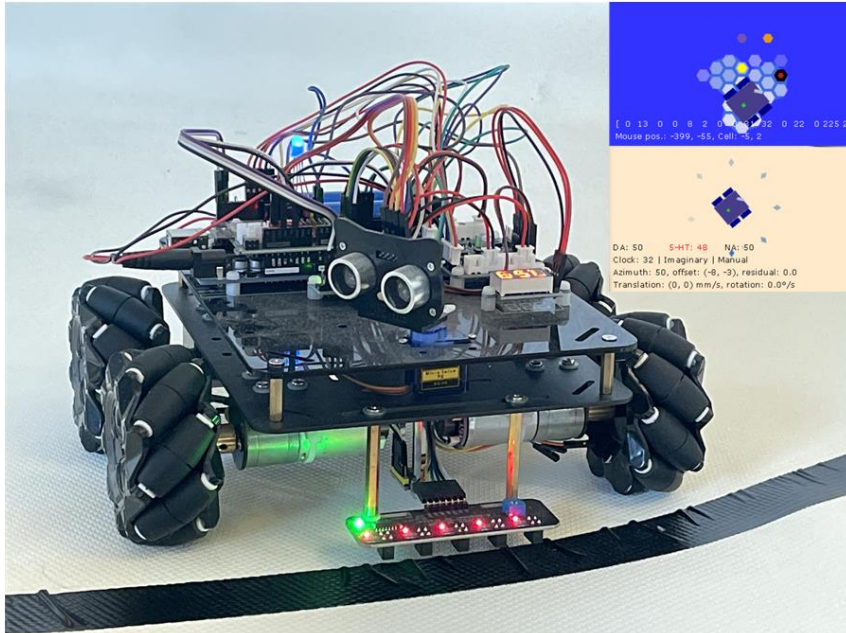


Intelligence Artificielle Développementale



30 Septembre 2026
olivier.georgeon@gmail.com
<http://www.oliviergeorgeon.com>

Déroulement du cours

UE « IA et Cognition » (30h): Marie Lefevre

Module « IA Développementale » (9h) Olivier Georgeon

- Mercredi 23 septembre: 4.5h
- **Mercredi 30 septembre: 4.5h**

Contrôle des connaissances:

- TD par groupe de 2: 33% de la note de contrôle continu
- Rendu par mail le **dimanche 18 octobre**
- Examen final: 6 points sur 20

Objectifs pédagogiques

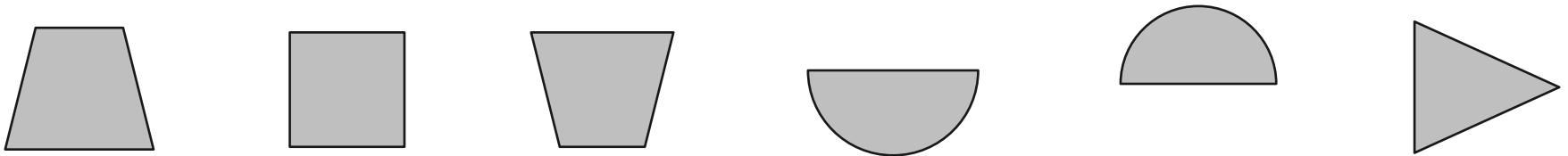
Après ce cours, vous serez capables de:

- Cours
 - Expliquer ce qu'est l'IA développementale
 - Comparer les techniques d'IA développementale par rapports aux autres techniques d'IA (RL, Deep Learning)
 - Expliquer les inspirations théoriques (sciences cognitives, biologie, psychologie)
 - Nommer quelques auteurs de référence en IA développementale
 - Différencier IA en domaine modélisé / non modélisé
- TD
 - Implémenter un agent minimaliste dans lequel on ne code pas a priori une ontologie du "monde".

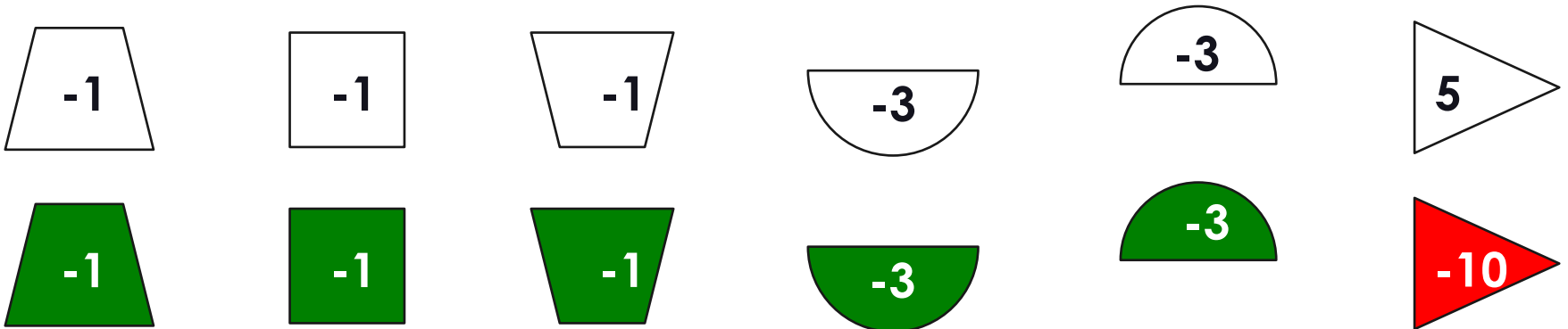
Exemples

Exemple 1

Exemple : 6 actions possible

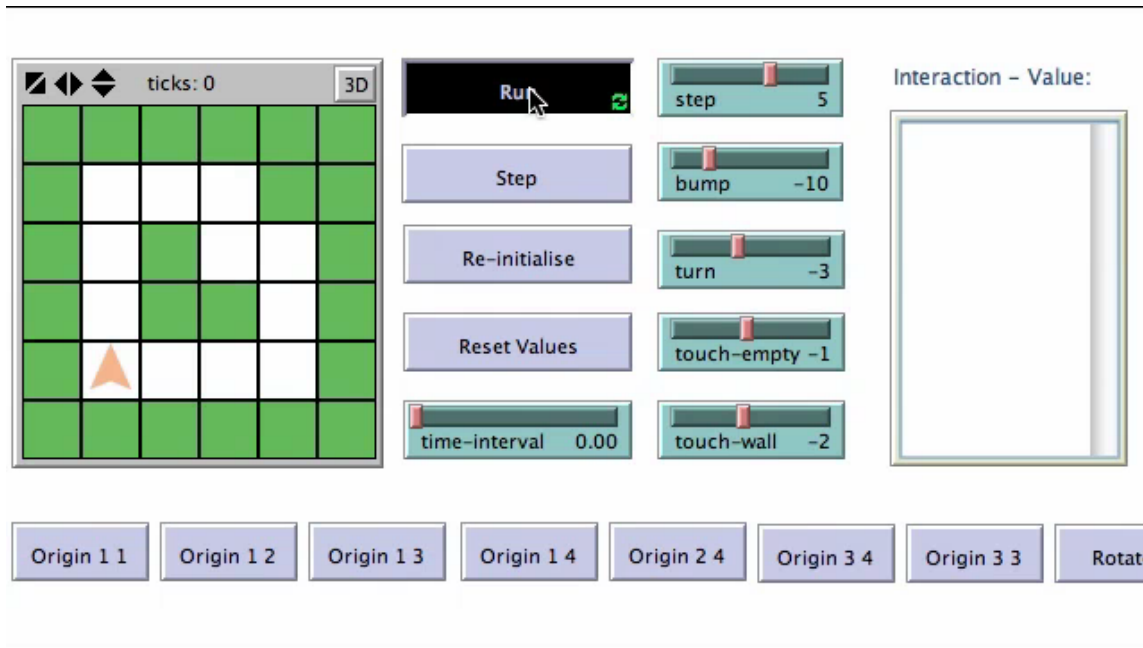


2 feedbacks possibles



... avec des valeurs

L'agent qui finissait par comprendre

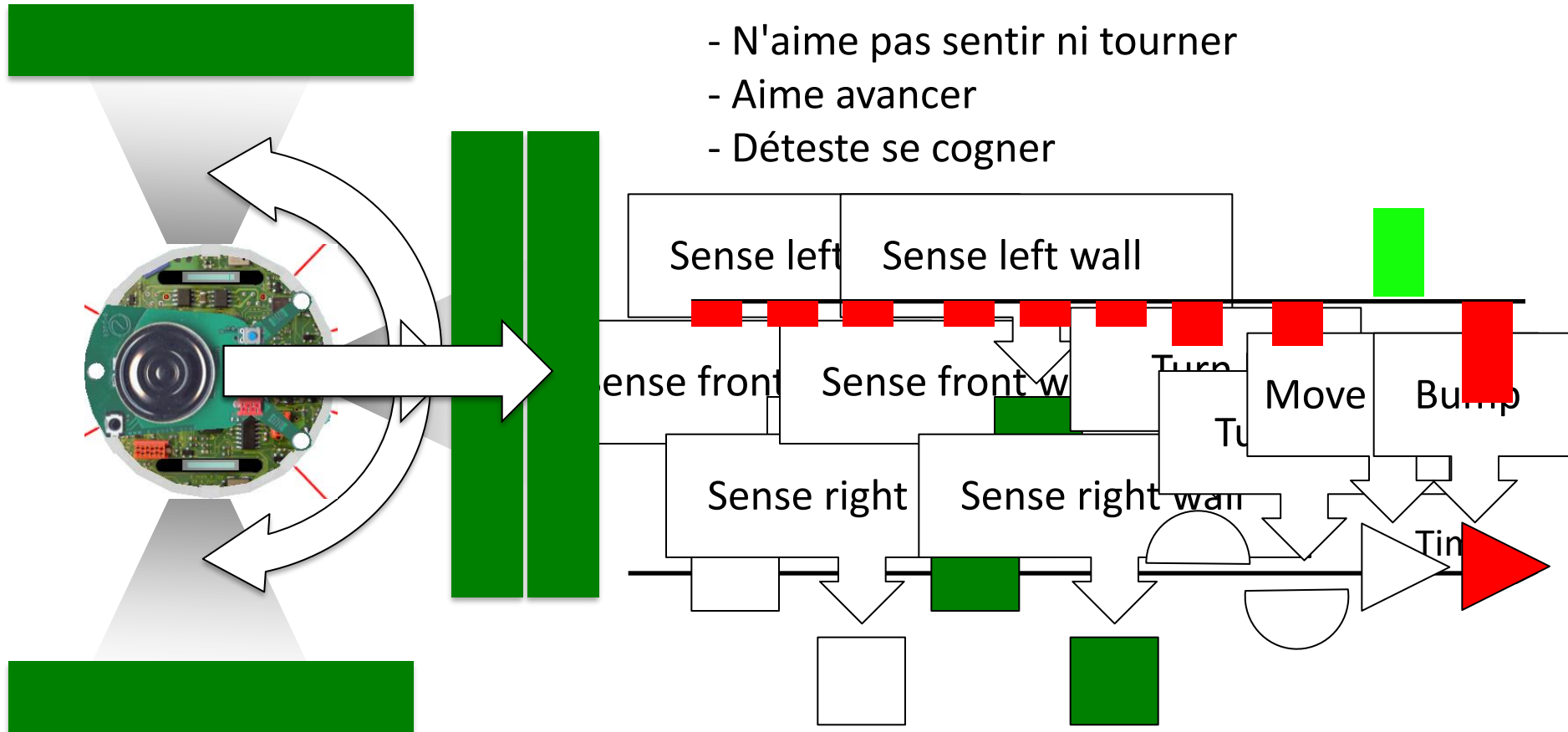


<https://youtu.be/LVZ0cPpmSu8>

Avance / collision  (5)  (-10)
 Tourne gauche/droite   (-3)
 Touche droite/devant/gauche       (-1)

Bump: 
 Touch: 

A l'insu du robot ...

