

**Cours-TD d'introduction
à l'Intelligence Artificielle
Partie VIII**

L'apprentissage Développemental

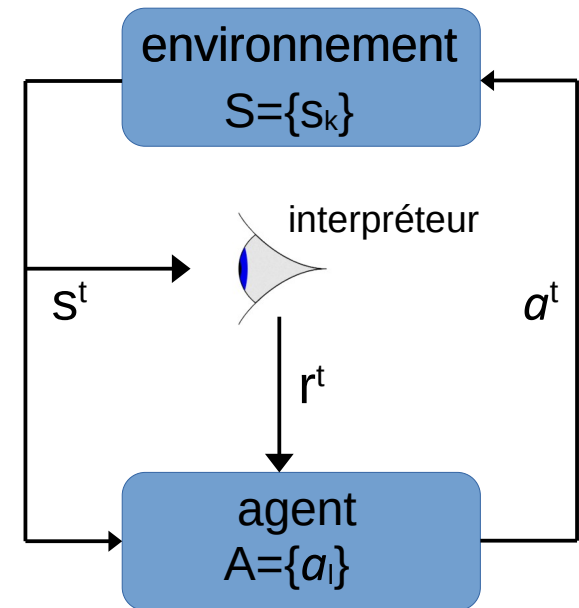
Simon Gay

Introduction à l'Intelligence Artificielle

- **Menu :**
 - Théorie :
 - Bases et principes de l'apprentissage développemental
 - Apprentissage séquentiel
 - Apprentissage spatial
 - Pratique :
 - Un agent qui apprend à chasser

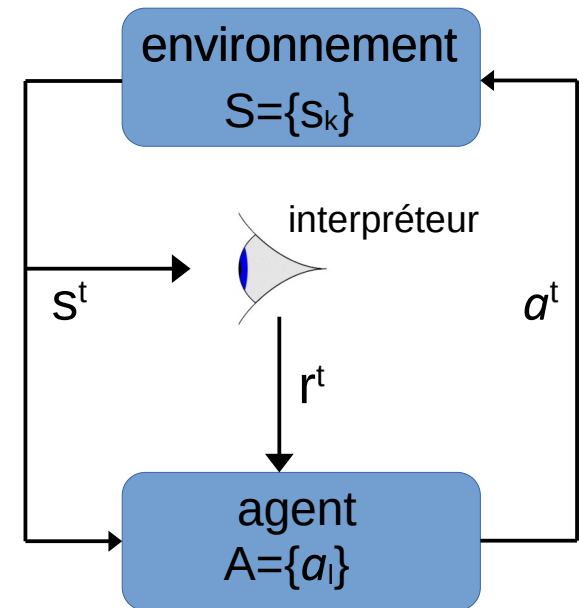
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **Rappel sur l'apprentissage par renforcement :**
 - Un agent qui perçoit l'état de l'environnement
 - L'agent sélectionne et effectue une action
 - Un interpréteur externe attribue une récompense liée à cette action et au changement d'état
- **Particulièrement efficace pour résoudre un problème donné (surtout si associé au deep learning)**



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Quelques critiques par rapport aux êtres vivants :
 - Peut-on vraiment percevoir les états de l'environnement ? (Même partiel : POMDP?)
 - Il faut présupposer les états et les transitions
→ ontologie* définie *a priori*
 - Très difficile à définir pour un environnement réel et ouvert
 - Comment une récompense extérieure pourrait-elle s'exprimer chez les êtres vivants (en dehors du dressage) ?
 - Peut-on définir un but à atteindre ?
 - On ne peut pas définir d'objectifs liés à des critères



*Ontologie : construction de l'être ; dans notre cas, ce que l'agent connaît de son environnement

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Vers des modèles inspirés des êtres vivants :
 - Buts de ces modèles
 - Concevoir des modèles plus autonomes, capable de s'adapter à leur environnement
 - Apprentissage incrémental et ouvert (pas de fin)
 - apprentissage constructiviste : l'agent construit ses connaissances et son modèle de l'environnement pour mieux s'y adapter
 - Tester, éprouver et valider des modèles biologiques pour mieux comprendre le fonctionnement des êtres vivants (*Méthodologie Synthétique*, Pfeifer 2002).

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La Robotique Développementale**

- *Instead of trying to produce a program to simulate the adult mind, why not rather try to produce one which simulates the child's? If this were then subjected to an appropriate course of education, one would obtain the adult brain (Turing, 1950, pp.456)*
- La robotique développementale vise l'étude de mécanismes d'apprentissages qui permettrait à un robot de développer ses capacités sensorimotrices et cognitives par lui-même
- Discipline à l'intersection de l'IA, de la psychologie constructiviste, et des neurosciences
- Notion d'embodiment : le développement émerge de l'interaction entre le robot et son environnement

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

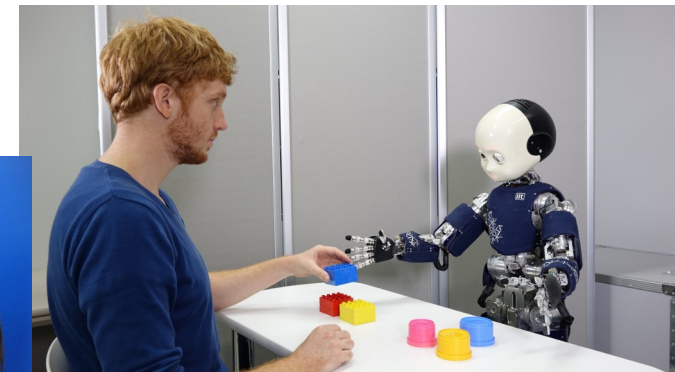
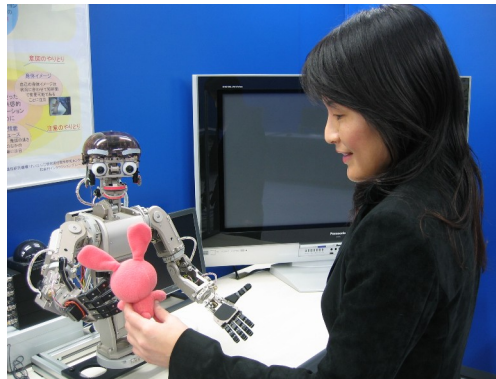
- La Robotique Développementale
 - Modèles d'apprentissage basés sur les phases de développement de l'enfant

PHYSICAL DEVELOPMENT	Average age skills begin	3 months	6 months	9 months	1 year	2 years	3 years	5 years
Head and trunk control	lifts head part way up	holds head up briefly holds head up high and well	holds up head and shoulders	turns head and shifts weight	holds head up well when lifted	moves and holds head easily in all directions		
Rolling		rolls belly to back	rolls back to belly	rolls over and over easily in play				
Sitting		sits only with full support sits with some support	sits with hand support	begins to sit without support	sits well without support	twists and moves easily while sitting		
Crawling and walking		begins to creep	scoots or crawls	pulls to standing	takes steps walks runs	can walk on tiptoe and on heels	walks easily backward	hops on one foot
Arm and hand control	grips finger put into hand	begins to reach towards objects	reaches and grasps with whole hand	passes object from one hand to other	grasps with thumb and forefinger	easily moves fingers back and forth from nose to moving object		throws and catches ball
Seeing	follows close object with eyes	enjoys bright colors/shapes	recognizes different faces	eyes focus on far object	looks at small things/pictures	Sees small shapes clearly at 6 meters (see p. 453 for test).		
Hearing	moves or cries at a loud noise	turns head to sounds responds to mother's voice	enjoys rhythmic music	understands simple words	hears clearly and understands most simple language			

Assessment of Child's Physical Skill Development

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La Robotique Développementale
 - Modèles d'apprentissage de ces différentes étapes sur des robots
 - Développement sensorimoteur
 - Coordination main-œil
 - Se mettre debout
 - Marcher
 - Interactions sociales
 - ...



Cognitive Developmental Robotics Lab,
Univ. of Tokyo

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La Robotique Développementale**

- Motivation intrinsèque (Ryan & Deci, 2000) :

- « Intrinsic motivation is defined as the doing of an activity for its inherent satisfaction rather than for some separable consequence. When intrinsically motivated, a person is moved to act for the fun or challenge entailed rather than because of external products, pressures or reward. »

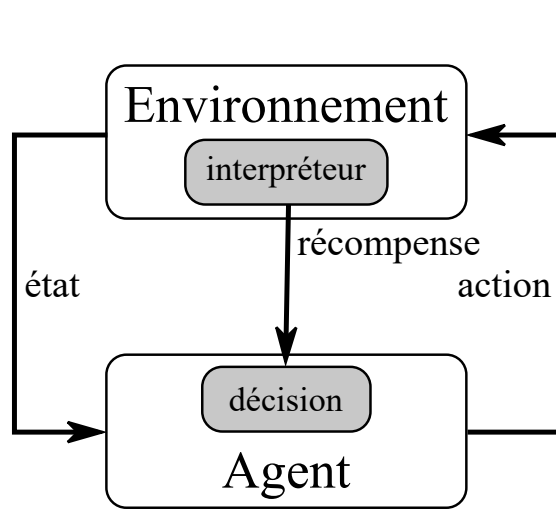
- Forme de motivation pour la sélection de l'action qui provient de mécanismes interne à l'agent : curiosité, apprentissage, challenge...

- inspiration de l'apprentissage chez l'enfant

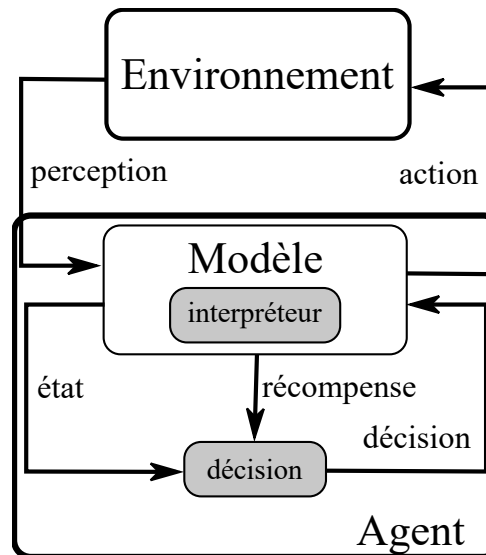
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La Robotique Développementale

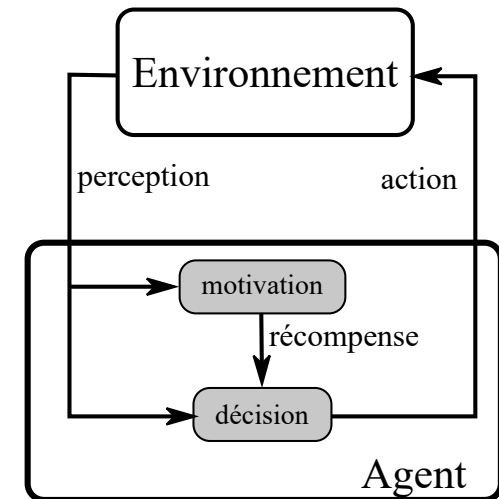
- Motivation intrinsèque :



Motivation extrinsèque



Bartho et al. 2004



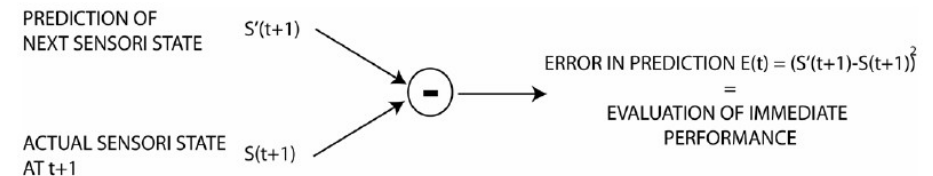
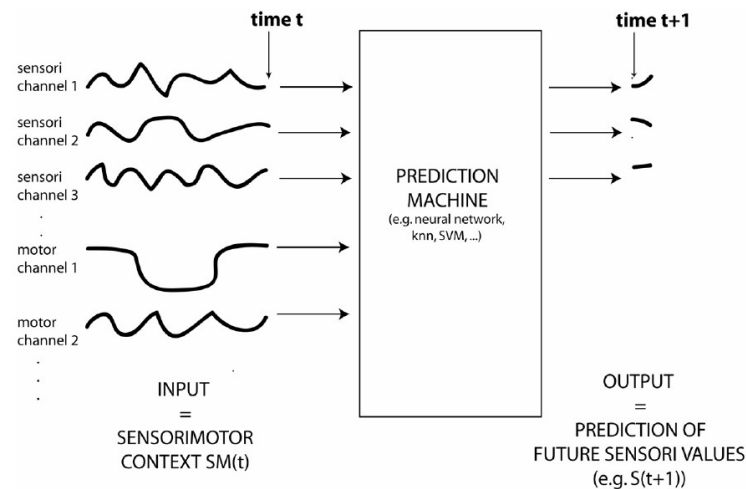
Oudeyer et al. 2007

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La Robotique Développementale**

- Motivation intrinsèque (Oudeyer 2007)

- Mécanisme de décision liée à la curiosité et l'apprentissage sensorimoteur :
 - Forme d'*active learning* (Cohn et al., 1996, Hasenjager and Ritter, 2002)
 - Recherche de nouvelles possibilités sensorimotrices (exploration)
 - Anticipation des résultats observés (apprentissage des prédictions)



