisation***

- Définir un facteur $\mathbf{K_\alpha}$: *Score d'anomalie* de l'antigène **α** (Combien de cellules connaissent déjà cet antigène en se basant sur leurs facteurs *k-value*)

SYNTHÈSE & CRITIQUES



- L'article constitue un bon état de l'art sur les SIA
- Il englobe presque la majorité des approches existantes

- Absence des comparaisons entre les différentes approches illustrées
  - ***Exemple :***

Entre la sélection clonale et la sélection négative, Il y'a la notion de ***mémoire***

- La théorie du danger : Manque de travaux d'implémentation → juste conceptuelle

(certains travaux essaient de développer un système *multi-agent* basé sur cette théorie)

PLAN

- Système Immunitaire (SI)
- SIA : Approches Proposées
- Exemples de SIA
- Conclusion et Perspectives

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- Nouveau domaine d'étude

- SI = Deux sous-systèmes (inné et adaptatif)

- Relativité du principe de la discrimination entre le *soi* et le *non-soi* (*Théorie du Danger*)

- Deux générations de SIA (en perpétuelle évolution)

- Plusieurs approches existantes (sélection négative, sélection clonale, réseaux idiotypiques, …)

- Etude de deux exemples d'applications des SIA

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- *Avant une dizaine d'années* : Applications systématiques des approches de la 1ère génération (Sélection clonale, négative, réseaux idiotypiques)

- *Maintenant* : Migration vers les algorithmes de 2ème génération
→ Ont tendance à dominer (multitude des travaux)

- Nécessité de chercher d'autres *mécanismes intelligents* (sources d'inspirations) à partir des données biologiques

- Faire preuve de la compétitivité des SIA par rapport à d'autres approches existantes

- …

QUELQUES RÉFÉRENCES

[1] : Artificial Immune System (AIS) Research in the last five years / D.Dasgupta, Z.Ji and F.Gonzaléz / IEEE / 2003.

[2] : System-Level Fault Diagnosis Using Comparison Models : An-Artificial-Immune-Systems-Based-Approach / Mourad Elhadef, Shantanu Das and Amiya Nayak / Journal Of Networks, 2006.

[3] : Artificial Immune Systems : A Novel paradigm to Pattern Recognition / L.N.de Castro and J.Timmis / University of Paisley, UK, 2002.

[4] : Optimising Task Schedules Using An Artificial Immune System Approach / Han Yu / Physical and Digital Realization Reseach Center, Motorola Labs / Atlanta, georgia, USA, 2008.

[5] : The Danger Theory and Its Application to Artificial Immune Systems / Uwe Aickelin and Steve Cayzer / Information Infrastructure Laboratory, HP Laboratories Bristol /September 2002

QUELQUES RÉFÉRENCES

[6] : Danger Theory and Intelligent Data Processing / Anjum Iqbal and Mohd Aizaini Maarof/ The World Academy of Science, Engineering and Technology, 2005

[7] : The Danger Model in Its Historical Context/ Matzinger P. / Scandinavian Journal of Immunology, 54 / 4-9, 2001

[8] : A theory of self-nonself discrimination / Bretscher P., Cohn M. / *Science 169, 1042-1049 / 1970*

[9] : Deviance from Perfection is a Better Criterion than Closeness to Evil when Identifying Risky Code / M.Kessentini, S.Vaucher and H.Sahraoui / ASE 2009

[10] : http://www.slideshare.net

[11] : http :// fr.wikipedia.org

Merci Pour Votre Attention

Commentaires ??
Questions ??