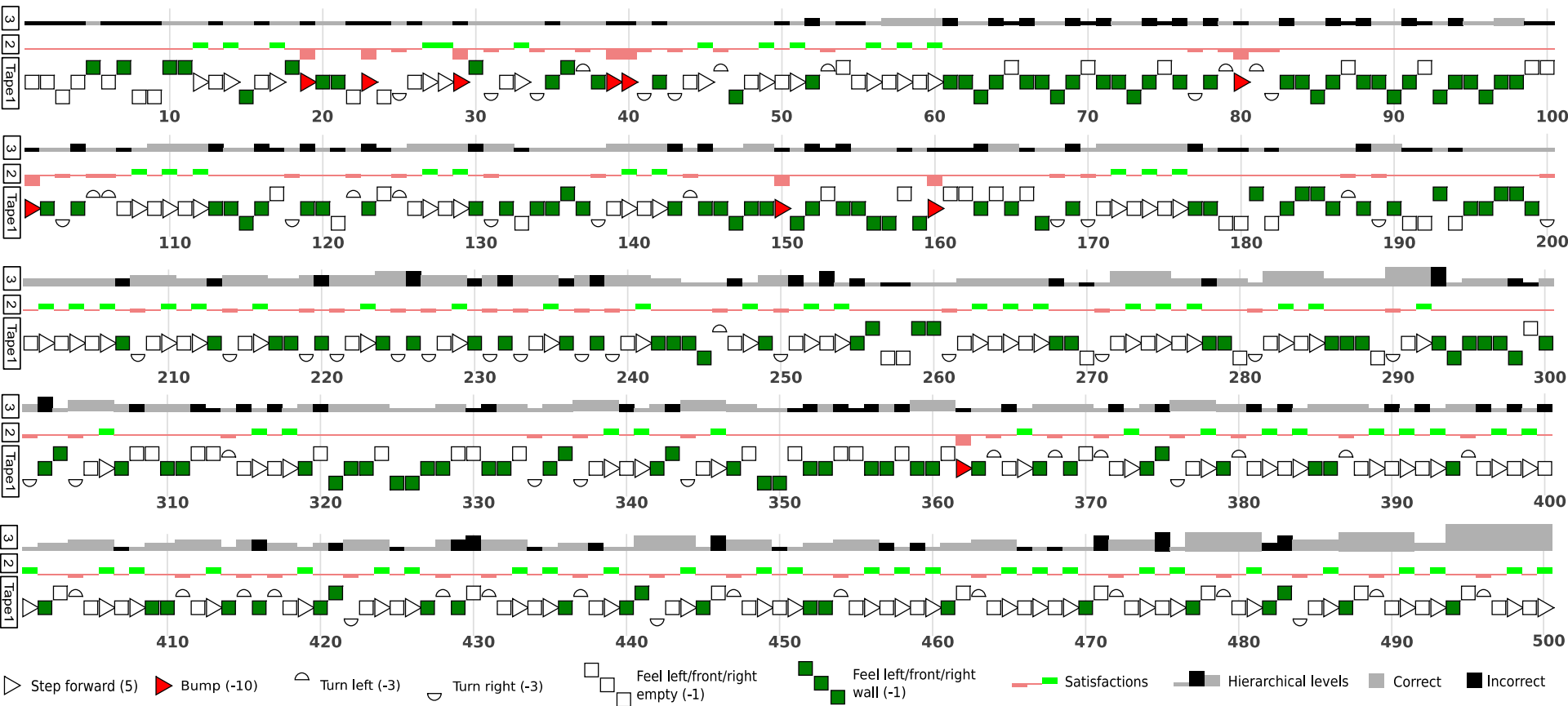


Le robot qui n'y comprenait rien du tout

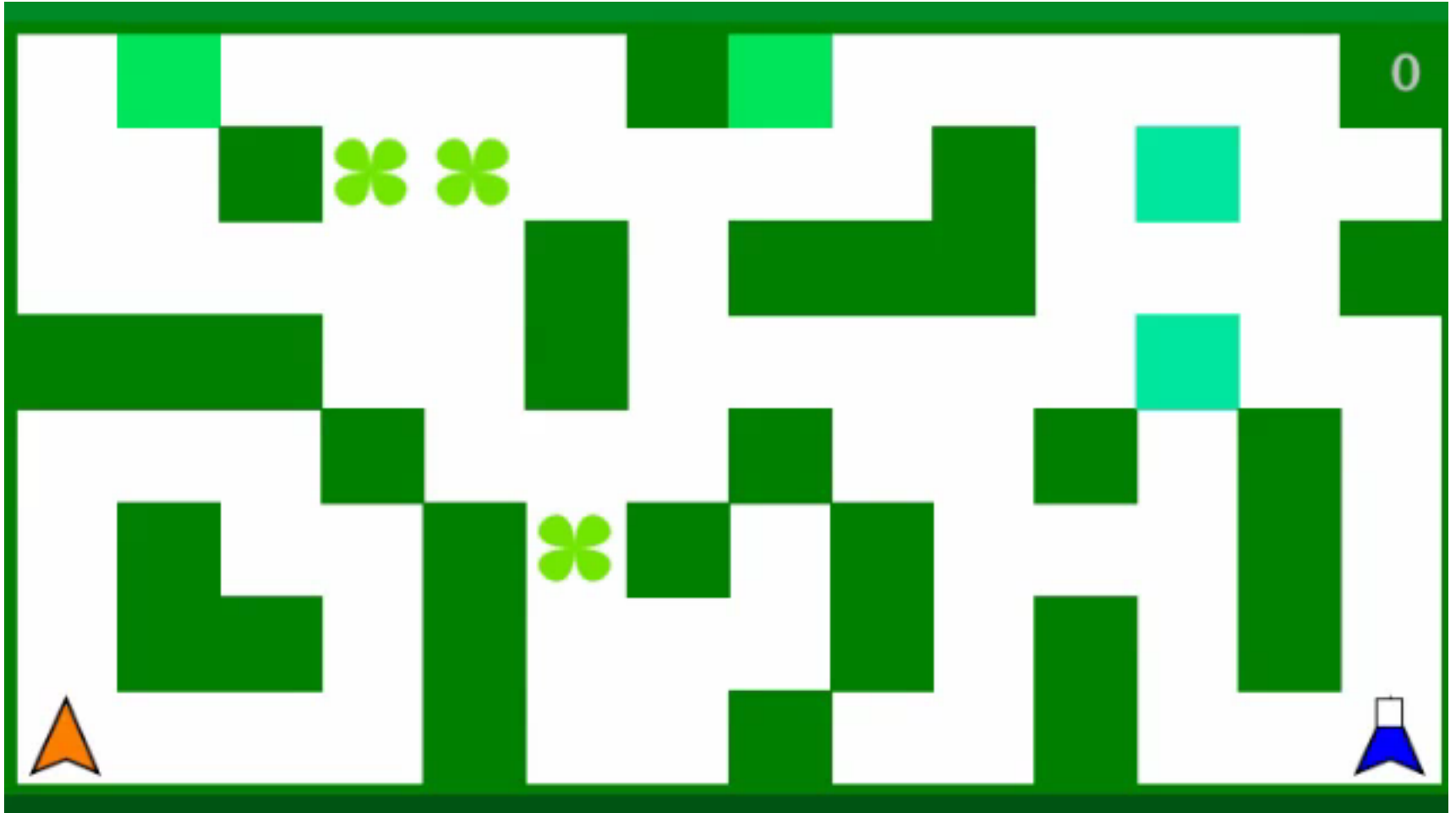


<https://youtu.be/t1RO5S4mBEY>

Exemple de trace

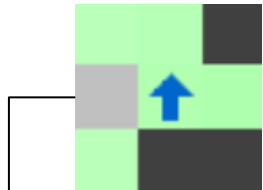


Environnement plus complexe



<https://youtu.be/q8WkYbt2BxM>

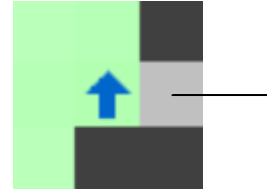
The Sniff Experiment



Sniff left



Sniff front

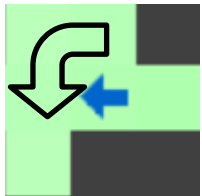


Sniff right

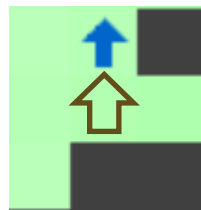
$$\underline{i_t} = \langle \underline{d_t}, \underline{o_t} \rangle (v)$$

Outcomes:

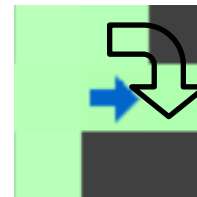
Decrease
Stable
Increase
bump



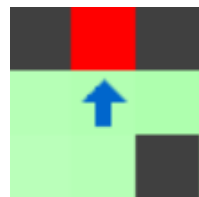
Turn left



Move forward



Turn right

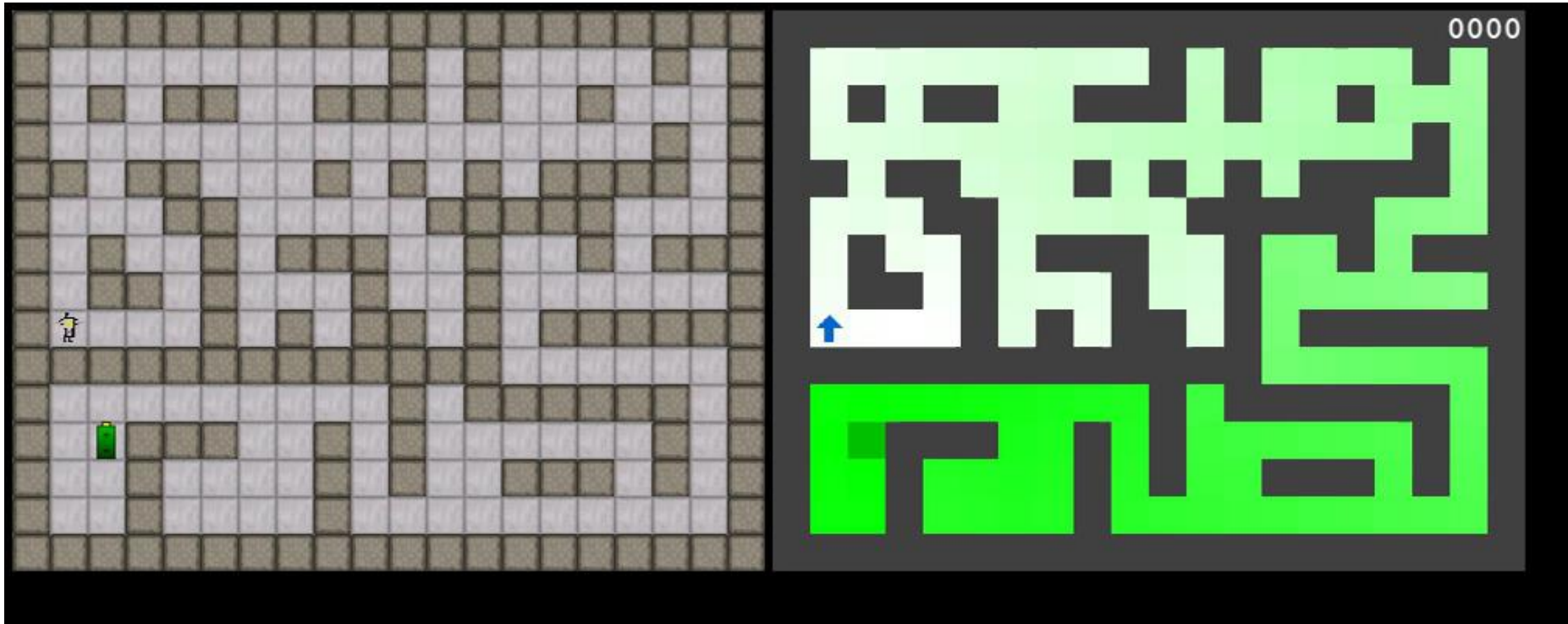


Bump

Valences:

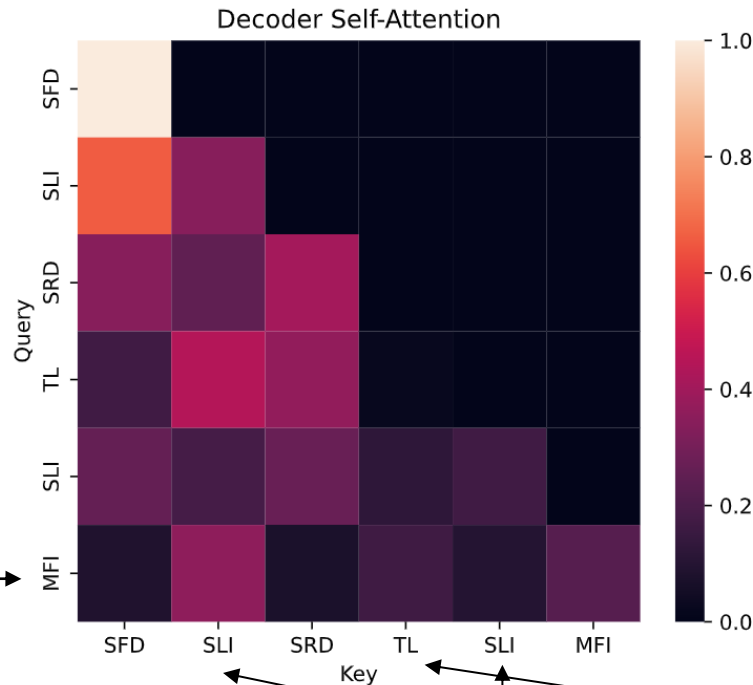
Sniff: -1
Bump : -10
Forward decrease: -5
Forward increase: 5

Demonstration



<https://youtu.be/cDntPUIGvgA>

Self-attention matrix analysis



Small transformer :
Token embedding 16D
4 attention head

Trained with :
84 sequences up to 12 tokens
learned by the schema
mechanism on Step 200

<move forward, increase> depends on <sniff left, increase> and then <Turn left>

But not the last <sniff left, increase>

Ancrage théorique

Epistemologie Génétique. Jean Piaget (1970)

« La connaissance ne procède en ses sources ni d'un sujet conscient de lui-même ni d'objets déjà constitués (du point de vue du sujet) qui s'imposeraient à lui : elle résulte **d'interactions se produisant à mi-chemin entre les deux** et relevant donc des deux à la fois, mais en raison d'une indifférenciation complète et non pas d'échanges entre formes distinctes. [...]