What is intrinsic motivation? A typology of computational Approaches, P.-Y. Oudeyer & F. Kaplan, 2007

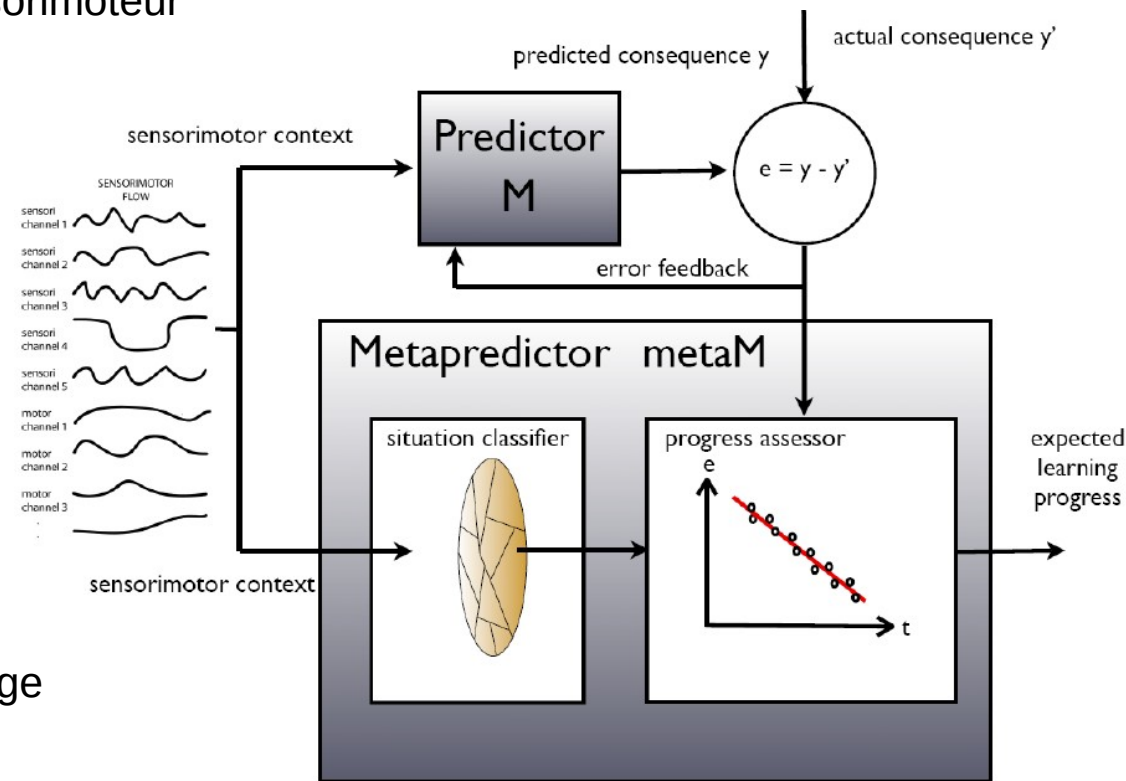
- Malheureusement pas applicable dans le monde réel

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La Robotique Développementale**

- Motivation intrinsèque (Oudeyer 2007)
 - Segmentation de l'espace sensorimoteur
 - Le système de motivation ('meta-prédicteur') segmente et classe les situations sensorimotrices
 - Analyse de l'évolution de l'erreur par classe sensorimotrice
 - Favorise les actions qui permettent un apprentissage rapide

- Ce système favorise un apprentissage sensorimoteur ...
- ...mais permet aussi de définir des fonctions sensorimotrices



Kaplan, F. and Oudeyer, P-Y. (2007) Un robot motivé pour apprendre : le rôle des motivations intrinsèques dans le développement sensorimoteur, *Enfance*, 1, pp. 46--5

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

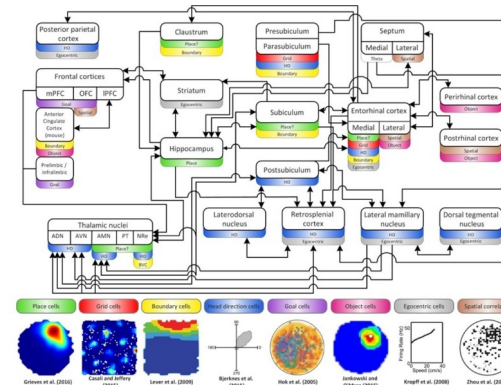
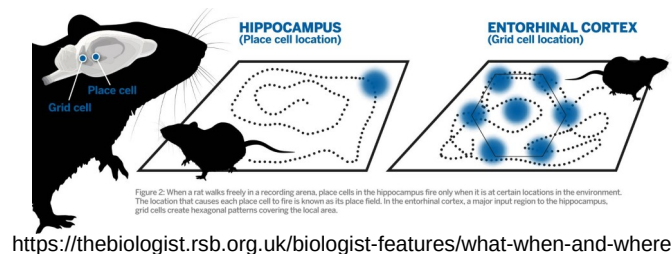
- **La Robotique Développementale**
 - Motivation intrinsèque (Oudeyer 2007)



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La Robotique Développementale**

- Problème : le modèle humain (ou n'importe quel mammifère) complet reste encore hors de portée



Modèle de navigation chez le rat

- Hypothèse : étudier des modèles biologiques beaucoup plus simples, pour lesquels un développement complet peut être envisagé

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

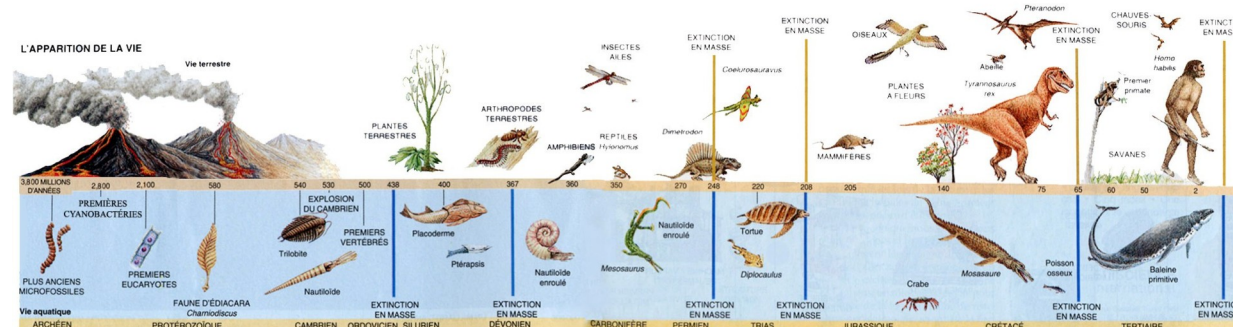
- L'Intelligence Développementale

- Hypothèse :

- développement de mécanismes d'apprentissages inspirés de modèles biologiques simples, permettant à un agent de se développer dans son environnement (développement individuel : ontogénèse)



- Complexifier progressivement l'agent et les mécanismes pour concevoir des agents de plus en plus élaborés (évolution phylogénétique)

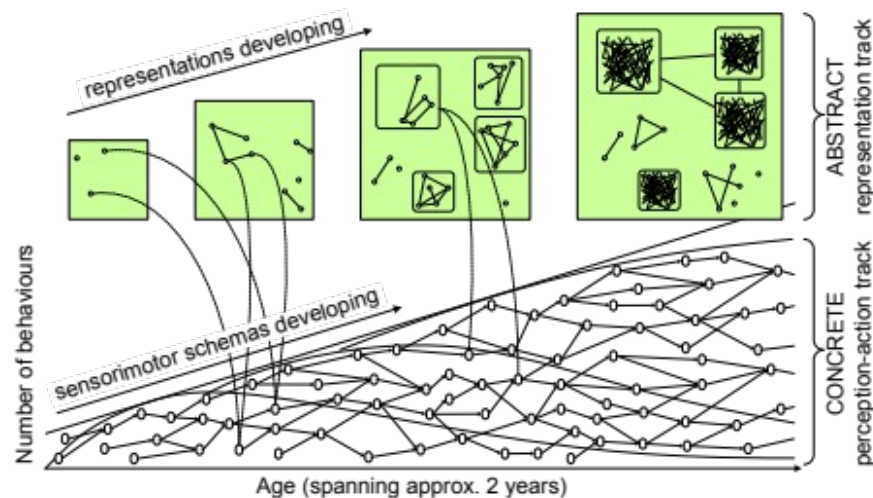


Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale

- Hypothèse :

- Construire des connaissances, des modèles de l'environnement et de comportements de façon incrémentale
 - Chaque connaissance acquise servira à générer des comportements plus élaborés.



Conceptual diagram of developmental learning (Guerin, Krüger, and Kraft, 2013)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

Modèle IMOS

(Intrinsically Motivated Schema),

Georgeon 2009

<http://www.oliviergeorgeon.com>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale : quelques notions théoriques
 - L'interaction
 - « *L'intelligence (et donc l'action de connaître) ne débute ni par la connaissance du moi, ni par celle des choses comme telles, mais par celle de leur interaction ; c'est en s'orientant simultanément vers les deux pôles de cette interaction qu'elle organise le monde en s'organisant elle-même* » (Piaget 1954)
 - l'apprentissage ne dépend ni de l'agent, ni de l'environnement, mais du couplage entre les deux (*embodiment*)
 - Observations sur les expériences de substitution sensorielles (Bach-y-Rita 1972) : les participants ne comprennent leur environnement que si ils peuvent bouger eux-même la caméra.

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale : quelques notions théoriques
 - L'interaction
 - La perception est intimement liée à l'action, et ne peut pas en être séparée (O'Regan 2011)
 - La souplesse d'un objet ne peut être perçue qu'en exerçant une pression.
 - La perception doit être considérée comme un résultat de l'action et non comme un contexte à un instant t (ou *état*)
 - L'agent expérimente son environnement aux travers des interactions qu'il effectue avec son environnement
 - Le modèle IMOS repose entièrement sur un échange expérience-résultat, plutôt que sur un principe perception-action

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

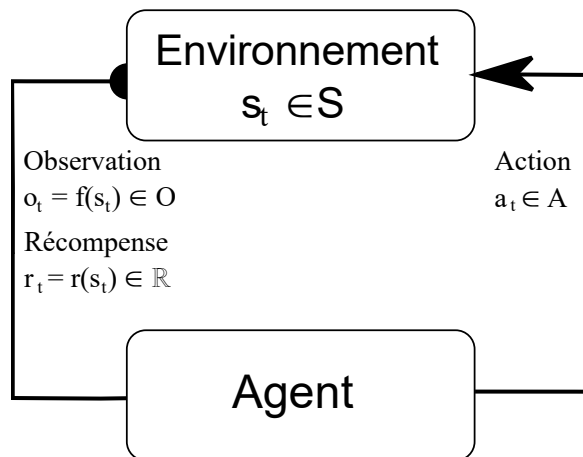
- **L'Intelligence Développementale : Le modèle Radical Interactionism (RI)**
 - Côté agent :
 - Un ensemble I d'interactions (couples action-résultat)
 - Côté environnement :
 - Un ensemble S d'états (l'agent n'y a pas accès !)
 - Un ensemble de règles $P(j | i, S)$
 - Probabilité d'un résultat j quand l'agent tente l'interaction i dans un état S
 - Ces règles définissent des régularités d'interaction avec l'environnement que l'agent va devoir découvrir et maîtriser
- } 'moteur physique' de l'environnement
(inutile de définir S et P en pratique)
- L'agent n'a aucun accès ni aucune connaissance à priori de son environnement
 - Principe d'agnosticisme environnemental : pas d'ontologie définie *a priori*
 - La complexité de l'agent dépend uniquement de I (complexité du système sensorimoteur) et non de S (complexité de l'environnement)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

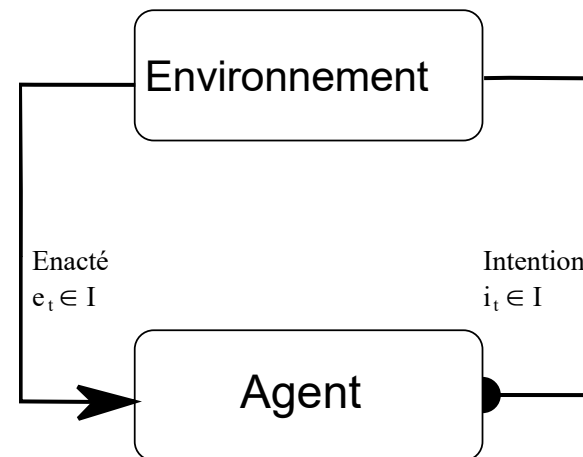
- **L'Intelligence Développementale : Le modèle Radical Interactionism (RI)**
- Motivation intrinsèque (obligatoire car environnementalement agnostique)
 - Curiosité : l'agent cherche à comprendre son environnement et à le maîtriser
 - Valeur de l'expérience liée à sa réussite ($e = r$) ou son échec ($e \neq r$)
 - Motivation interactionnelle : chaque interaction dispose d'une valeur de satisfaction (ou *valence*) innée qui définit les préférences de l'agent
 - L'agent *expérimente* cette satisfaction quand l'interaction est effectuée
 - L'agent va devoir se placer dans des situations où les interactions à forte valeur de satisfaction sont possibles

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale : Le modèle Radical Interactionism (RI)



Reinforcement Learning



Radical Interactionism

- Le cycle de décision débute par une intention de l'agent et non par une perception : modèle expérience-résultat plutôt que perception-action
- Pas d'accès aux états de l'environnement (agnosticisme environnemental)
- Motivation intrinsèque (curiosité et motivation interactionnelle)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **L'Intelligence Développementale : quelques notions théoriques**
 - Le Scheme sensorimoteur (Piaget 1954)
 - Pour Piaget, l'enfant se développe en construisant des relations entre les interactions : chaque séquence devient un scheme sensorimoteur
 - Ces schemes peuvent ensuite être utilisés comme des interactions ou combinées pour former des schemes plus complexes
 - Construction hiérarchique de schemes de complexité croissante (exemple : marche)
 - Principe d'*épistémologie constructiviste* (Piaget 1954) : c'est en organisant les interactions que l'agent construit sa compréhension de son environnement.

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **L'Intelligence Développementale : le système IMOS**
 - Le mécanisme IMOS repose sur la construction et l'exploitation de schémas sensorimoteurs
 - Un schéma est une séquence d'interactions
 - Ces séquences sont considérées comme des interactions que l'agent peut utiliser comme une interaction 'primitive'
 - Ces schémas sont utilisés pour :
 - caractériser le contexte courant de l'agent
 - Faire des prédictions sur les interactions possibles
 - Prendre des décisions à un plus haut niveau d'abstraction

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : exemples



Un environnement

Exemple : 6 actions possible



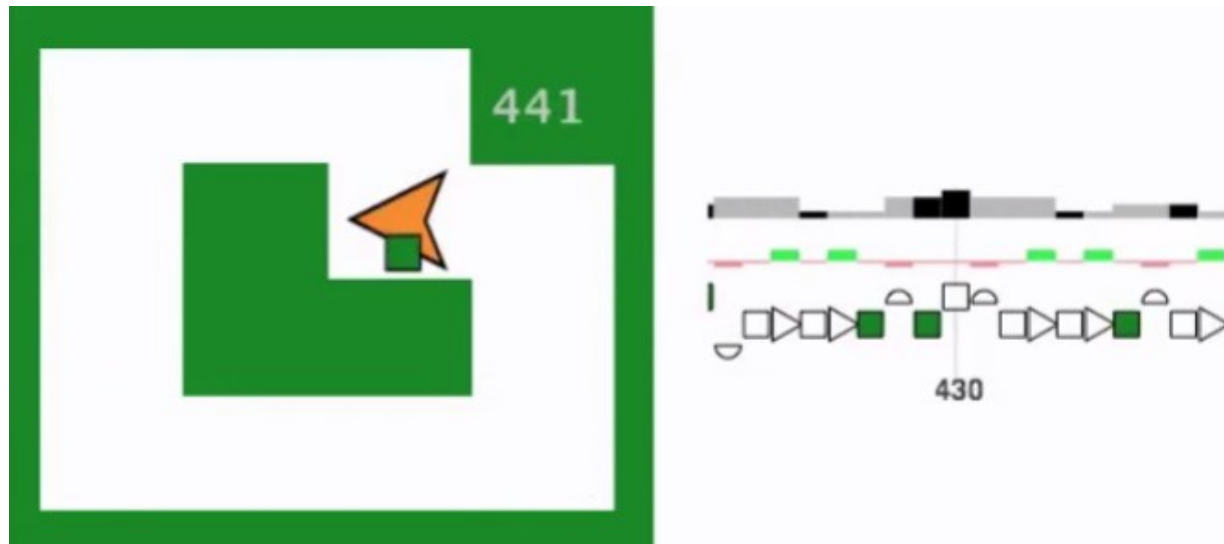
2 feedbacks possibles



Un ensemble d'interactions

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale : le système IMOS

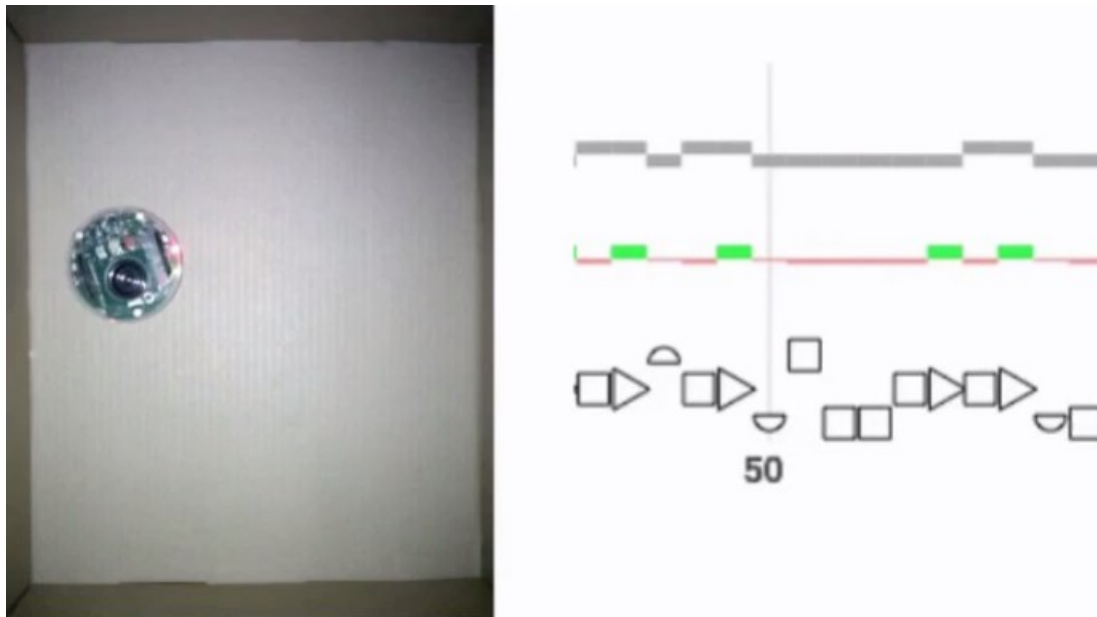


<https://www.youtube.com/watch?v=5eojg02-dPE&t=339s>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'Intelligence Développementale : le système IMOS

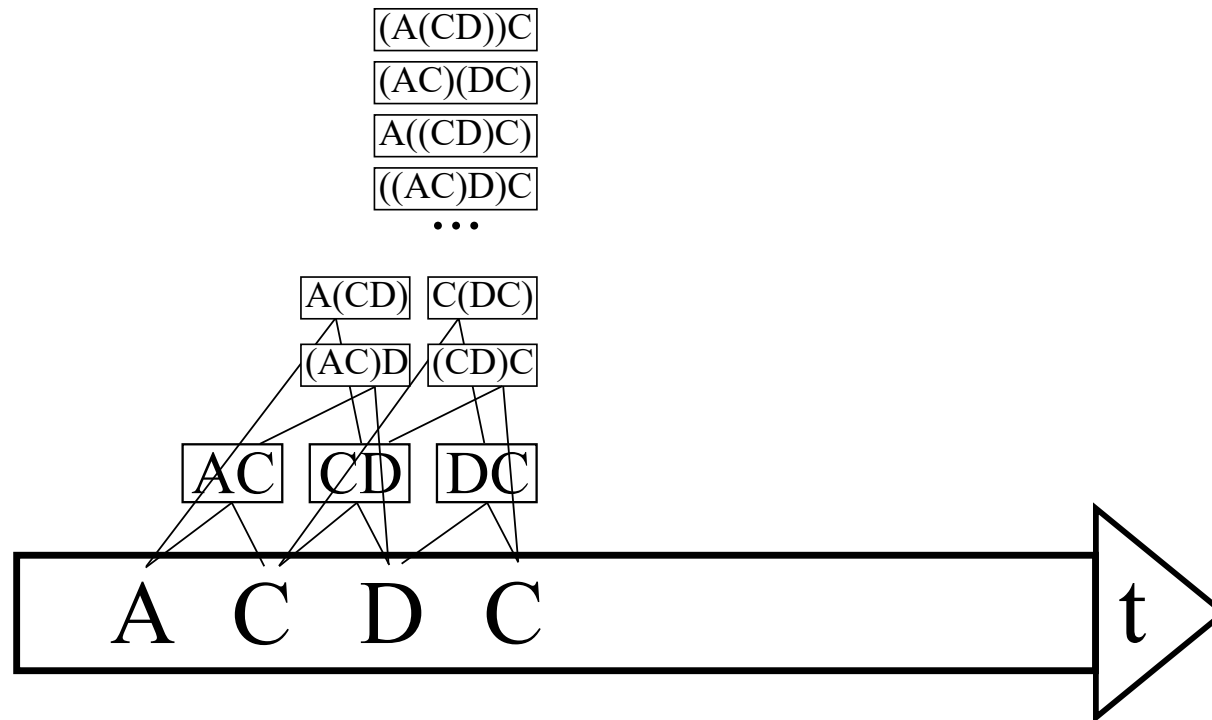
Fonctionne également en environnement réel



<https://www.youtube.com/watch?v=5eojg02-dPE&t=339s>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

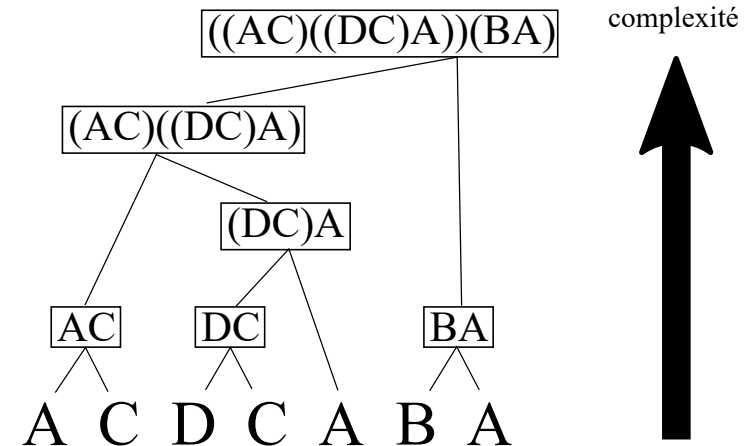
- Le système IMOS : construction des schémas sensorimoteurs (théorie)
 - L'agent dispose d'un ensemble $I = \{ A, B, C, D \}$ interactions primitives
 - Les interactions effectuées sont stockés sur une timeline



- Un schéma est une séquence d'exactly deux interactions
- Le schéma est ajouté à l'ensemble I des interactions (et sur la timeline)
- Un schéma peut être utilisé pour construire un schéma plus complexe

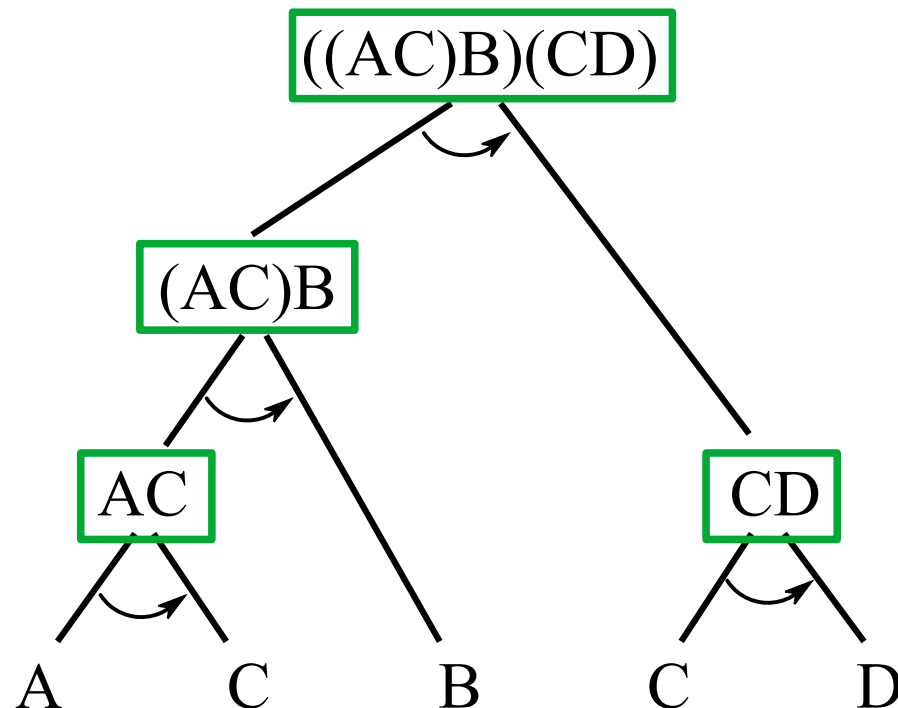
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **Le système IMOS : construction des schémas sensorimoteurs (théorie)**
 - Un schéma est une séquence de deux interactions ou schémas :
 - (contexte , proposition)
 - La valeur de satisfaction d'un schéma est la somme des valeurs des deux éléments qui le composent.
 - Les liens entre les schémas définissent des interactions de complexité croissante
 - Le nombre de schémas peut croître très rapidement. Différentes règles peuvent limiter leur 'prolifération' :
 - Utiliser un seuil sur le nombre d'activations
 - Borner la longueur des schémas
 - Utiliser le ratio succès/échec
 - ...