S'il n'existe au début ni sujet, au sens épistémique du terme, ni objets conçus comme tels, ni surtout d'instruments invariants d'échange, le problème initial de la connaissance sera donc de construire de tels médiateurs: partant de la zone de contact entre le corps propre et les choses, il s'engageront alors toujours plus avant dans les deux directions complémentaires de l'extérieur et de l'intérieur et c'est de cette double construction progressive que dépend l'élaboration solidaire du sujet et des objets. »
(épistémologie génétique, Piaget 1970)



Psychologie développementale

- **Schème sensorimoteur**

- Un **schème** est une entité abstraite qui organise l'interaction du corps avec son environnement.
- Ces schèmes se renforcent lorsque l'expérience les conforte, ou se modifient lorsque qu'elle les contredit

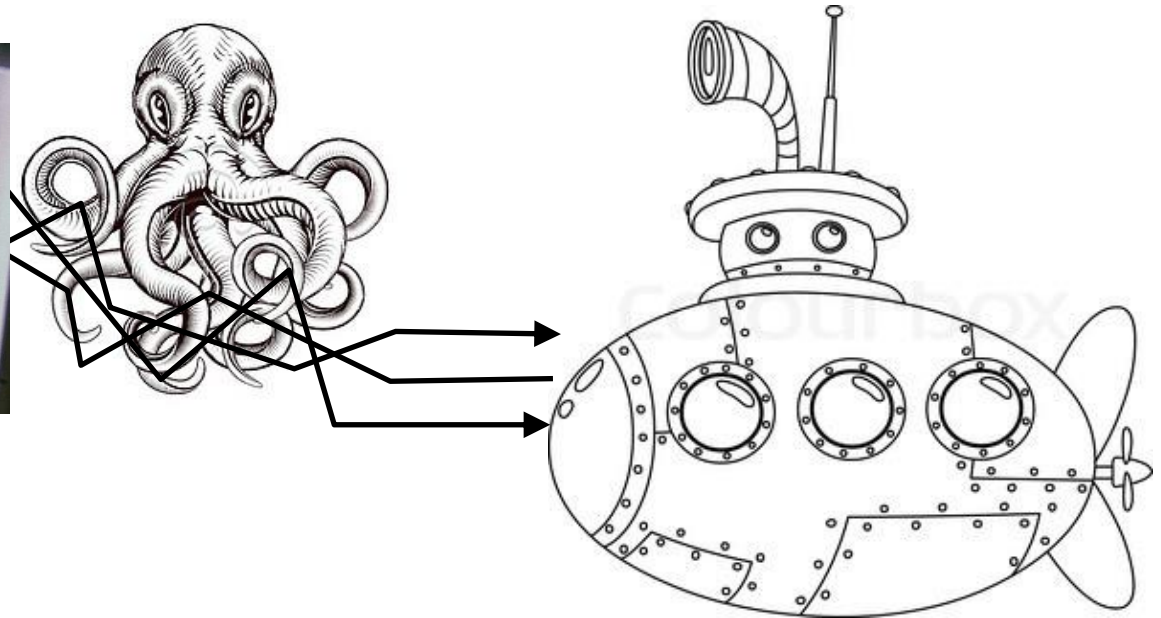
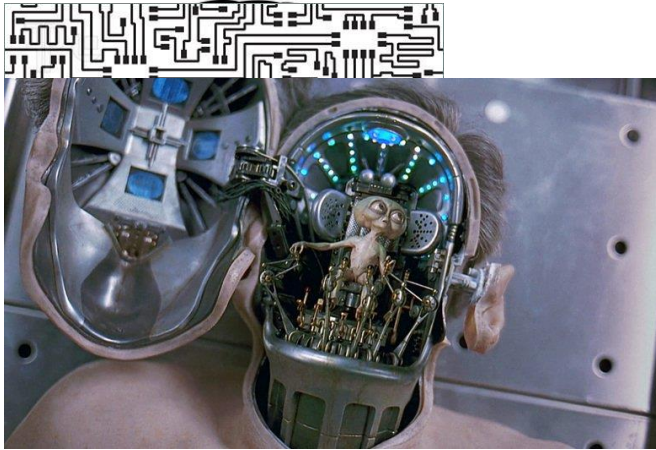
- **Epistémologie constructiviste**

- Les épistémologies constructivistes (Le Moigne 1999)
- « Chacun construit la façon qu'a le monde de lui apparaître »

- **Trajectoire développementale**

- Intelligence sensorimotrice
 - Maîtrise de l'appareil sensorimoteur
 - Construction du réel
 - Objet permanent, espace sensorimoteur, causalité, temps
- Genèse des opérations concrètes
 - Représentation, symboles, opérations concrètes
- Intelligence opératoire formelle

Maitrise des contingences sensorimotrices



O'Regan & Noë (2001)

A sensorimotor account of vision and visual consciousness

olivier

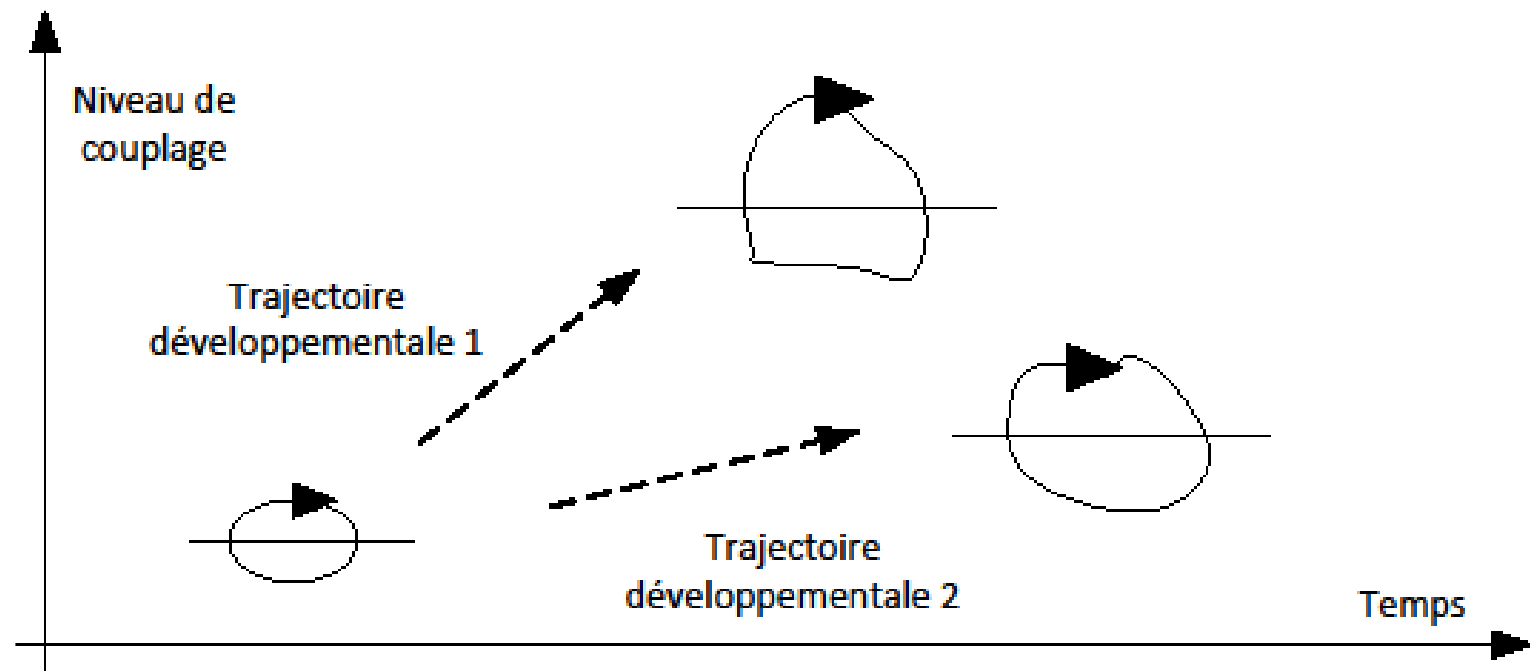
17/63

il.com

Théorie de l'énaction

- Hérite de l'épistémologie pragmatique
 - The pragmatic turn: toward action-oriented views in cognitive science (Engel, Fiston, Kragic 2015)
 - Sédimentation d'habitudes (A genealogical map of the concept of habit, Barandiaran & Di Paolo, 2014)
- Théorie biologique
 - The embodied mind: cognitive science and human experience (Varela, Thompson, Rosch 1993)
 - Expérience du « carrousel à chatons » (Held et Hein 1963)
 - **Couplage structurel , domaine interactionnel**
 - Affordance
- Enactive AI
 - Enactive artificial intelligence: Investigating the systemic organization of life and mind (Ziemke and Froeze 2009)
 - « Constitutive autonomy is necessary for sense making »

Evolution du couplage structurel



Ancrage des symboles

- Ancrage des symboles dans l'expérience sensorimotrice
 - The symbol grounding problem (Harnad 1990)
 - Associe les symboles à une représentation sensorielle iconique
- Ancrage de la sémantique dans l'expérience
 - Experience-grounded semantics: a theory for intelligent systems(Wang 2005)
 - Non Axiomatic Reasoning System (NARS)
- Comportment grounded semantics
 - Symbol grounding: A new look at an old idea (Sun 2000)
 - La signification s'ancre dans les habitudes comportementales
 - Comportment Gounded Semantics (Georgeon, Marrel, Cook, 2026)

Motivation intrinsèque

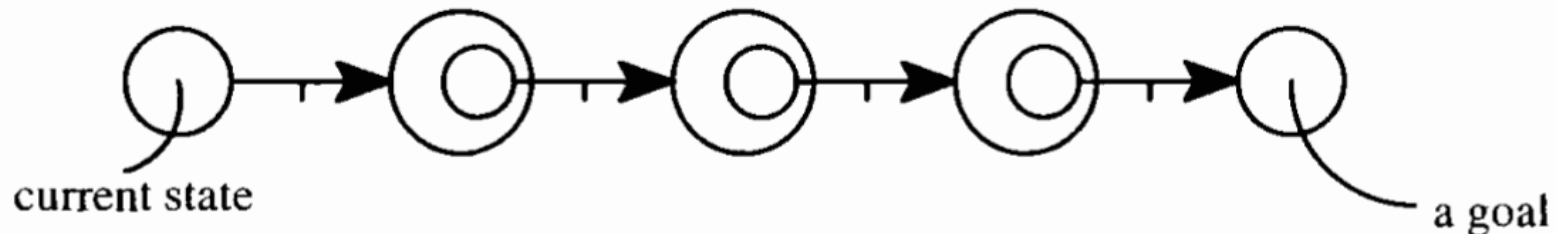
- Oudeyer, P.-Y., & Kaplan, F. (2007). What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches.
- Oudeyer, P.-Y., Kaplan, F., & Hafner, V. V. (2007). Intrinsic motivation systems for autonomous mental development.



Mécanisme de schéma

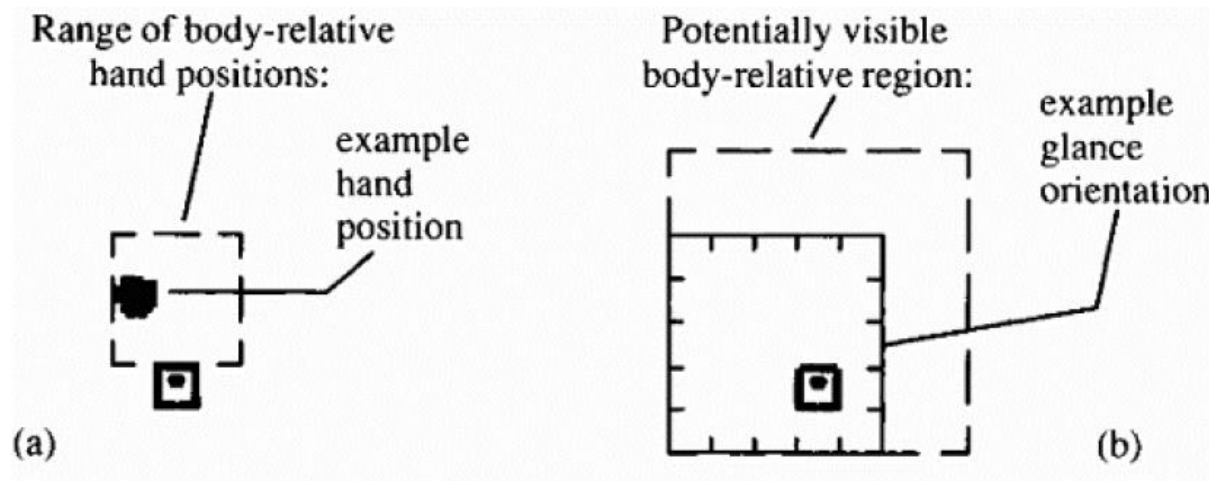
Schema Mechanism de Drescher

- Made-up minds, a constructivist approach to AI (Drescher 1991)
 - **Schema** = <pre-items, action, post-items>
 - **Primitive items** = signal sensoriel.
 - **Synthetic items** sont appris pour représenter des objets hypothétiques dont l'agent fait l'expérience par des schémas
 - L'expérimentateur définit des "Etats buts"
 - Les schémas pour atteindre les états buts.



... mais démontré en monde fermé

Microworld: 7x7 grid.

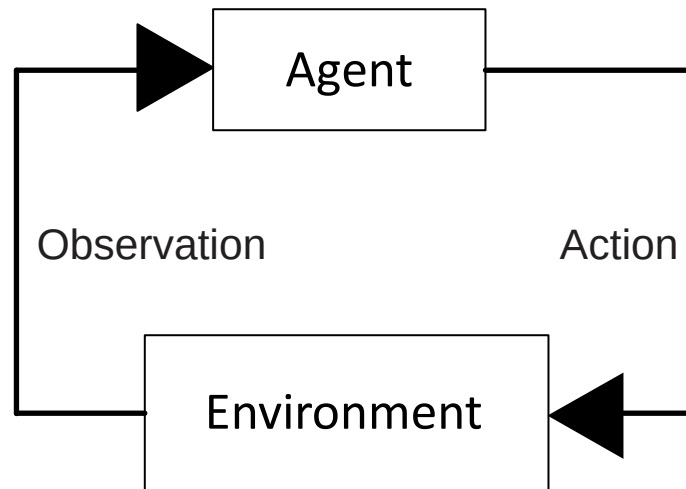


Apprend le « substrat spatial »

Construit un schéma « *PalpableObjectAt(1,3)* » plus tard associé au schéma « *VisibleObjectAt(1,3)* »

Modélisation

Discrete Decision System (DDS)



AKA Markov Decision Process (MDP)

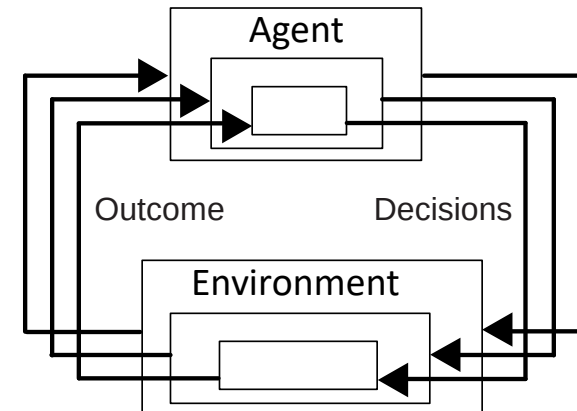
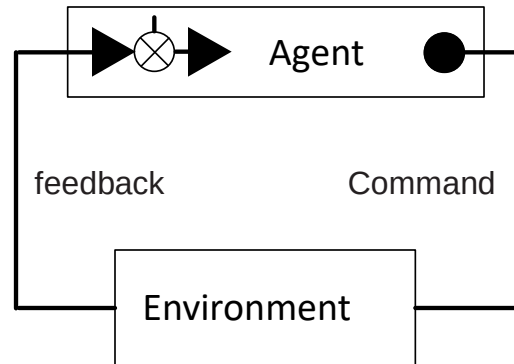
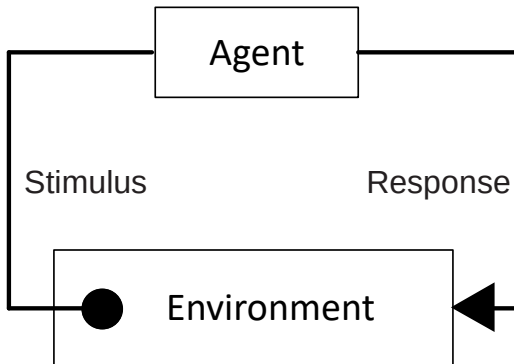
Goertzel (2021) The General Theory of General Intelligence