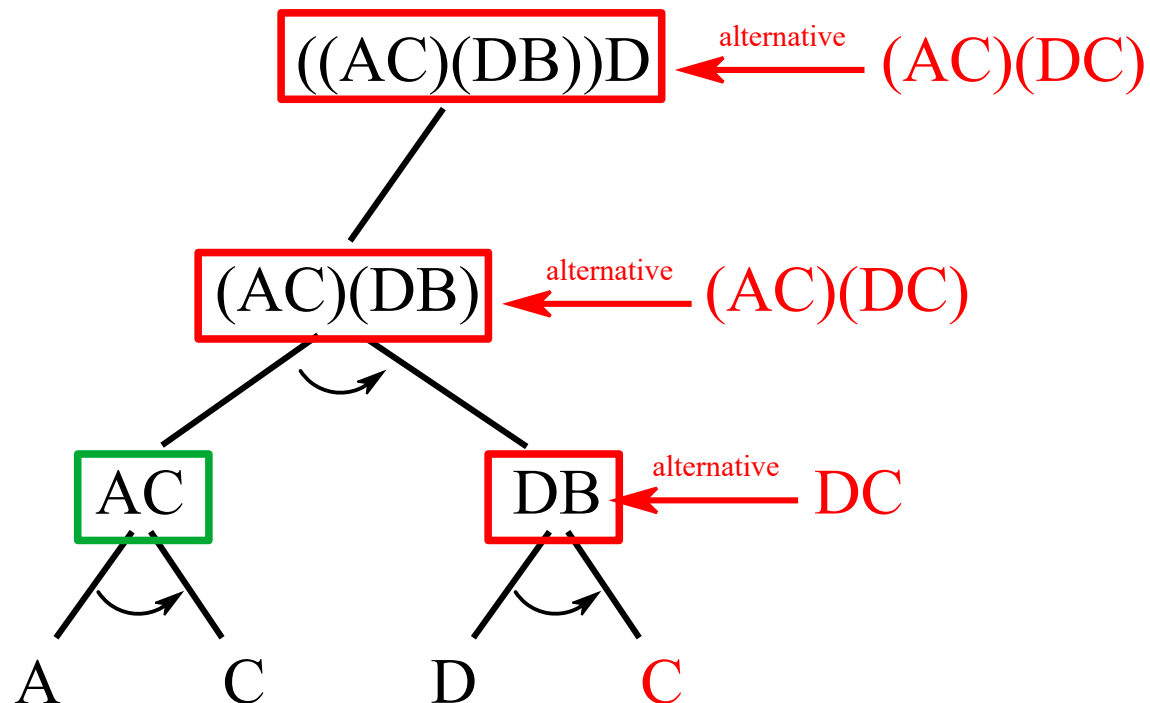
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **Le système IMOS : exploitation des schémas sensorimoteurs**
 - Les schémas sont utilisés par l'agent comme des interactions primitives
 - Lorsque l'agent tente d'utiliser un schéma, le système contrôlant le cycle d'interaction va exécuter successivement les deux parties du schéma (et ce, de façon récursive)
 - Le système de contrôle s'arrête en cas d'échec d'une interaction primitive



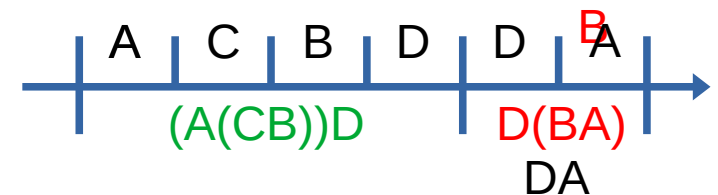
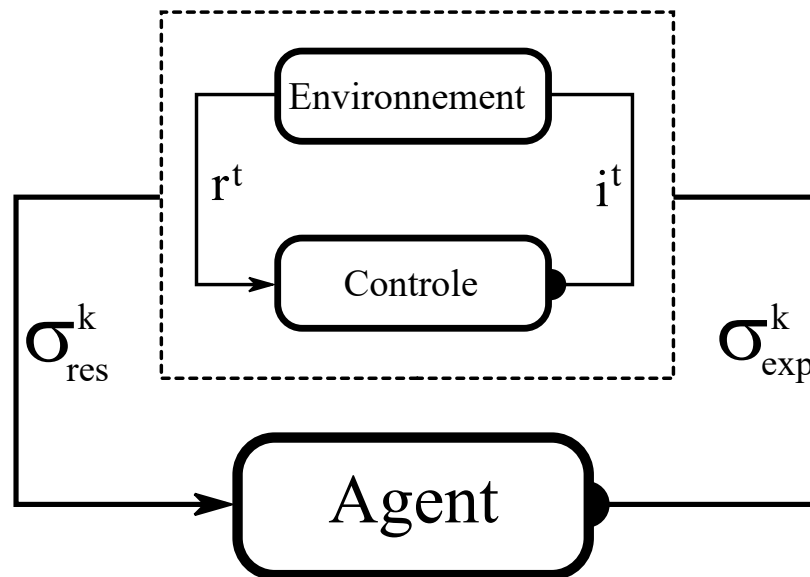
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : échec d'une interaction
 - Dans le cas d'une interaction primitive : succès si $e = r$, échec si $e \neq r$
 - Dans ce cas, l'interaction r est enregistrée comme alternative de e
 - Dans le cas d'un schéma : des schémas alternatifs sont créés récursivement :



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

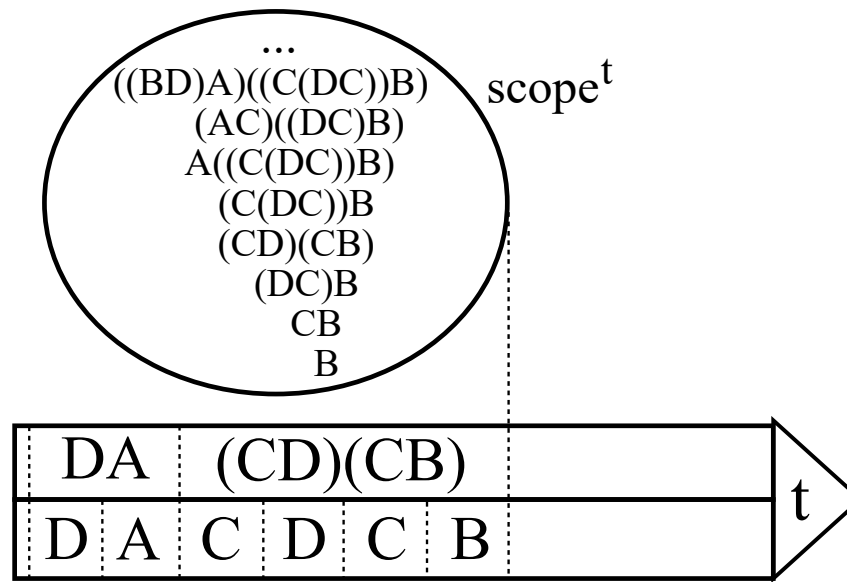
- Le système IMOS : exploitation des schémas sensorimoteurs
 - L'agent active les schémas comme un seul bloc : de son point de vue, il n'y a que des interactions.
 - Le système de contrôle décompose les schémas et active les interactions primitives successivement.
 - La timeline de l'agent est différente de la timeline du système de contrôle



- Le fait d'enregistrer et ré-exécuter des séquences d'interaction est appelé principe d'auto-programmation

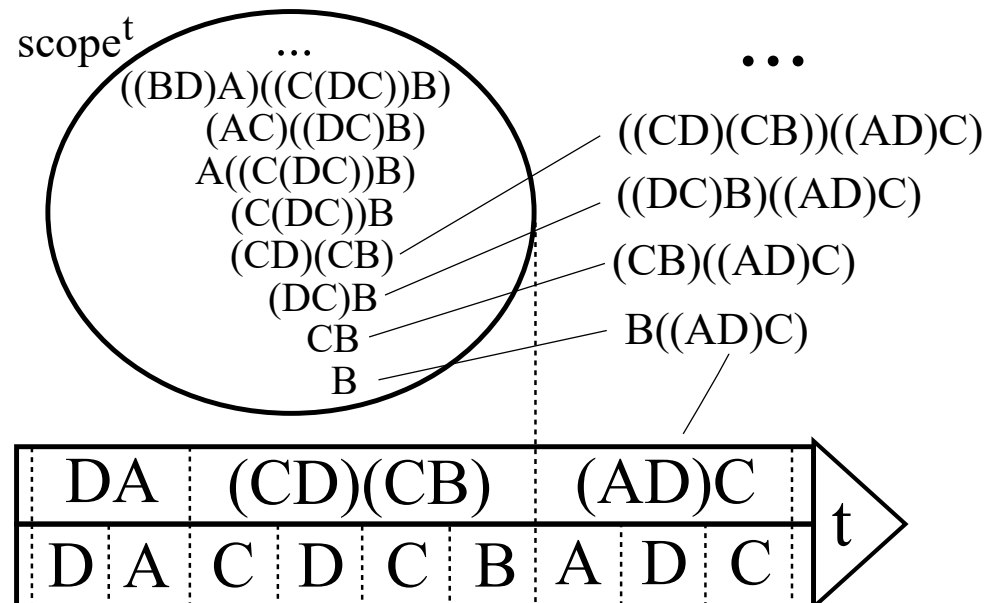
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : modèle interne de l'environnement (théorie)
 - Les schemes observés permettent de caractériser la situation actuelle de l'agent
 - Ces schemes sont stockés dans une structure appelée scope
 - Le scope caractérise la perception que l'agent a de son environnement
 - la perception est, dans ce modèle, une construction interne et implicite



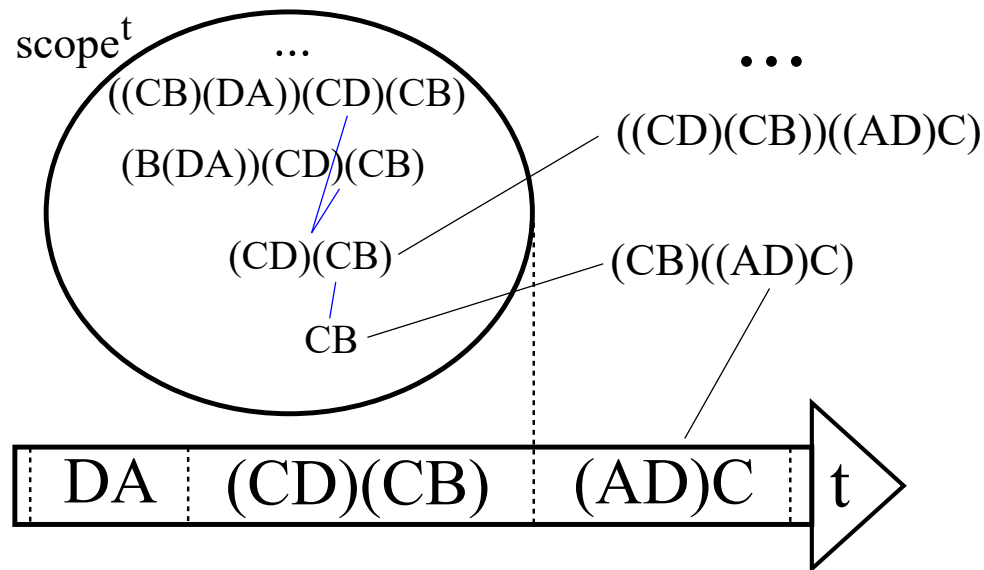
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : construction des schémas sensorimoteurs (pratique)
 - Le but est de construire des schémas pertinents.
 - On construit ou renforce (incrémentale) les schémas constitués de :
 - Un schéma du scope
 - Le schéma effectué
 - Autant de schémas à créer/renforcer que de schémas dans le scope
 - on va réduire le scope au strict nécessaire



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : modèle interne de l'environnement (pratique)
 - Le système IMOS propose d'ajouter au scope, à la fin du cycle de décision :
 - Le scheme effectué
 - La proposition du scheme effectué (non utilisation des schèmes 'courts')
 - Les schemes mis à jours (donc de niveau supérieur) dont le nombre d'observation dépasse le *regularity sensibility threshold*



- On limite ainsi le nombre de schemes créés ou mis à jour.