Criticisms of the DDS model

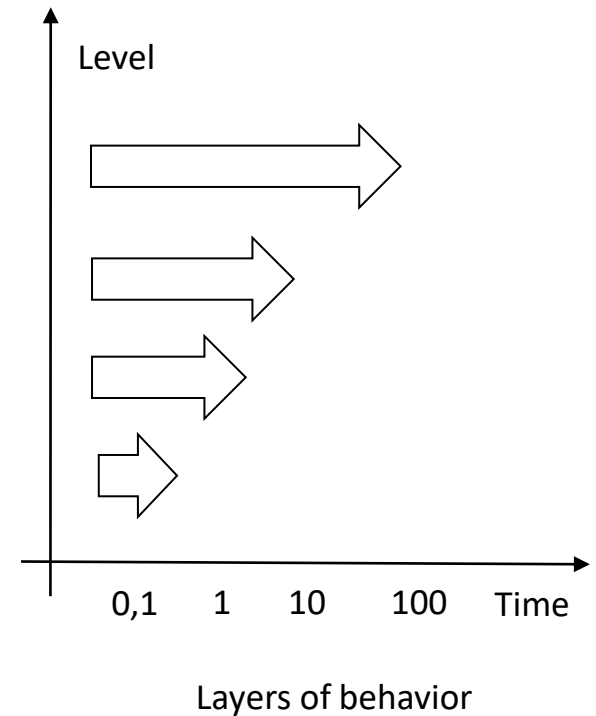
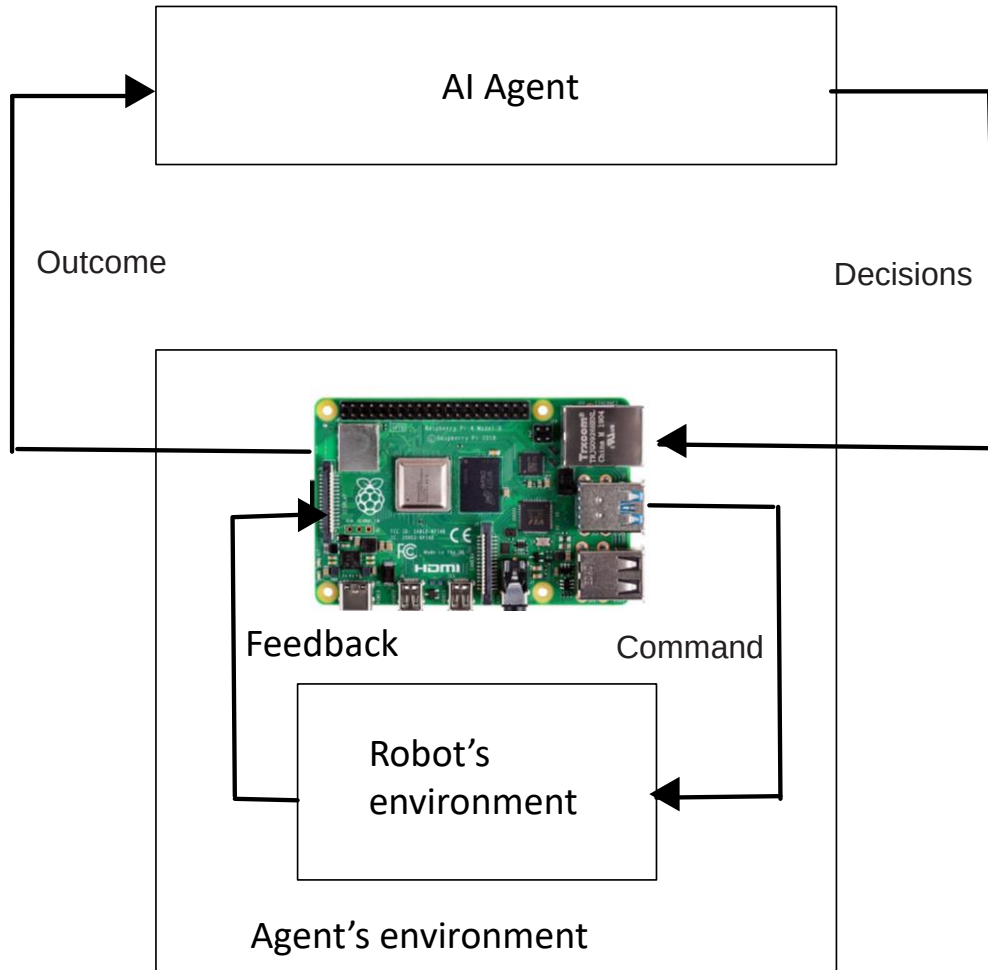
Weinbaum and Veitas (2015) Open-Ended intelligence: The individuation of intelligent agents

- Pre-given separation between agent and environment
 - Does not allow the study of individuation
- Dissociation of perception and action
 - Perception and action cannot always be separated

Declinations of DDSs

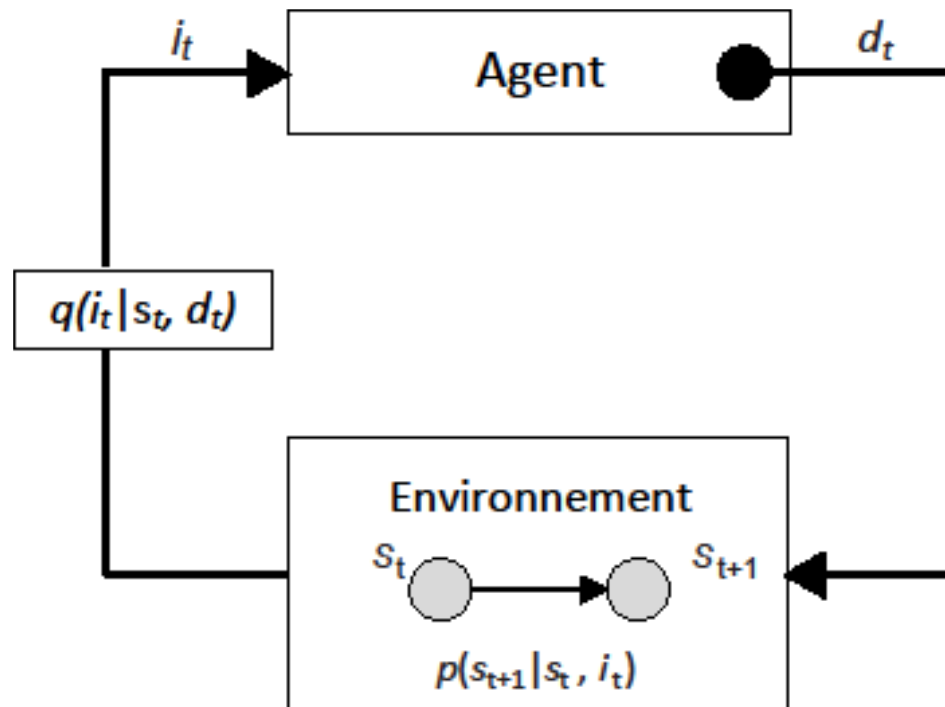


Nested loops in a DDS

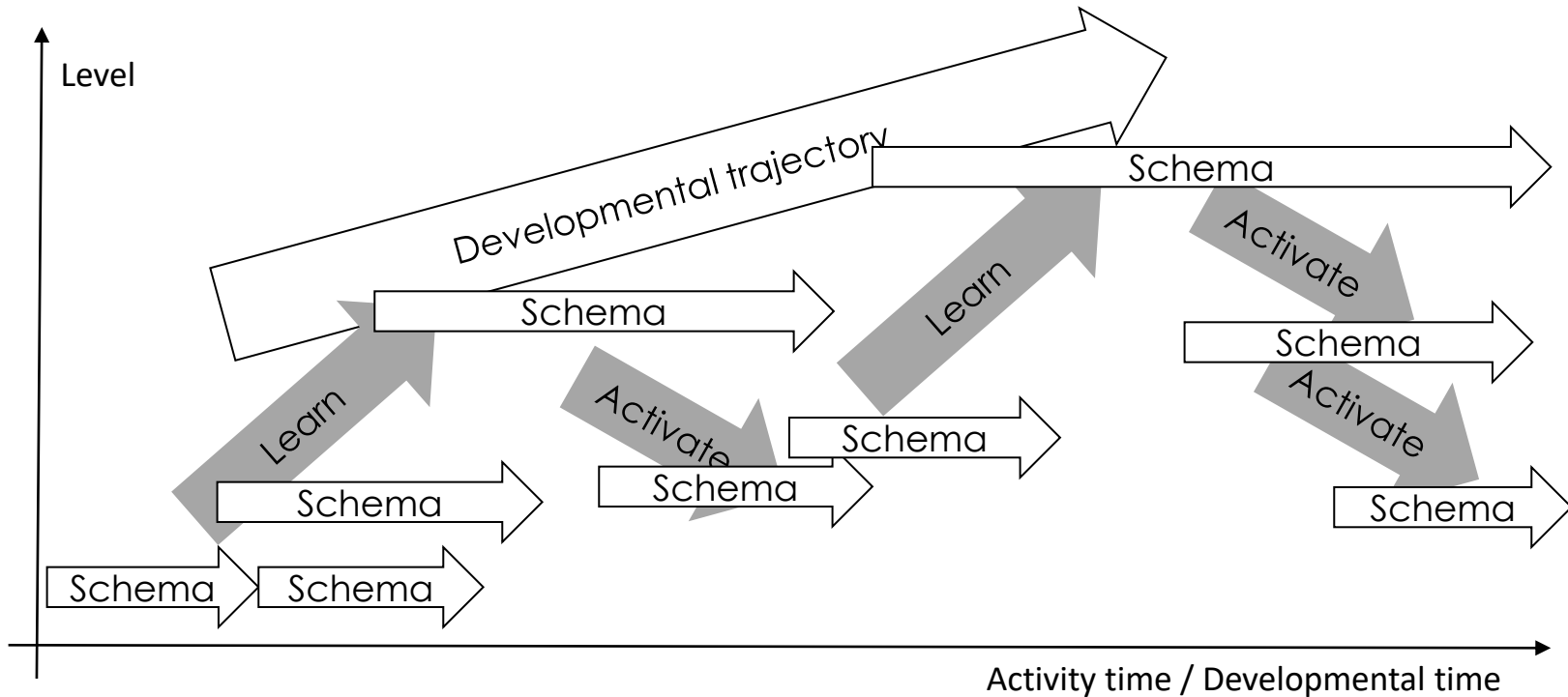


Enactive Decision Process (EDP)

- Le cycle débute par la décision de l'agent
- L'input est un *résultat* (outcome) de l'action ou un événement d'interaction.
- Pas de signal de récompense représentationnel