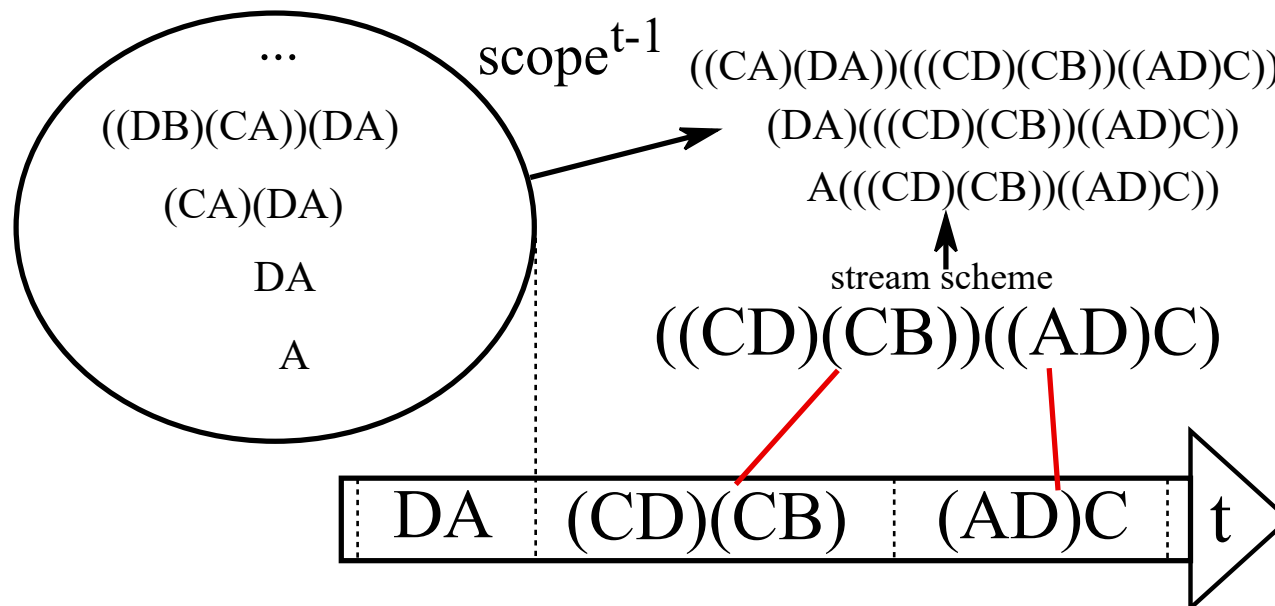
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : construction des schémas sensorimoteurs (pratique)

- Un second mécanisme est ajouté pour favoriser les schémas longs :

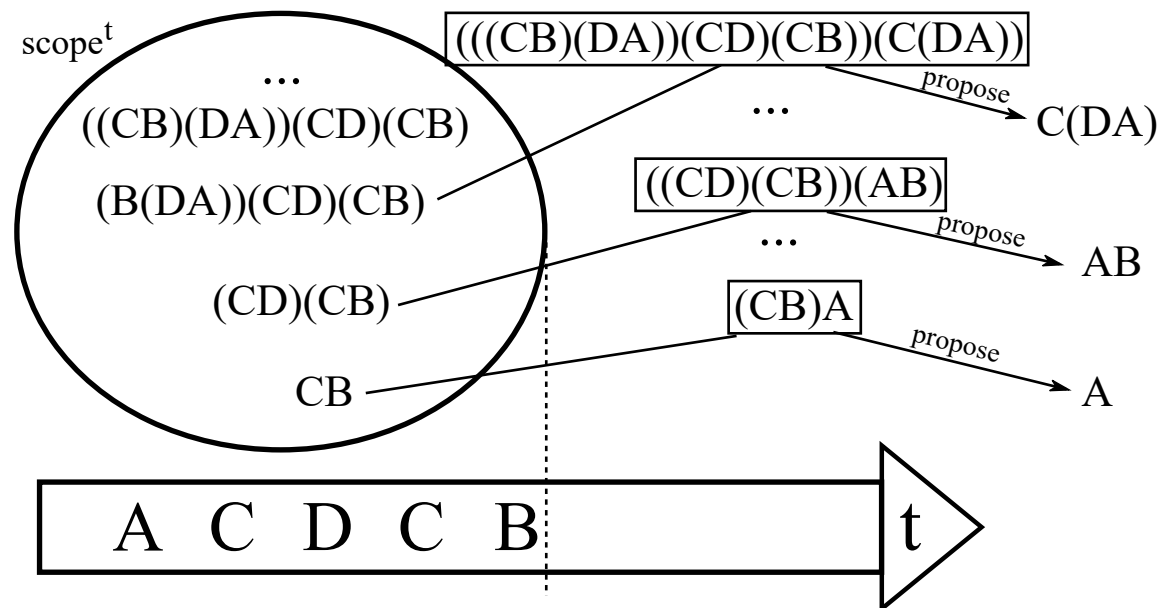
On définit le *stream scheme* comme étant le schéma constitué des deux derniers schémas effectués.

- Ce *stream scheme* a été effectué dans le contexte du scope précédent
- Si le *stream scheme* a été observé un nombre de fois supérieur au *regularity sensibility threshold*, on enregistre ou renforce les schémas constitués d'un schéma du scope précédent et du *stream scheme*



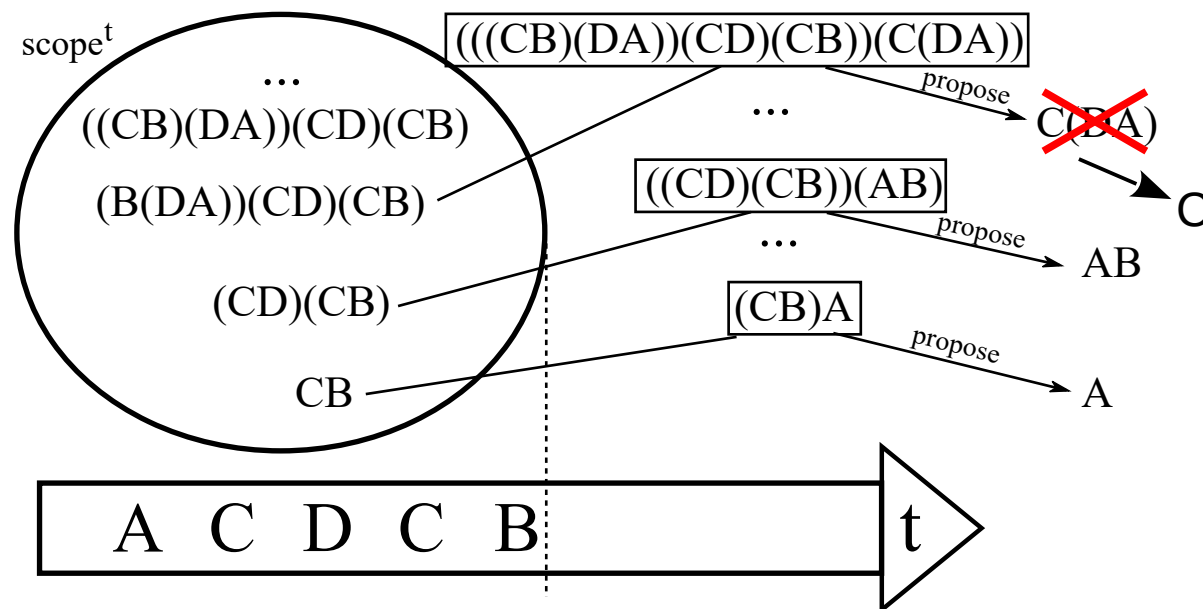
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : sélection de la prochaine intention
 - Rappel : un *schema* est un couple (*contexte* , *proposition*)
 - Les *schemas* du *scope* peuvent être les *contextes* de *schemas* de plus haut niveau : le *scope* permet d'activer des *schemas* dont le *contexte* est reconnu
 - Les *schemas* activés vont ensuite proposer leur sous-*schema* *proposition* pour la sélection de la prochaine interaction



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : sélection de la prochaine intention
 - À noter : si un scheme activé n'a pas dépassé le *regularity sensibility threshold*, Il proposera le contexte de sa proposition
 - On s'assure ainsi que les schemes ont été suffisamment renforcés.



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

A → 5
B → -1
C → -5
D → 1

- **Le système IMOS : sélection de la prochaine intention**
 - On fait la liste des schemes proposés par les schemes actifs
 - Par défaut, les interactions primitives sont ajoutées à la liste avec un coefficient à 0.
 - Chaque scheme actif s ajoute au schème s_p qu'il propose la valeur de satisfaction de s_p pondéré par le nombre d'énaction de s

Schemes activés [nb enaction]		Schemes proposés	
(CD)A [5]	→ A → 5 x 5	A	25
(CD)B [8]	→ B → -1 x 8	B	-16
(A(CD))B [8]	→ B → -1 x 8	C	0
(A(CD))(BB) [10]	→ BB → -2 x 10	D	0
((CA)(CD))(BA) [5]	→ BA → 4 x 5	BB	-20
((D(CA))(CD))(BA) [4]	→ BA → 4 x 4	BA	36
((D(CA))(CD))(B(AD)) [3]	→ B(AD) → 5 x 3	B(AD)	15
((D(CA))(CD))(B(AC)) [2]	→ B(AC) → -1 x 2	B(AC)	-2

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

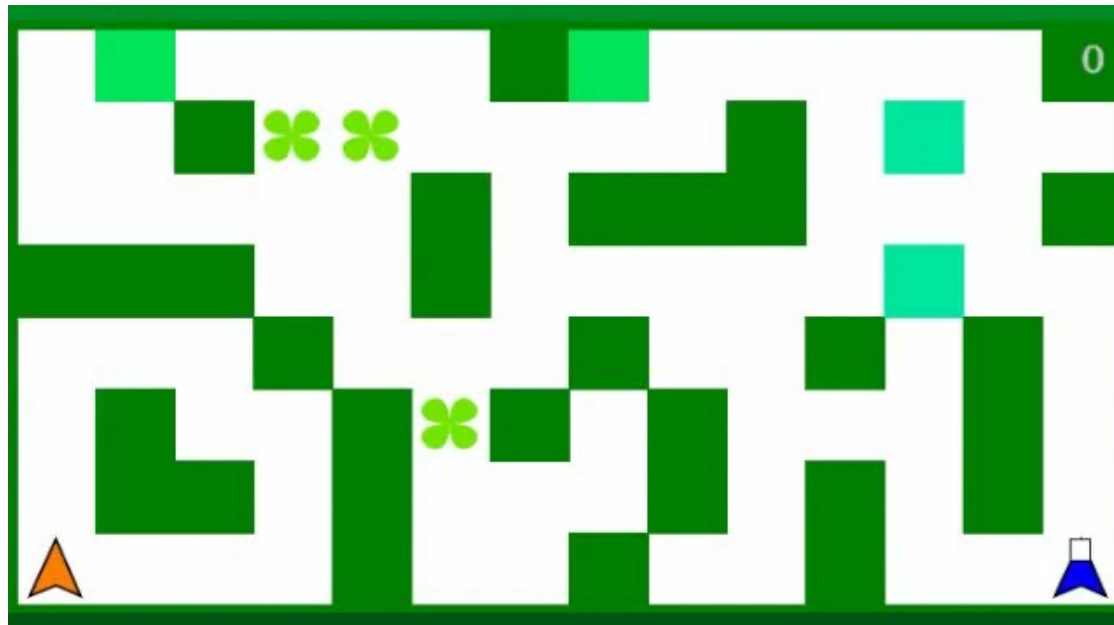
- Le système IMOS : sélection de la prochaine intention
 - Les schemes peuvent échouer : on fait appel aux listes d'alternatives découvertes par l'agent
 - On ajoute les valeurs des schemes alternatifs présents dans la liste
 - On notera que la valeur de satisfaction n'est pas une récompense que l'on cherche à minimiser à long terme, mais un 'drive' interne qui pousse l'agent à agir

Schemes proposés

A	25	-16		9	
B	-16	+25		9	
C	0	+0		0	
D	0	+0		0	
BB	-20	+36	+25	41	
BA	36	-20	+25	41	
B(AD)	15	-2	+25	-20	18
B(AC)	-2	+15	+25	-20	18

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : exemples d'agents
 - Deux agents suivent des apprentissages différents



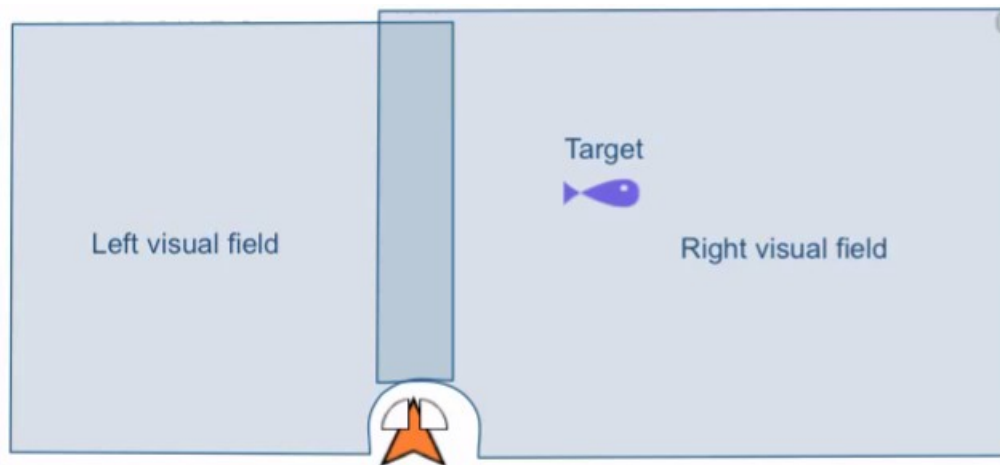
(Jianyong, PhD 2020)

- Les comportements dépendent de l'expérience et de son environnement
- L'agent construit progressivement ses comportements
- Si l'environnement change, les schémas de bas niveau peuvent rester valides : l'agent peut les réutiliser pour construire plus rapidement de nouveaux comportements de haut niveau.