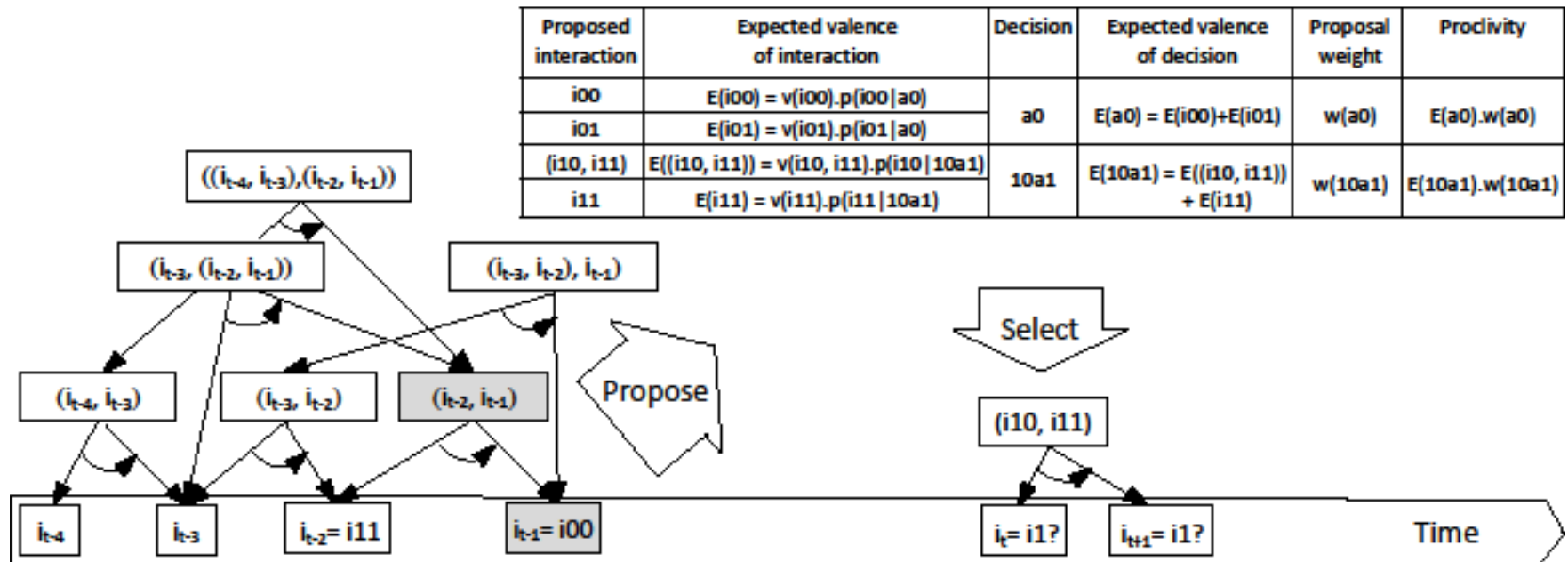


Developmental process

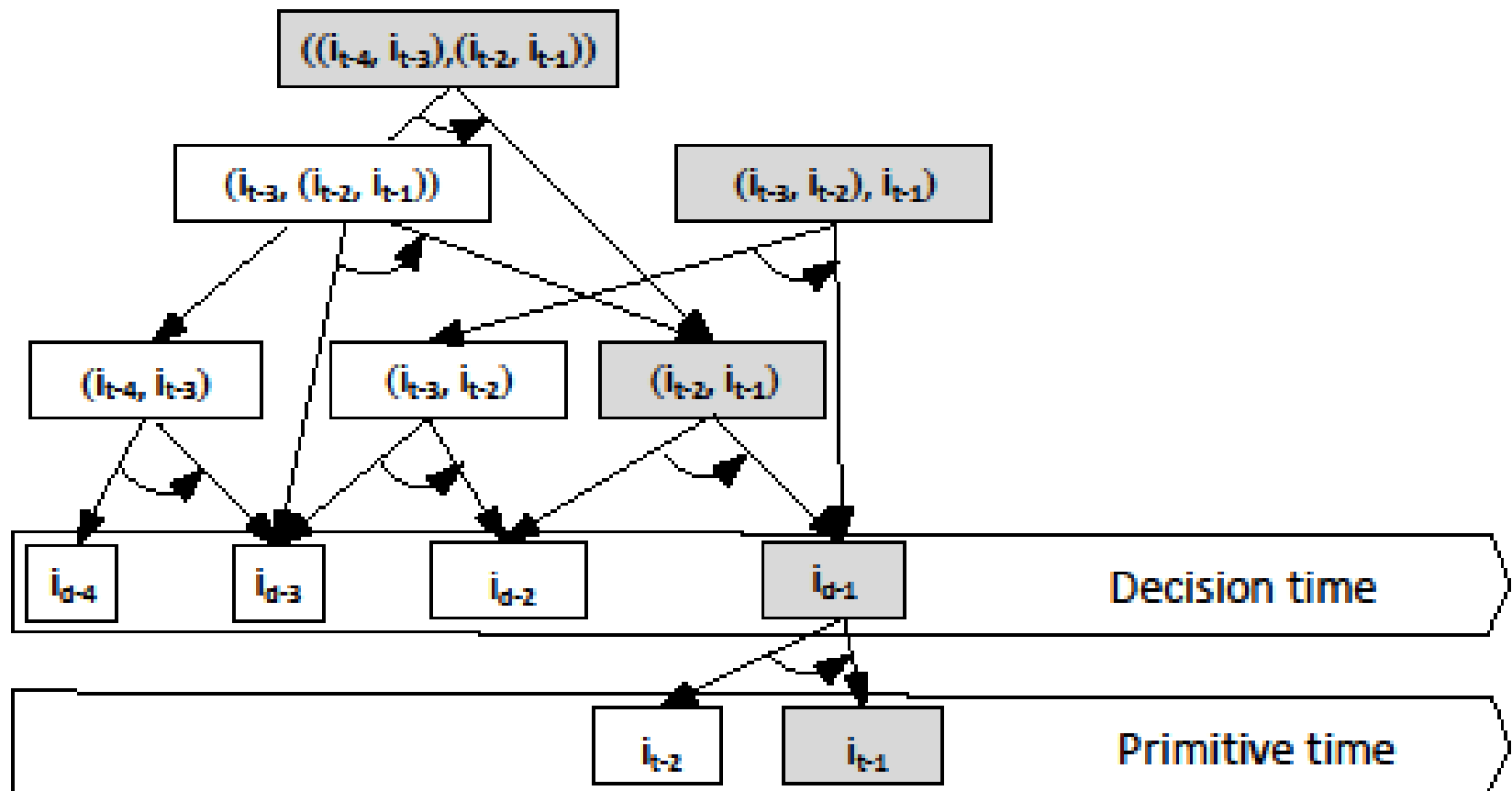


Open-ended process driven by self-motivation

Mécanisme de schéma 2.0



Ré-enaction de séquences

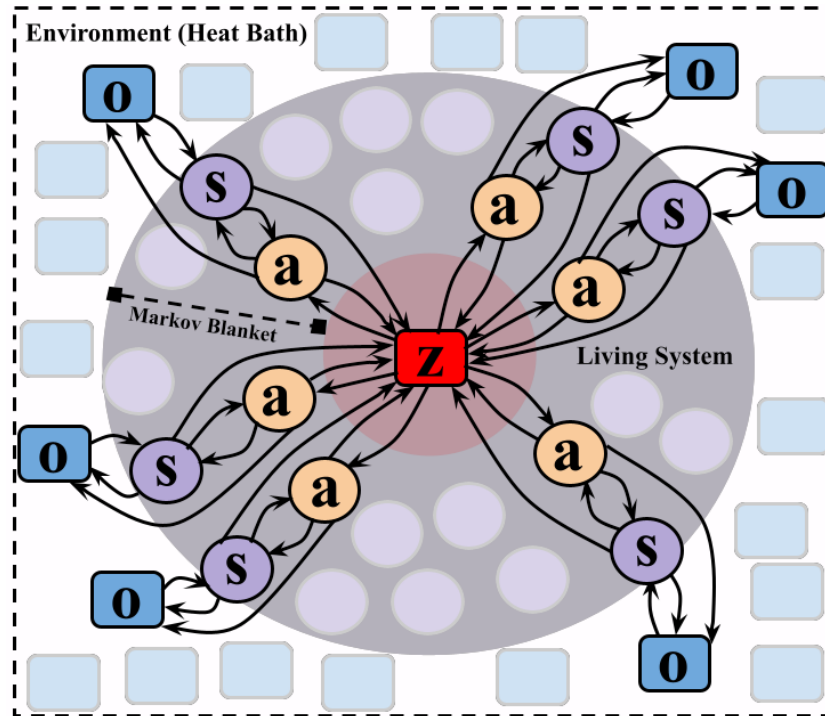


Inférence

Exemple d'inférence

- Poursuivre la série 2, 4, 6, 8
- Modèle inféré:
 - $o_t = 2t \rightarrow o_5 = 10$
 - $o_t = 2t^4 - 20t^3 + 70t^2 - 98t + 48 \rightarrow o_5 = 58$
- “Whatever experiences an organism or mechanism has had, there are infinitely many mutually contradictory generalizations that are consistent with those experiences. Therefore, **any induction apparatus must impose a choice** among those consistent generalizations” (The made up mind: a constructivist approach to artificial intelligence, Drescher, 1991)
- Les tests d'intelligence attendant que le participant infère le modèle “le plus simple” (principe du rasoir d'Ockham)

La couverture de Markov



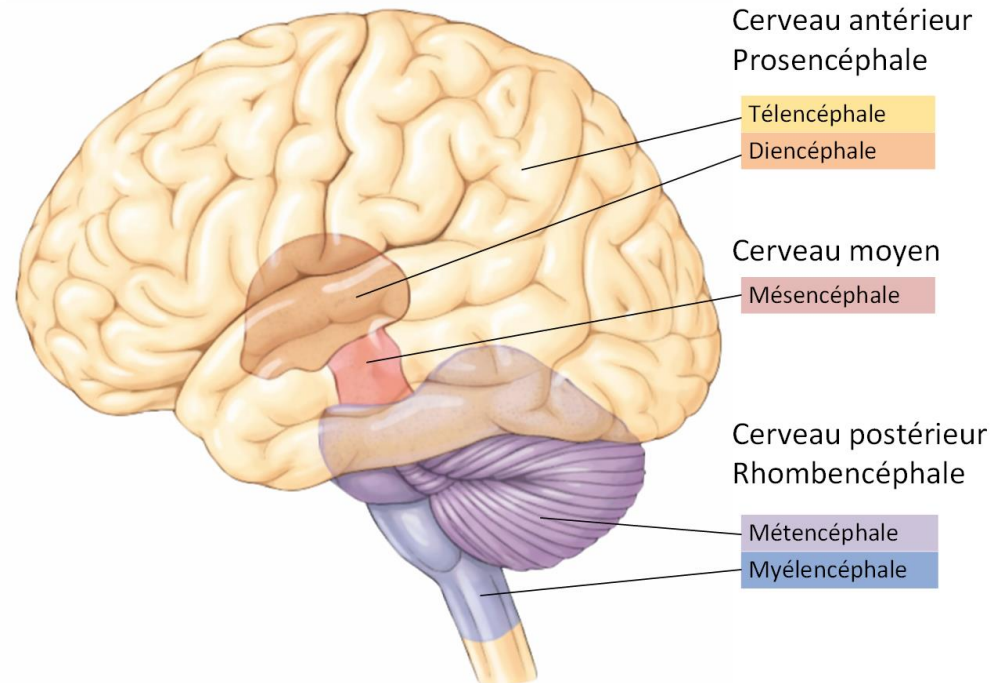
Ororbian and Friston, Mortal computation: A foundation for bio-mimetic intelligence (2024)

Judea Pearl, The book of Why: The new science of Cause en Effects (2018)

Neuro anatomie

<https://www.humanconnectome.org/>

Organisation tripartite du cerveau



• Cerveau antérieur

- Cortex cérébral (télencéphale)
- Hypothalamus. Contrôle des émotions, faim, soif, motivation, désirs

Cerveau moyen

- Intégration multimodale des informations sensorielles et motrices en référentiel égo-centré

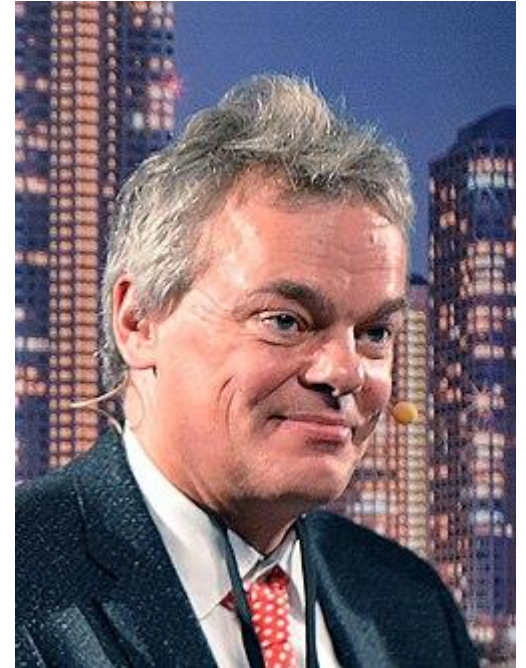
Cerveau postérieur

- Respiration, rythme cardiaque, digestion
- Conscience et reflexes sensorimoteurs
- Coordination des mouvements, équilibre

Deux dimensions traversent tous les niveaux: la dimension affective et la dimension spatio-temporelle

Edvard Moser

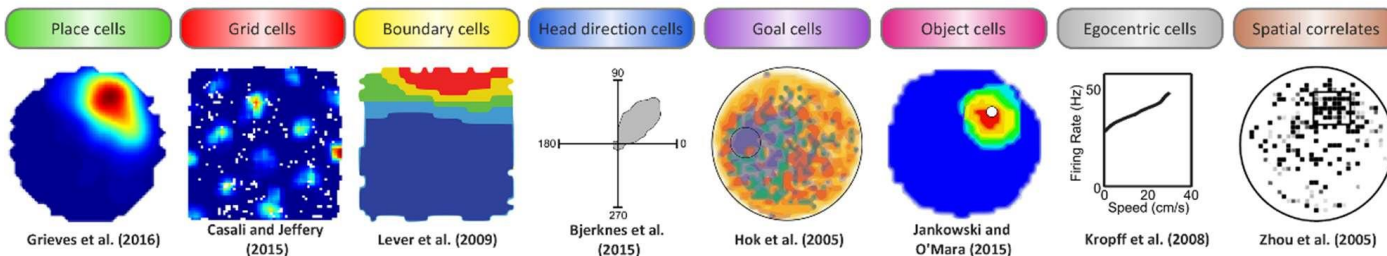
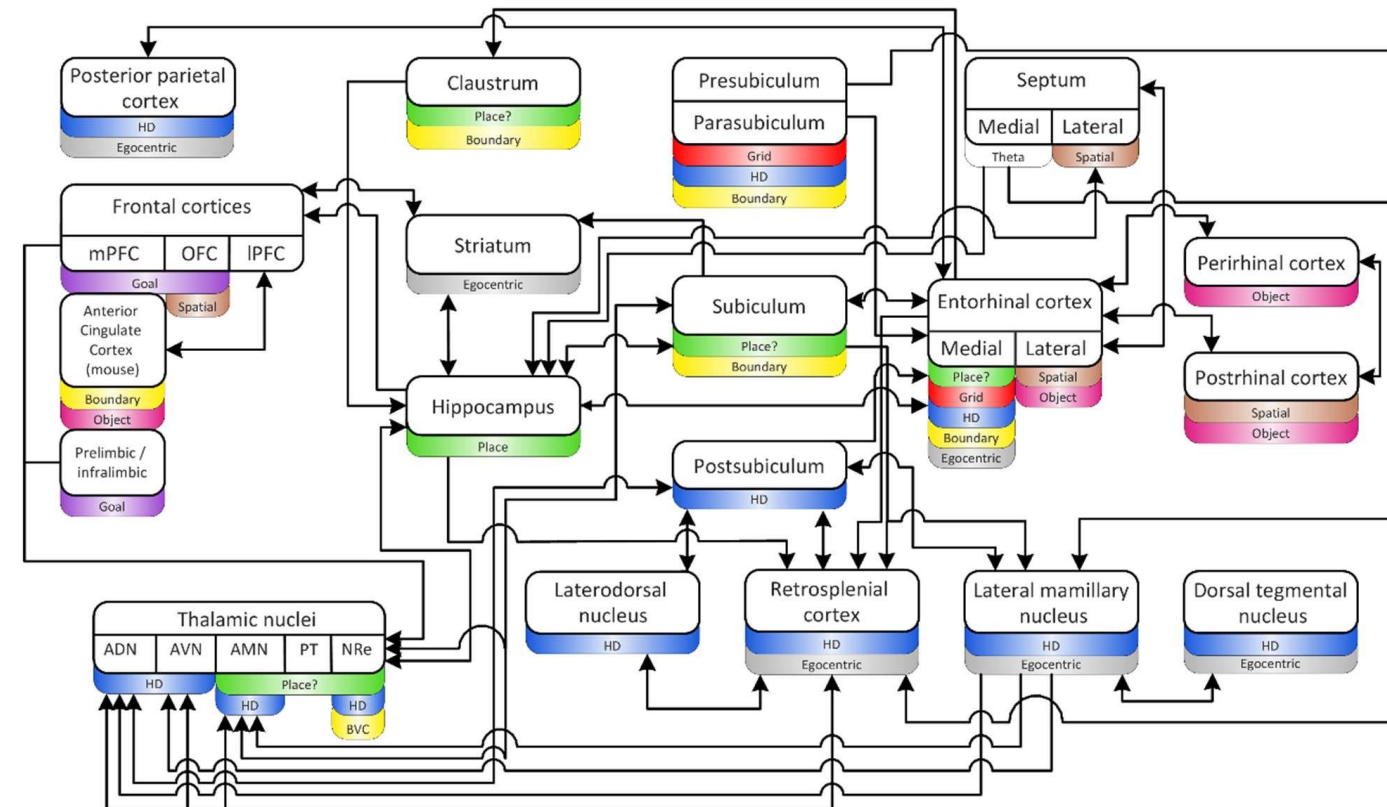
- Prix Nobel de médecine 2014
 - Découverte des grid cells



The neuronal algorithms underlying navigation in real and mental space are fundamentally the same (Buzsáki et Moser 2013)

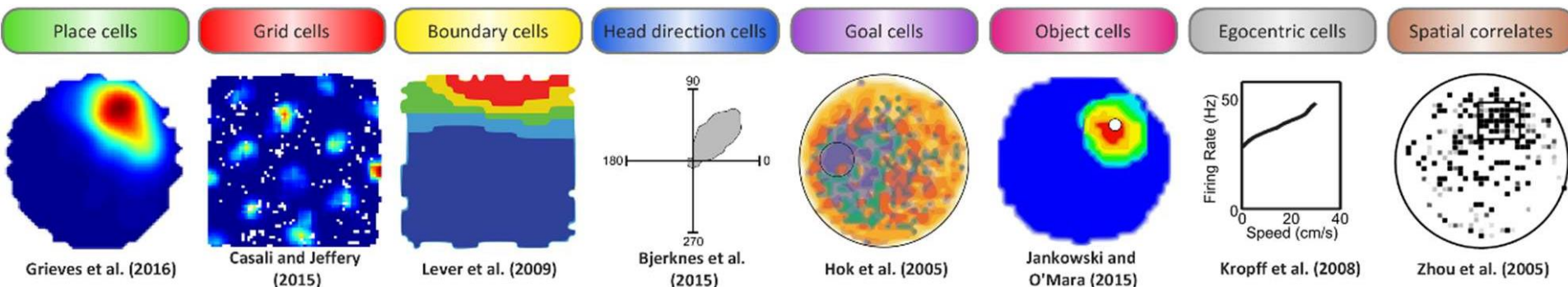
Espace et temps dans le cerveau

Grieves & Jeffery 2017



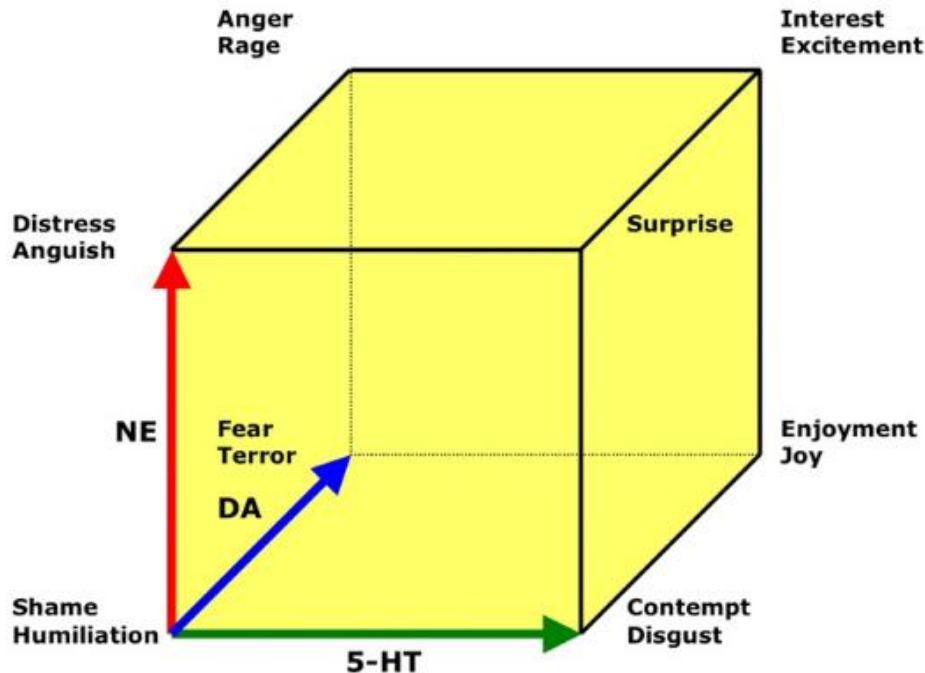
Encodage de l'espace

- Place cells
 - Réseau de positions
- Grid cells
 - Integration de trajectoire
- Head direction cells
- Boundary cells
 - Bordures de l'environnement
- Goal cells
 - Objectif spatial



Emotions

« Cube of émotions » Lovheim (2024)



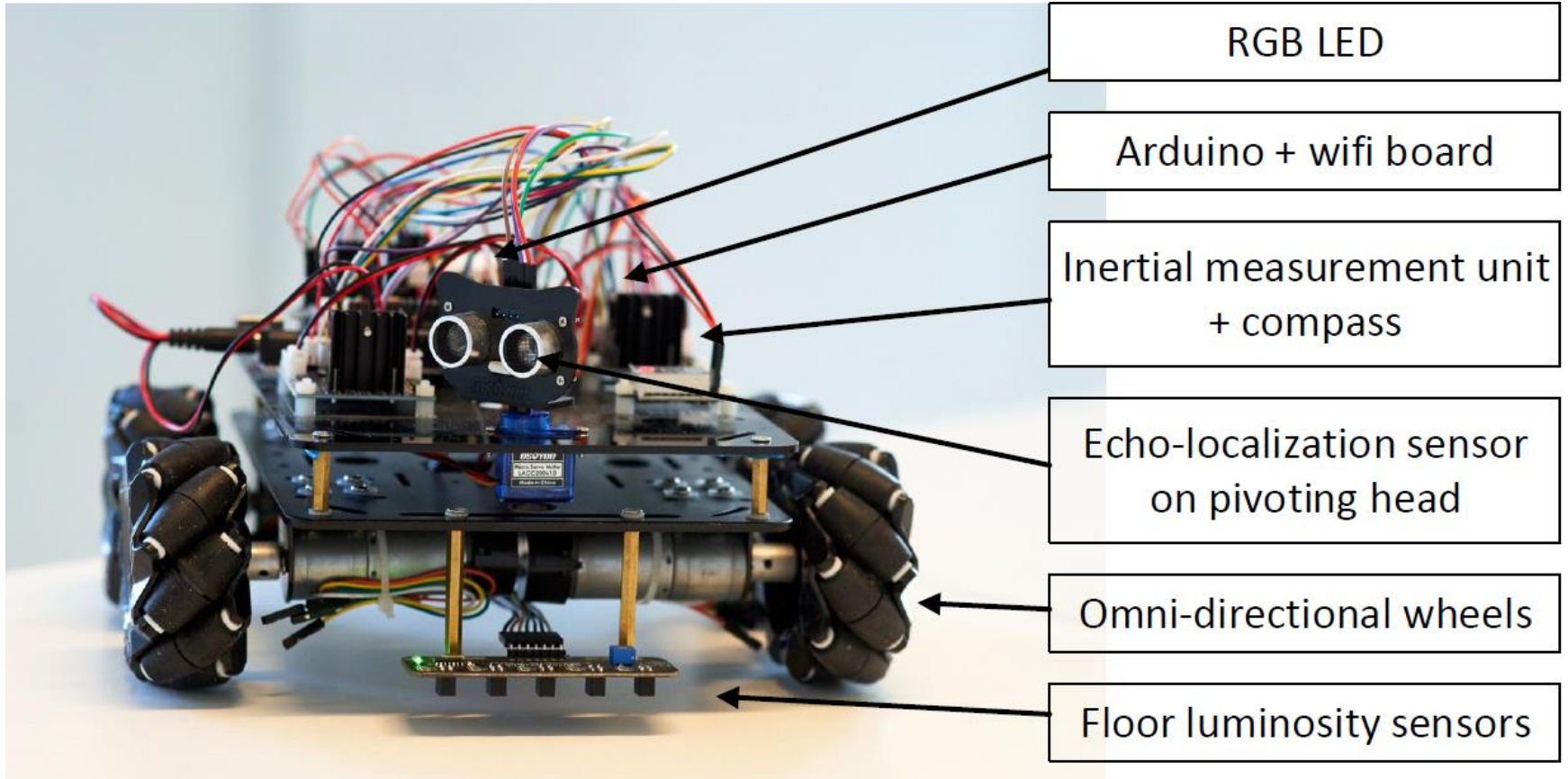
- **Serotonine (5-HT)**
 - Confiance en soi. Calme
 - vs. Découragement, détresse
- **Dopamine**
 - Expériences marquantes (positives ou négatives)
 - vs. Expériences fades
- **Noradrenaline (NE)**
 - Vigilance
 - vs. Sidération ou béatitude

L'état émotionnel neutre est au centre du cube

Lövheim, H. (2024). A new three-dimensional model for emotions and monoamine neurotransmitters.