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

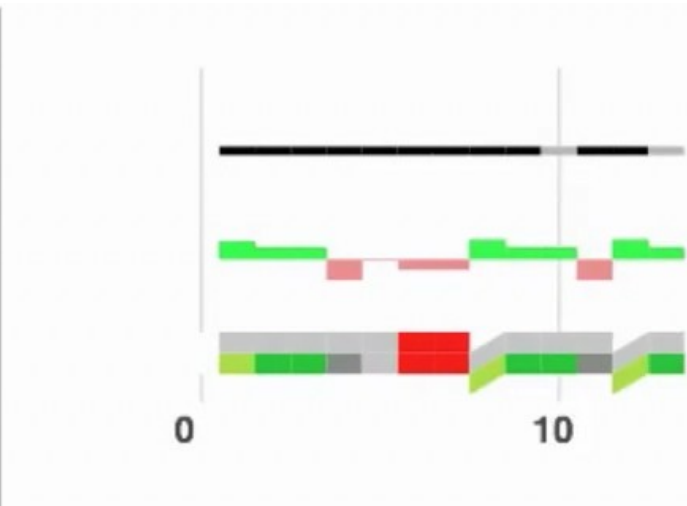
- Le système IMOS : exemples d'agents

- Cet agent dispose d'un système visuel rudimentaire :
 - deux champs de vision (droite, gauche, recouvrement au milieu)
 - Peut percevoir l'apparition, la disparition ou le rapprochement dans chacune des 3 régions



- ▷ forward (-1)
- ▷ bump (-5)
- ▷ eat (50)
- ◐ turn left (0)
- ◑ turn right (0)
- appear (15)
- closer (10)
- disappear (-15)

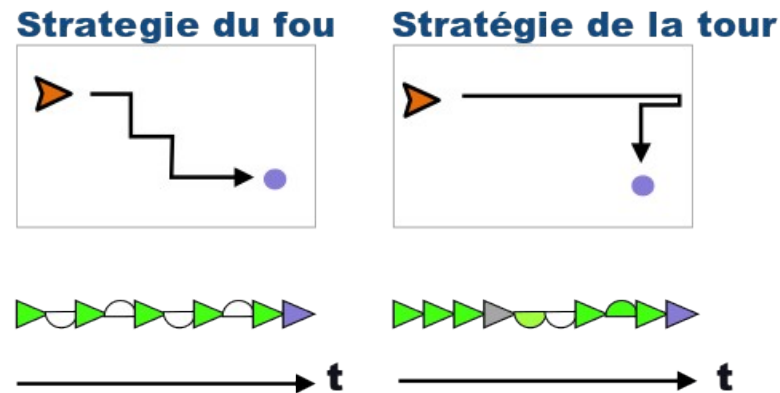
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



<https://www.youtube.com/watch?v=5eojg02-dPE&t=339s>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

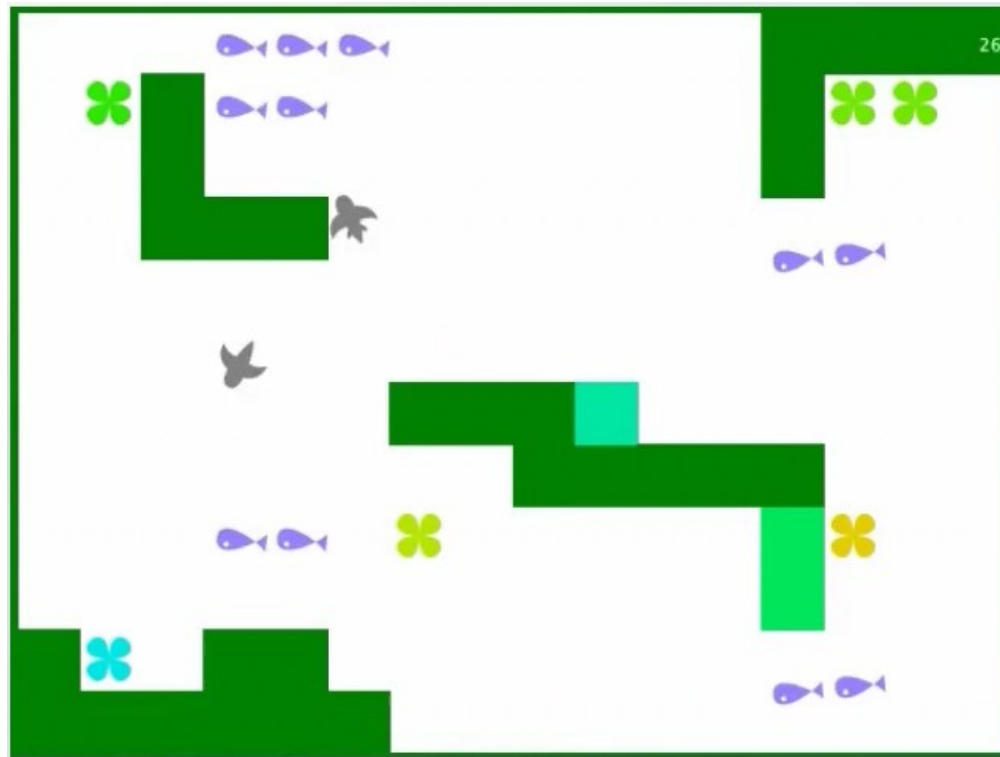
- Le système IMOS : exemples d'agents
 - Deux comportements peuvent émerger de l'apprentissage
 - Pas de stratégie prédéfinie
 - Notion d'individuation : deux agents identiques peuvent générer des comportements radicalement différents en fonction de leur expérience



- Comme l'agent ne perçoit pas la distance, il doit activement agir pour déterminer quand tourner.
 - Saccades visuelles

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

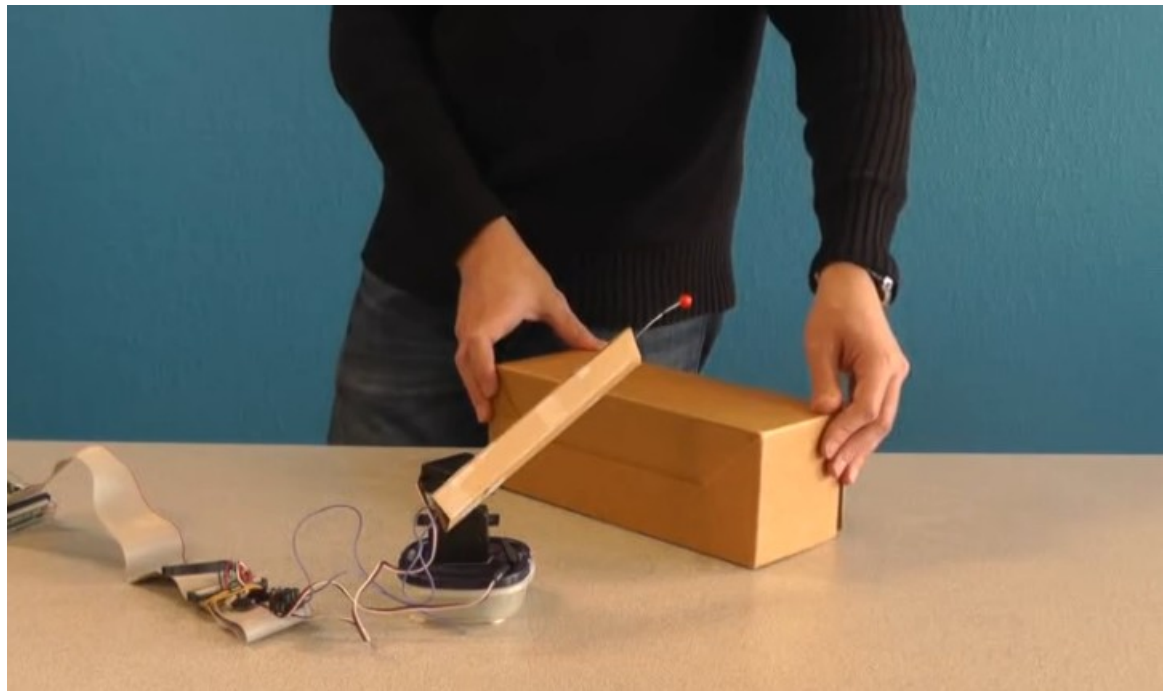
- Le système IMOS : exemples d'agents
 - Avec un système visuel plus élaboré



https://www.youtube.com/watch?v=LjOck5ts_2g

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : exemples d'agents
 - Peut s'appliquer à tout type de système 'séquentiel'



<https://gaysimon.github.io/robot/drumirl.html>

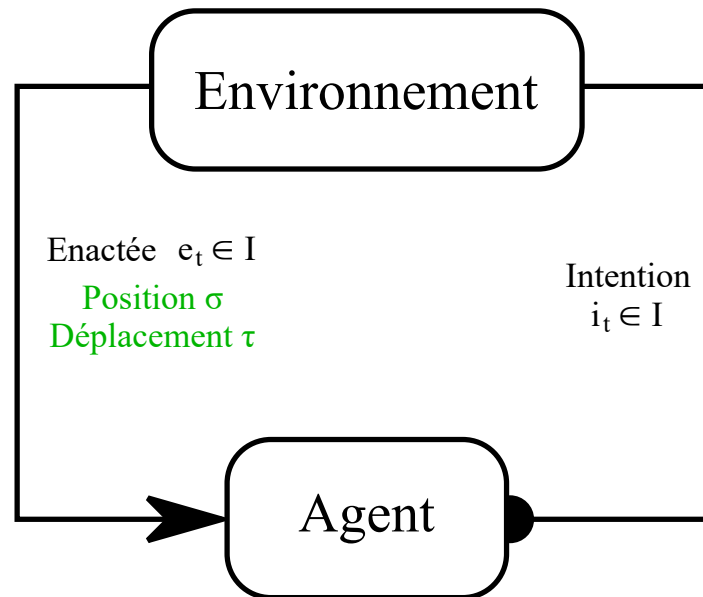
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **Le système IMOS : vers un environnement spatial**
 - Agent IMOS limités à des comportements 'séquentiels'
 - Il faudrait intégrer les propriétés spatiales des interactions
 - Un peu de théorie :
 - Théorie des bundles (D. Hume, 1739) :

La théorie des bundles stipule qu'un objet est simplement la somme de ses propriétés physiques et d'usage (c'est-à-dire la façon dont on les utilise), sans qu'il ne soit nécessaire de faire intervenir une propriété intrinsèque à l'objet (l'"essence")
- on peut caractériser un objet par l'ensemble des interactions que l'on peut effectuer avec lui
- on peut regrouper les interactions liées à un même objet

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

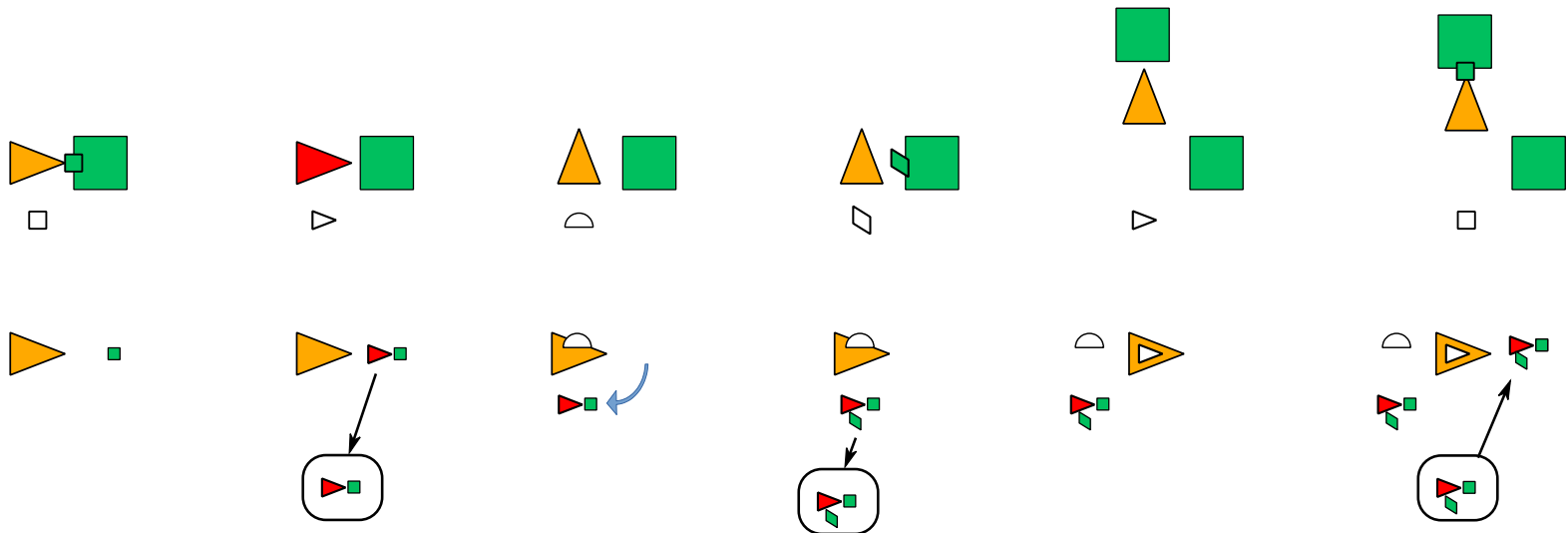
- Le système IMOS : Une mémoire de l'espace
 - Un modèle Radical Interactionism spatial



- τ donne une information sur le déplacement de l'agent (ex : système vestibulaire)
- σ donne une information permettant de définir une 'localisation' de l'interaction (en espace égo-centré)