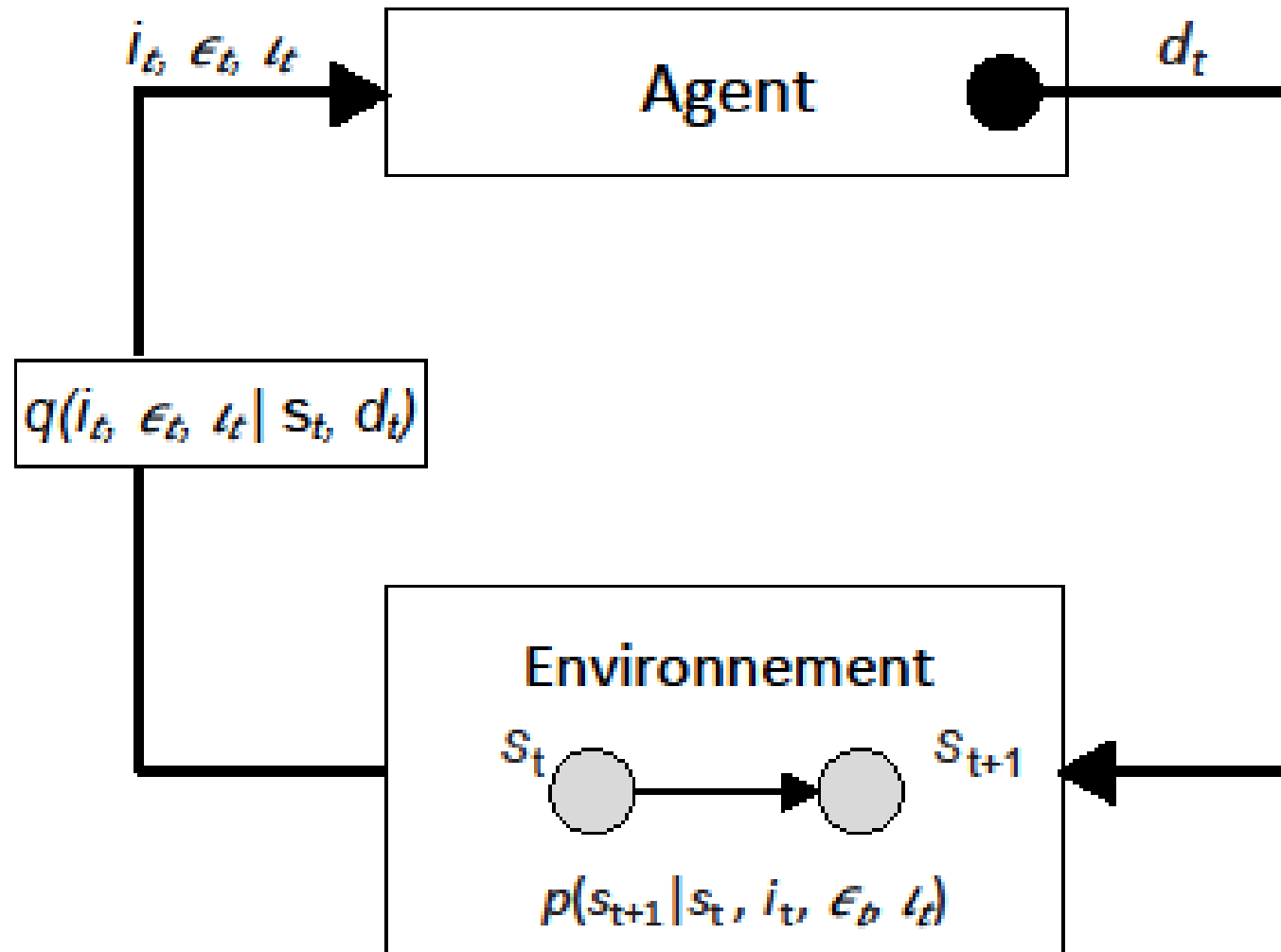
Robotique développementale

Petitcat

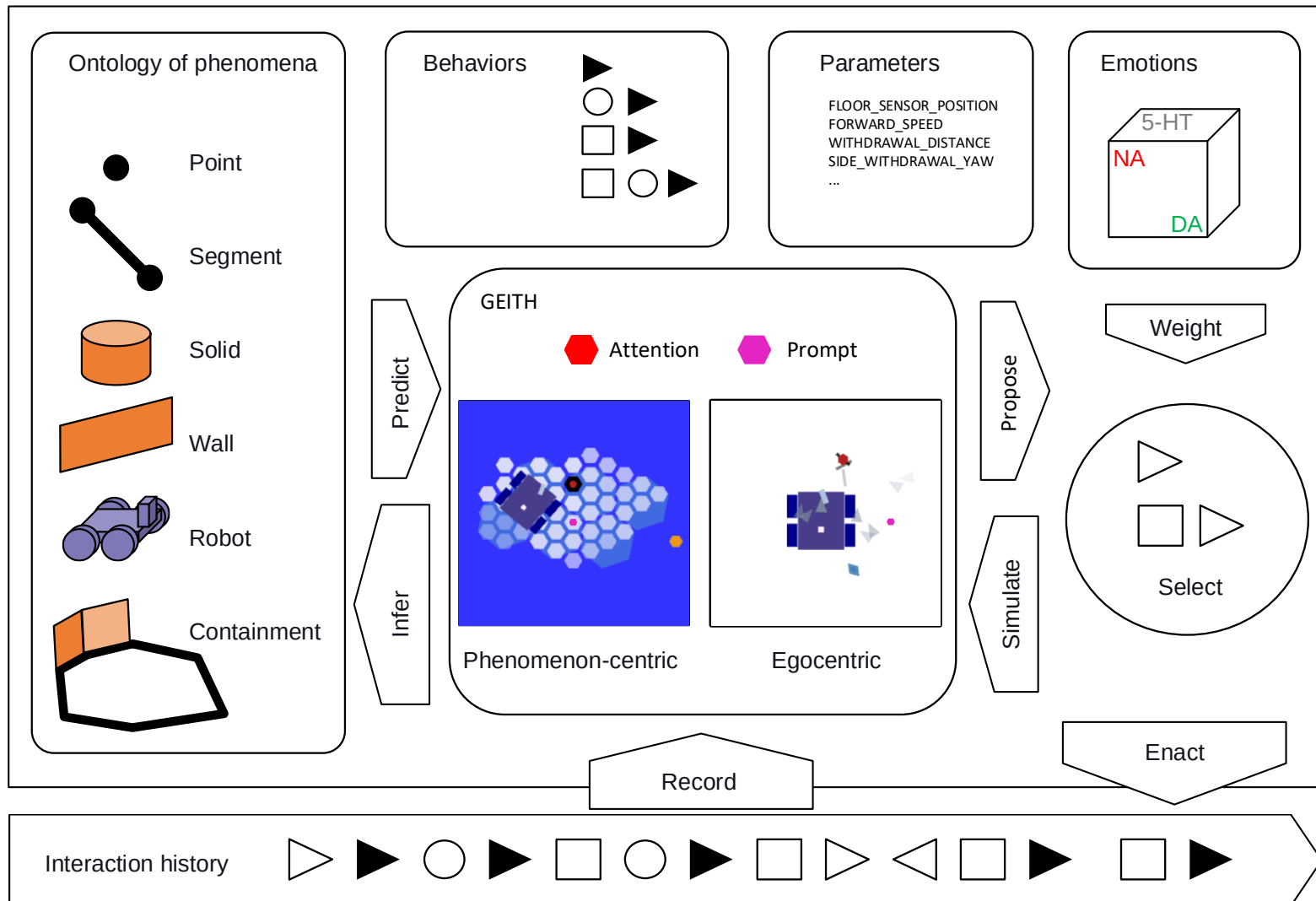


<https://github.com/PetiteIA/petitcat>

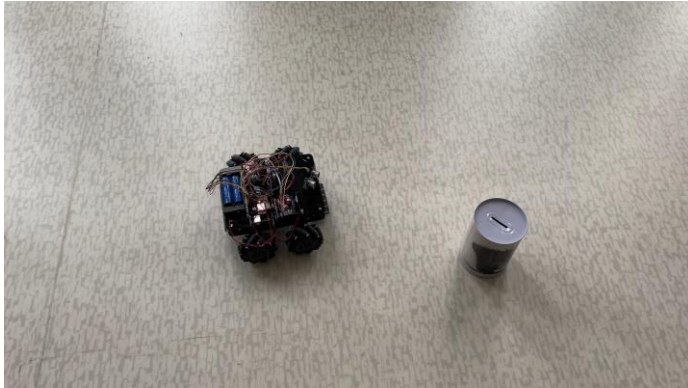
Spatial enactive decision process



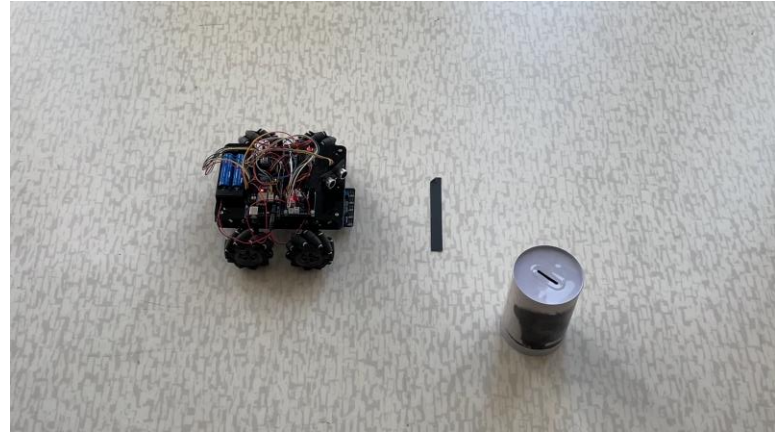
Cognitive architecture



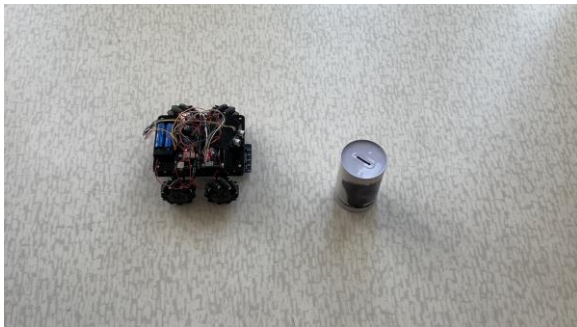
Primitive interactions



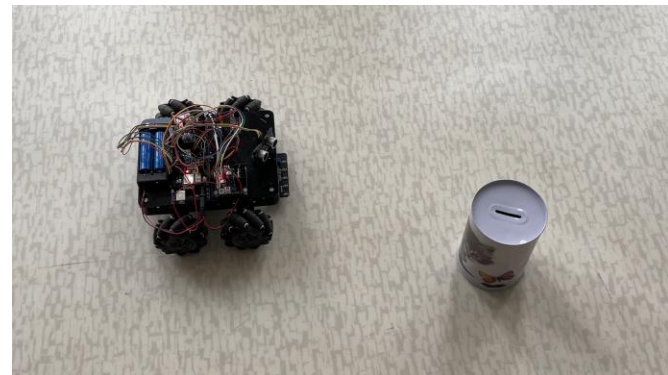
Move_forward with focus



Move forward – line_front

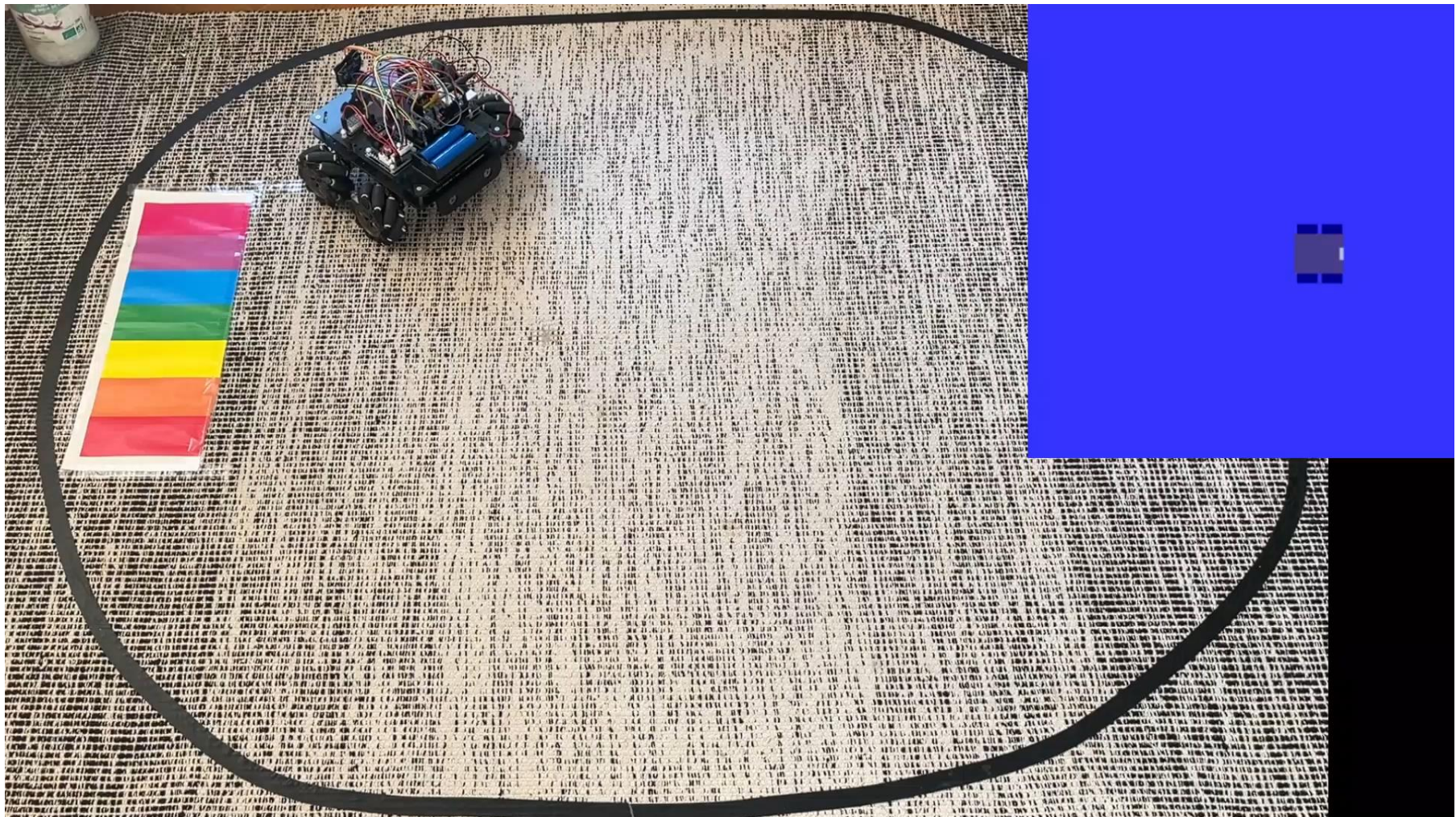


Sweep_right with focus



Scan

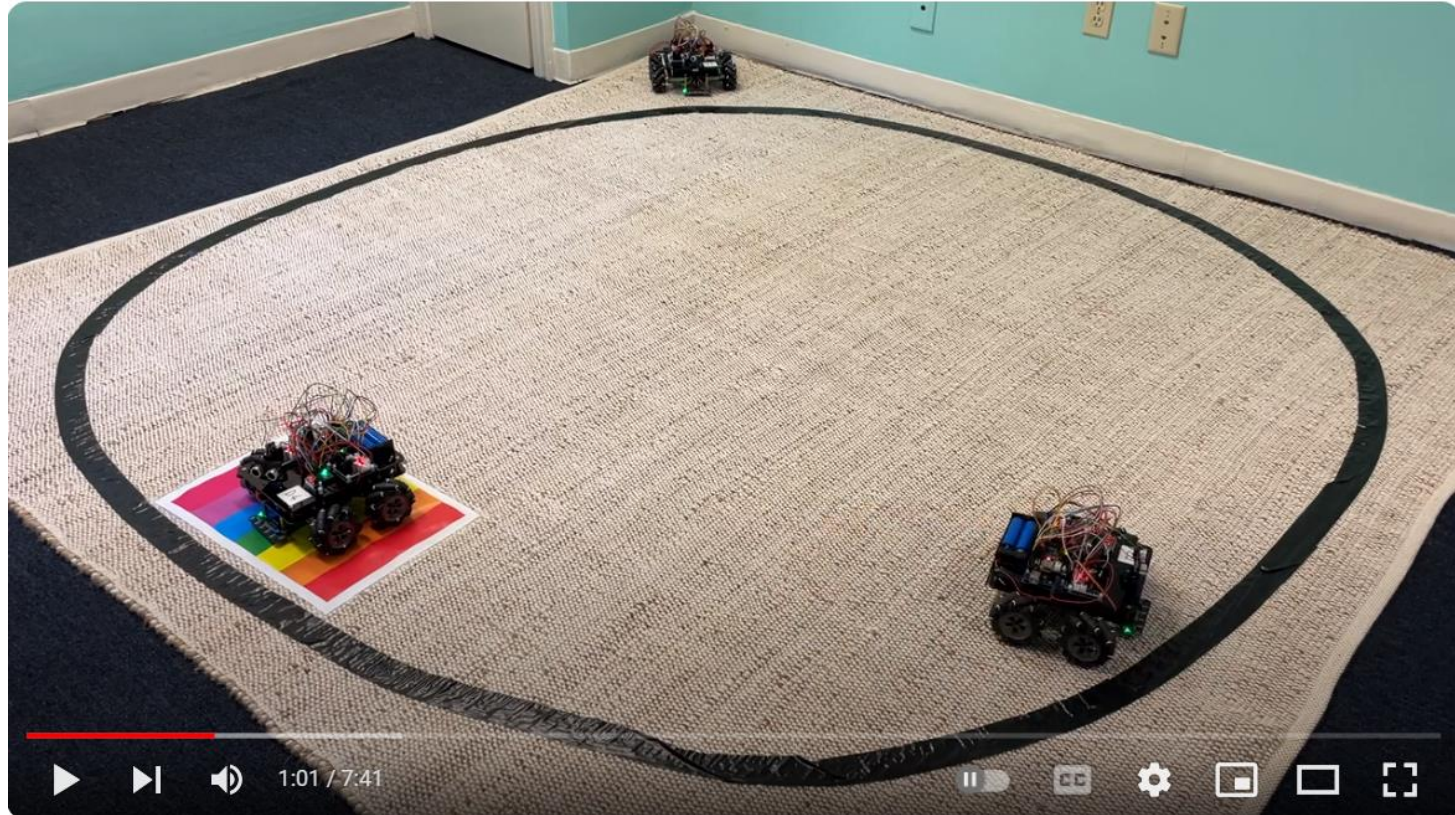
Demonstration



<https://youtu.be/1NpKXTZcqSo>

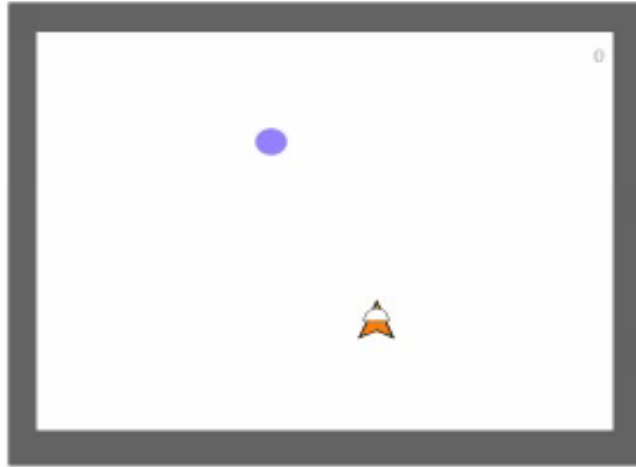
olivier.georgeon@gmail.com

Comportements sociaux



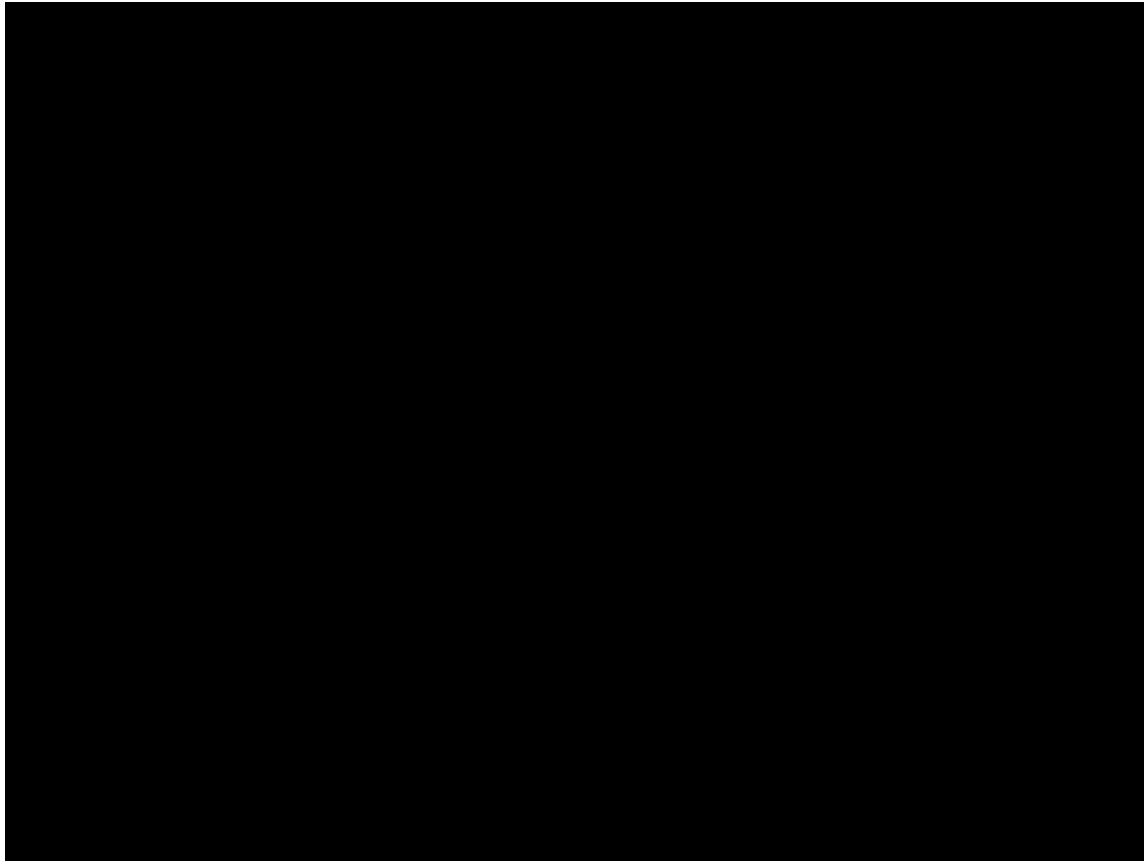
<https://youtu.be/oOZ4SGSWYDs?si=e-LxyWgXgh5ehBLP>

ECA agent exemple 2



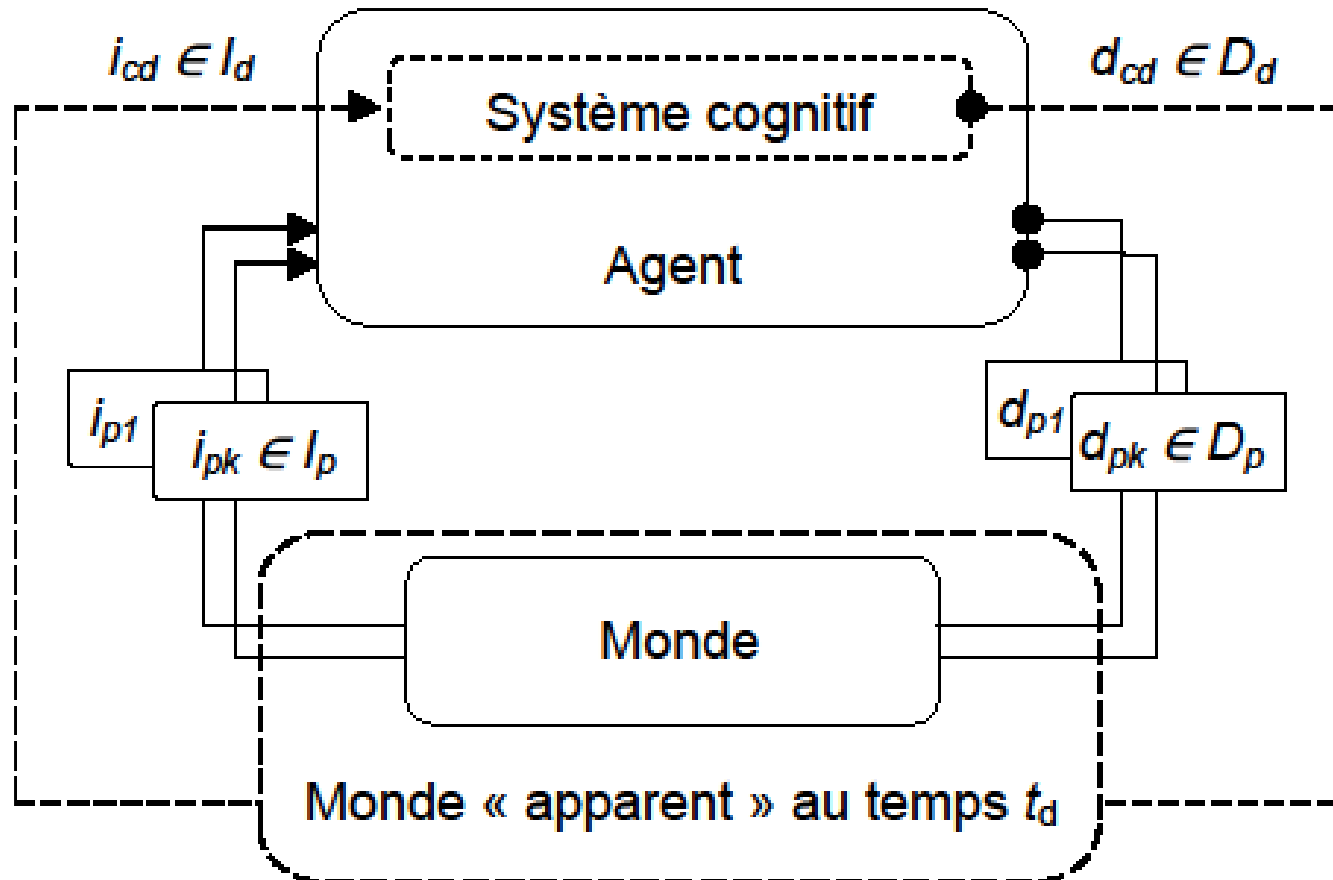
Environnement continu

https://youtu.be/LjOck5ts_2g



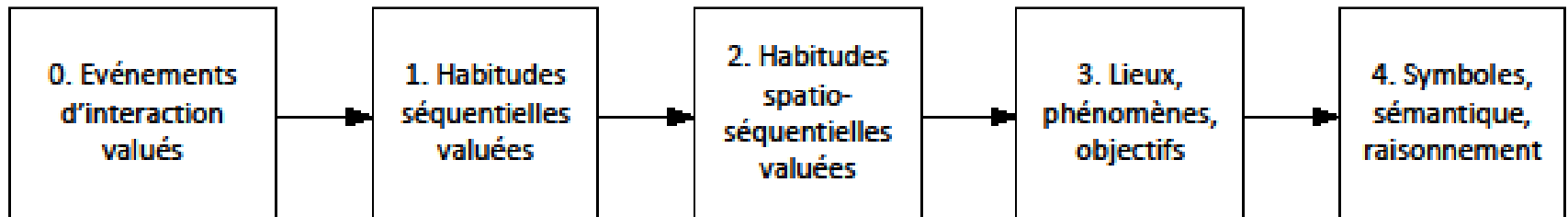
Conclusion

Autonomie constitutive



Perspectives

Programme de recherche de l'IA développementale



Intelligence artificielle développementale précoce (Georgeon HDR)

<https://github.com/OlivierGeorgeon/HDR/blob/master/HDR.pdf>

Auto programmation

Un système auto-programmant est un système capable d'apprendre du code qu'il peut ré-exécuter.

Cela pose de nombreuses questions:

- Quel jeu d'instructions?
- Quel moteur d'exécution?
- Quelle finalité?
 - Pourquoi apprendre un programme plutôt qu'un autre?

Travaux dirigés

Consignes pour les TP

- Par groupe de 2.
- Rendre un seul rapport à la fin .PDF
- Indiquer bien le nom des deux membres du groupe
- Envoyer par mail à olivier.georgeon@gmail.com pour le **vendredi 24 octobre 2024** 23h59