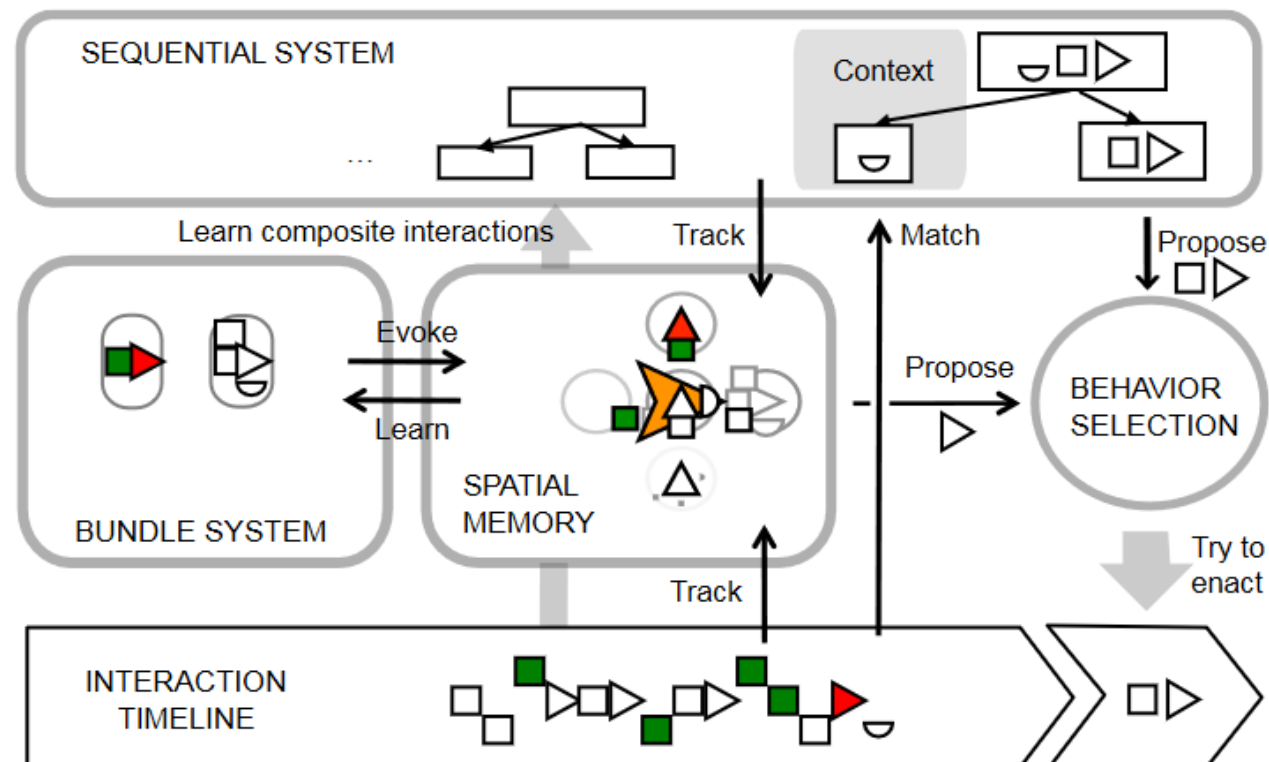
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le système IMOS : Une mémoire de l'espace
 - Une structure pour stocker les interactions effectuées dans l'espace, sur de courtes périodes (mémoire à court terme) :
 - Certaines interactions peuvent être 'localisées' par rapport à l'agent
 - Si il y a co-occurrence d'interactions à une même position de l'espace, on peut regrouper ces interactions dans un bundle
 - Certaines interactions produisent un mouvement
 - Mise à jour des positions dans la mémoire de l'espace
 - Une interaction peut évoquer un bundle (et donc les interactions liées)



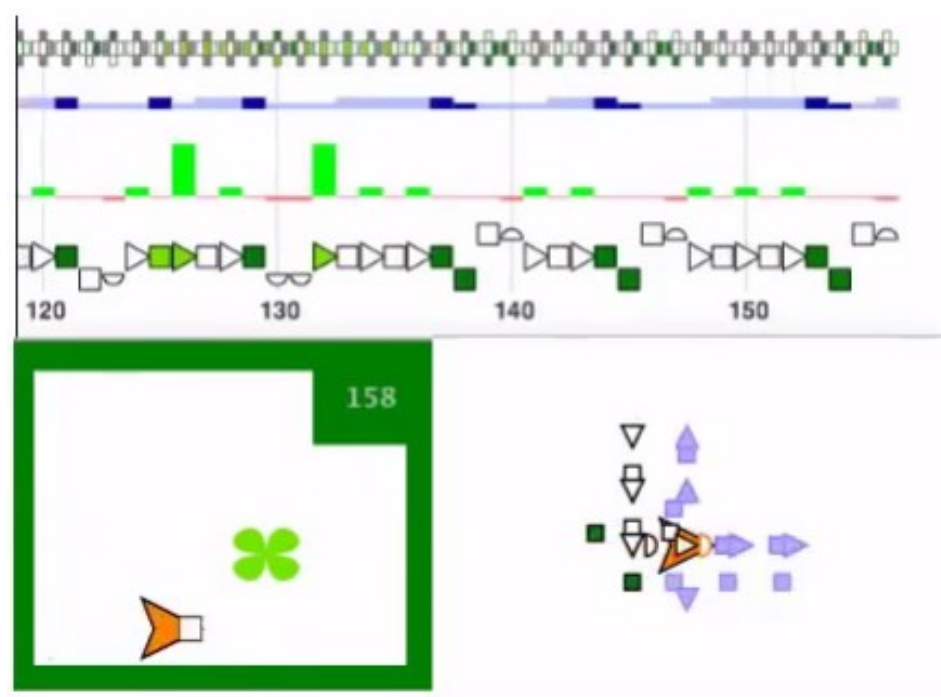
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'architecture ECA : Enactive Cognitive Architecture (Georgeon, 2013)
 - Architecture intégrant le système séquentiel et spatial
 - La mémoire de l'espace permet d'ajouter de nouvelles propositions ou d'infirmer des propositions du modèle séquentiel



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- L'architecture ECA : Enactive Cognitive Architecture (Georgeon, 2013)
 - La mémoire de l'espace facilite l'apprentissage en regroupant (sous forme de bundles) des interactions liées à un même élément



https://www.youtube.com/watch?v=_5HUb6AvSLg

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **L'architecture ECA : Enactive Cognitive Architecture (Georgeon, 2013)**
 - Quelques limitations toutefois :
 - Nécessite de connaître la position des interactions
 - Nécessite de connaître les déplacements
 - Comment apprendre ces informations par l'expérience ?

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

Mémoire Spatiale

Gay 2014

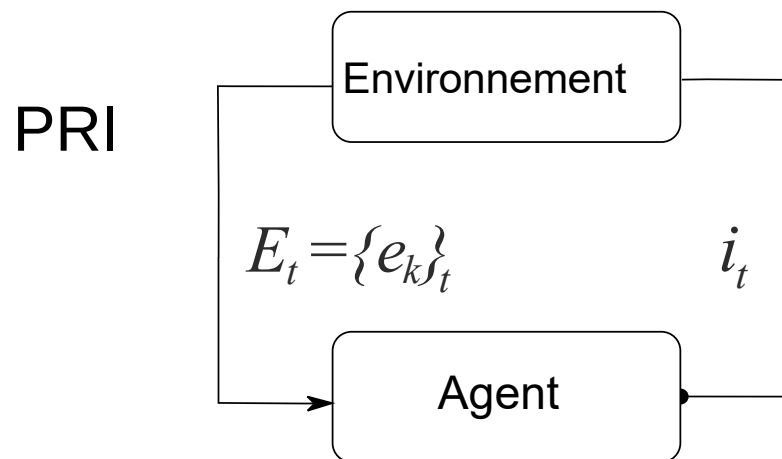
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale
 - Comment représenter l'environnement sans aucune connaissance *a priori* ?
 - Il faut pouvoir segmenter le contenu de l'espace en éléments exploitables...
... sans utiliser la notion d'objet
 - Il faut pouvoir localiser ces éléments dans l'espace...
... sans utiliser la notion d'espace
 - De plus, une seule interaction à la fois est insuffisant pour caractériser un environnement spatial 'ouvert'
 - Il faut faire évoluer le modèle Radical Interactionism (RI)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale

- Les animaux peuvent recevoir de multiples modalités sensorielles simultanément.
- Extension du modèle RI : le Parallel Radical Interactionism :



- L'agent expérimente un ensemble d'interactions simultanément.
- Une **interaction primaire** est une association entre une action et un résultat
- Une **interaction secondaire** est une association entre une interaction et un résultat additionnel.

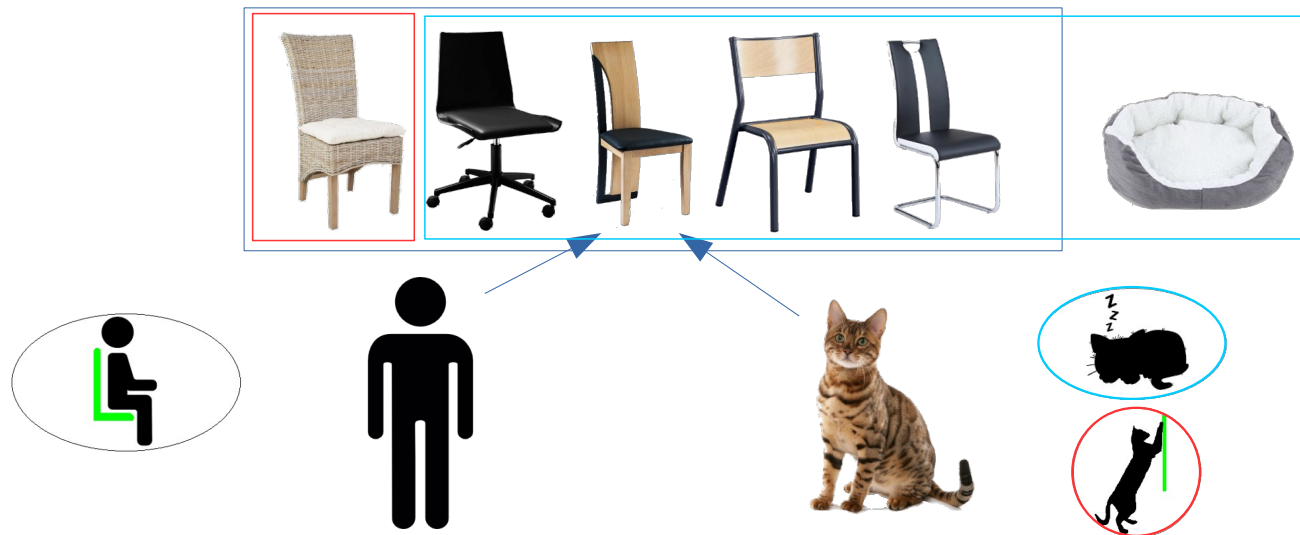
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale

- Un peu de théorie :

- Théorie des affordances (J. J. Gibson, 1977) :

une affordance est définie comme une possibilité d'interaction proposée par l'environnement à un agent.

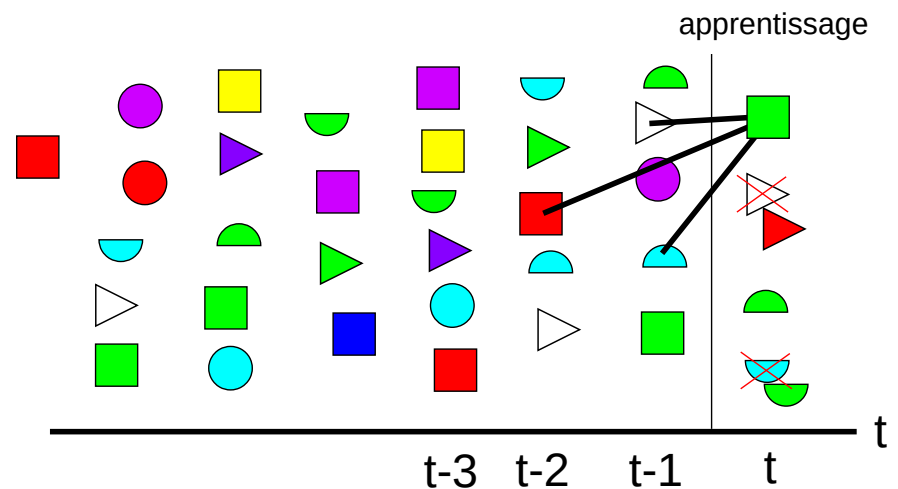
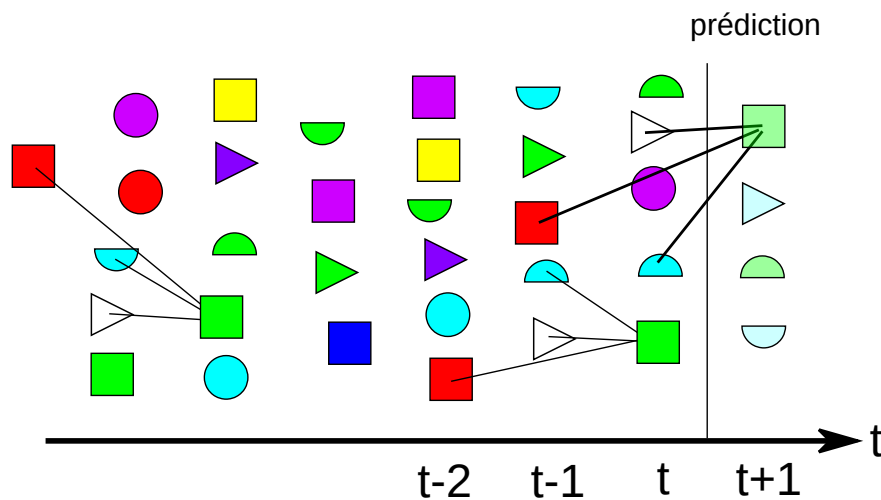