- Pour chaque agent 1 à 3
 - Décrire les principes de l'algorithme que vous avez implémenté
 - Inclure des captures d'écran des traces affichées à la console dans différents environnements
 - Expliquer les comportements obtenus en vous appuyant sur les traces.
- Conclure sur ce que vous retirez de cette expérience et suggestions de comment aller plus loin

Agent 2

Deux actions possibles $A = \{0, 1\}$

Deux outcome possibles $O = \{0, 1\}$

Quatre interactions possibles $I = A \times O = \{00, 01, 10, 11\}$

Environnement

- $\text{env}_1: 0 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1$ (01 et 10 ne se produisent jamais)
- $\text{env}_2: 0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ (00 et 11 ne se produisent jamais)

Implémenter un agent qui sélectionne les interactions qui ont une valence positive (s'il en existe) sans connaître a priori son environnement (env_1 ou env_2).

Il change d'action quand il commence à s'ennuyer

Produire un rapport d'analyse de comportement basés sur les traces.

Setup

Suivre la procédure écrite dans README.md:

<https://github.com/OlivierGeorgeon/Developmental-AI-Lab>

Vous avez deux méthode possibles :

1. Cloner (ou downloader) le repository
2. Ouvrir les notebook avec Google.colab ou un autre outil online

Méthode 1: Exécuter world.py et vérifiez que vous obtenez la trace d'interaction montrées dans les consignes

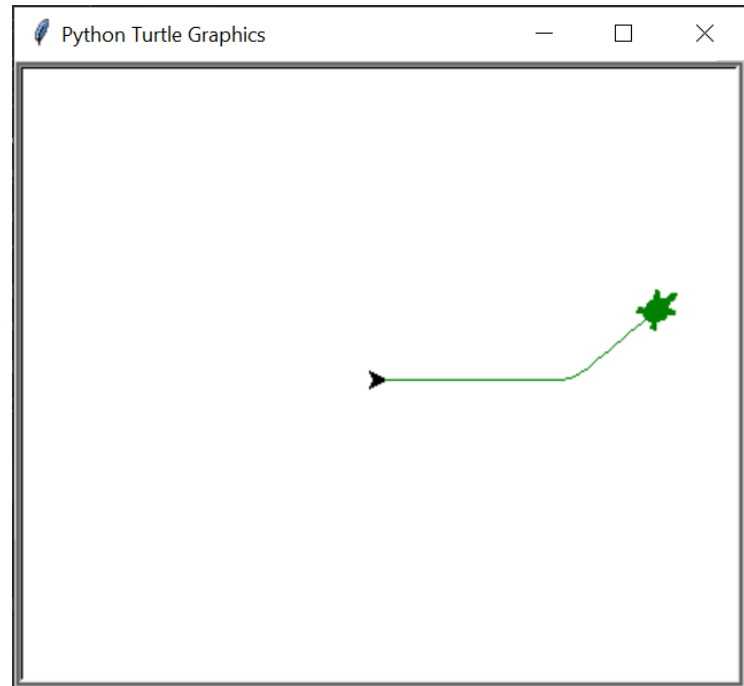
Agent 3

Permettre de choisir parmi trois actions possibles

Tester votre agent dans l'environnement TurtlePy

Choisir des valences qui font que la tortue ne reste pas coincée dans un coin

Observez qu'il faudrait que l'agent tienne compte du contexte pour faire ses prédictions.
Ce sera l'objet de l'Agent 4.



Agent 4