- Les affordances sont définies par le couplage agent-environnement (Stoffregen 2003, Chemero 2003)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale

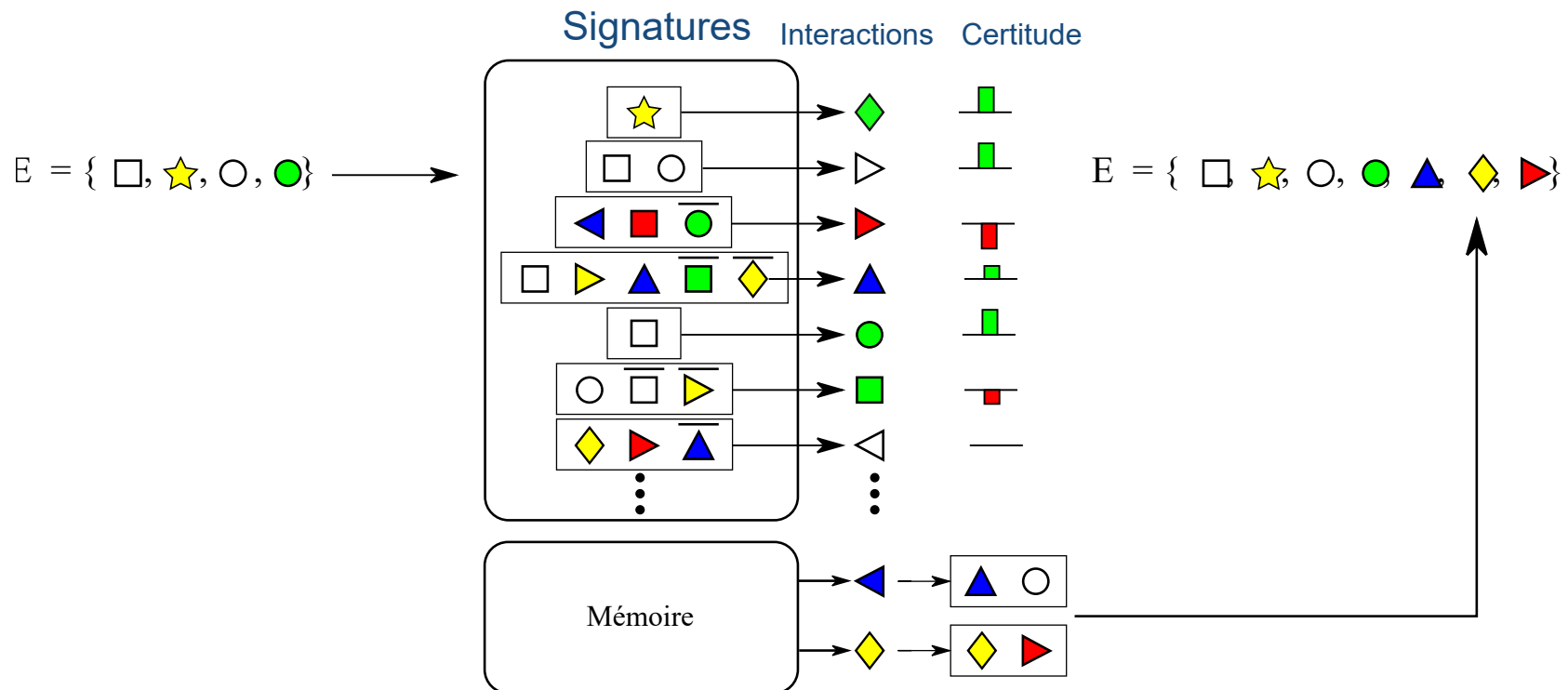
- L'agent n'a pas d'accès direct à l'environnement : il n'expérimente son environnement qu'au travers de ses interactions.
- Une interaction énoncée fournit une information sur la présence d'un élément de l'environnement, pouvant permettre de détecter la présence d'une affordance.



- Nous appelons **signature d'une interaction** l'ensemble des interactions j_k permettant de détecter l'objet qui affine l'interaction i .

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Une signature d'interaction doit permettre de définir la certitude avec laquelle une interaction peut être énoncée dans le contexte courant.
- Une signature doit être réversible : elle doit permettre de compléter le contexte courant si l'interaction qu'elle désigne est considérée comme pouvant être énoncée.




























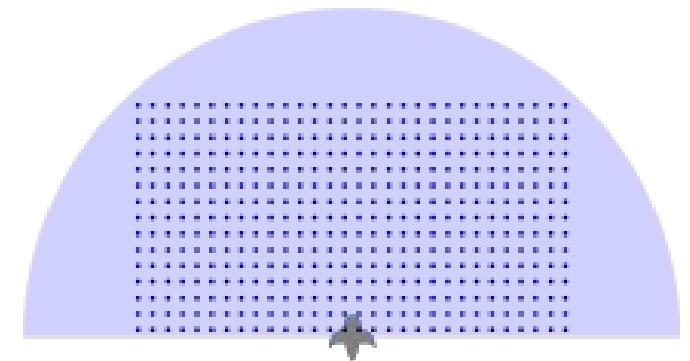
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Système interactionnel basé sur un système visuel longue portée
 - Champs de vision de 180°
 - Mesure des distances
 - Trois couleurs : rouge, vert, bleu

- Liste des interactions :

- 7 interactions "primaires" :

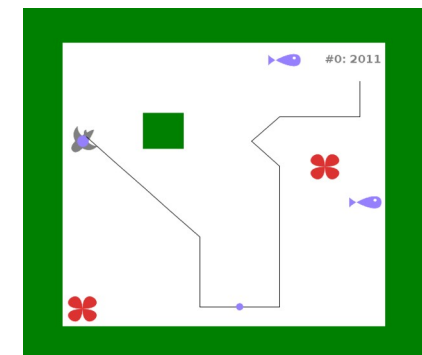
	A avancer d'un pas (2)			
	C se cogner (-5)			
	M avancer et manger (50)			
	TG90 tourner à droite de 90° (-3)			
	TD90 tourner à gauche de 90° (-3)			
	TG45 tourner à droite de 45° (-3)			
	TD45 tourner à gauche de 45° (-3)			



- $6 \times 3 = \mathbf{18}$ interactions "secondaires" pouvant être énoncées en $30 \times 15 = \mathbf{450}$ positions de l'espace observable : $18 \times 450 = \mathbf{8100}$ interactions "visuelles"

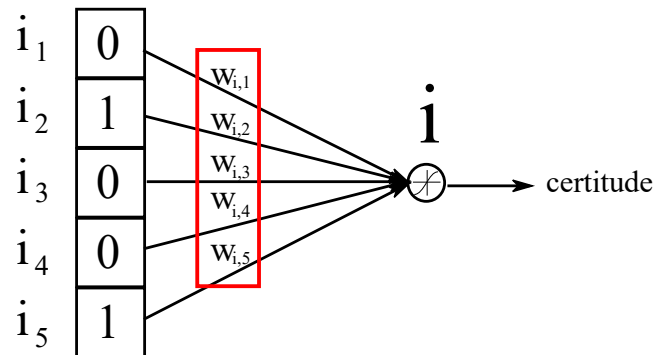
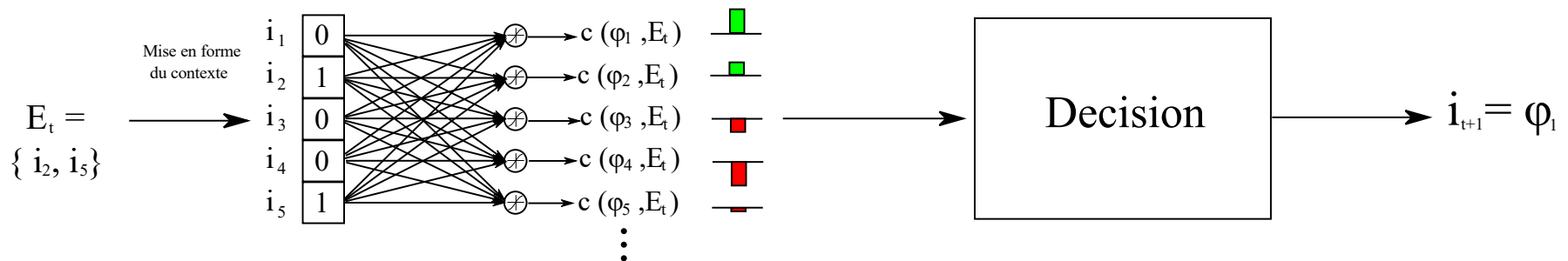
- Environnement :

- Trois types d'éléments : murs, nourriture, algues

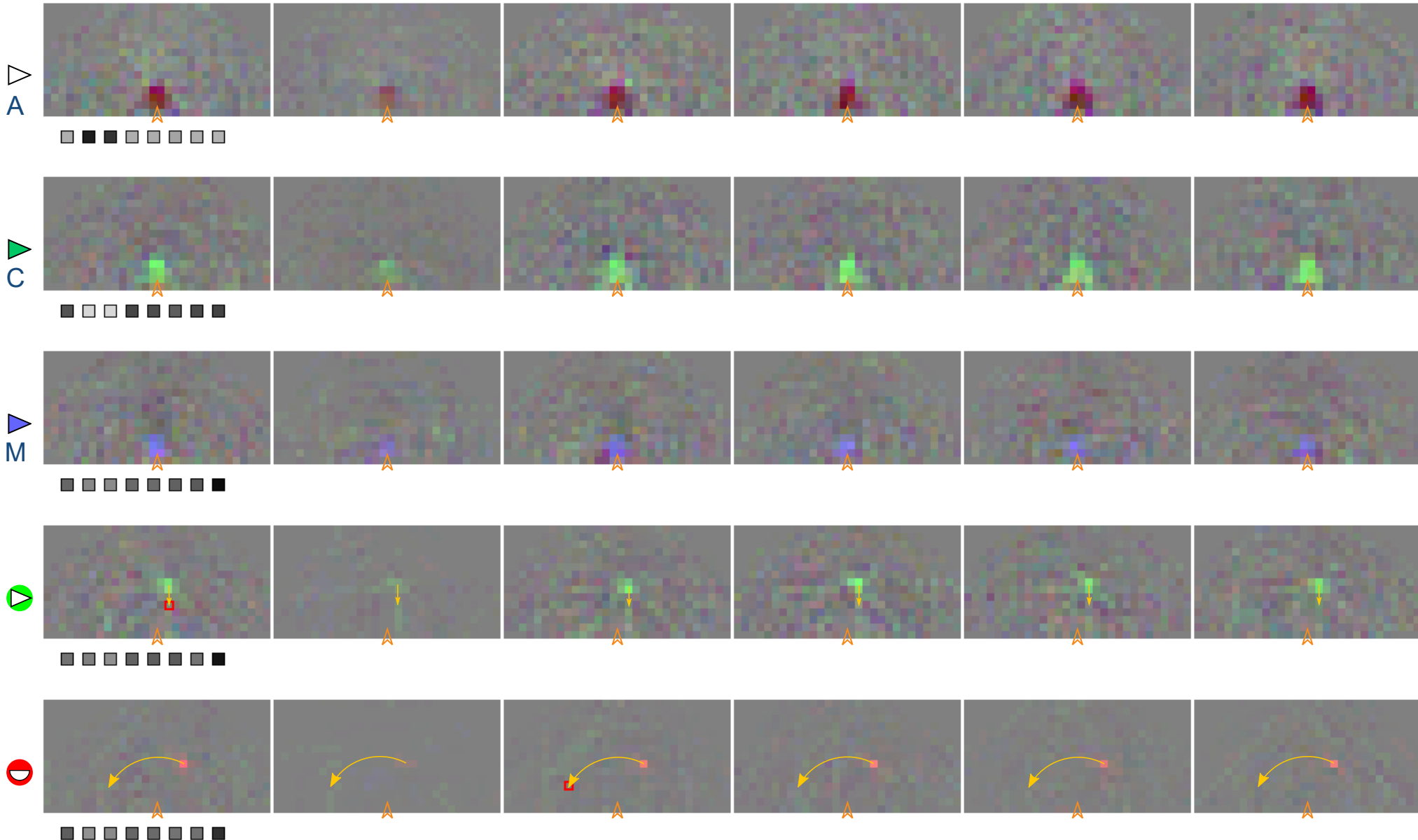


Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La mémoire spatiale : les signatures d'interaction**
 - Les différentes signatures ont été implémentées avec un réseau neuronal simple (perceptron). La signature est constituée de l'ensemble des poids synaptiques.



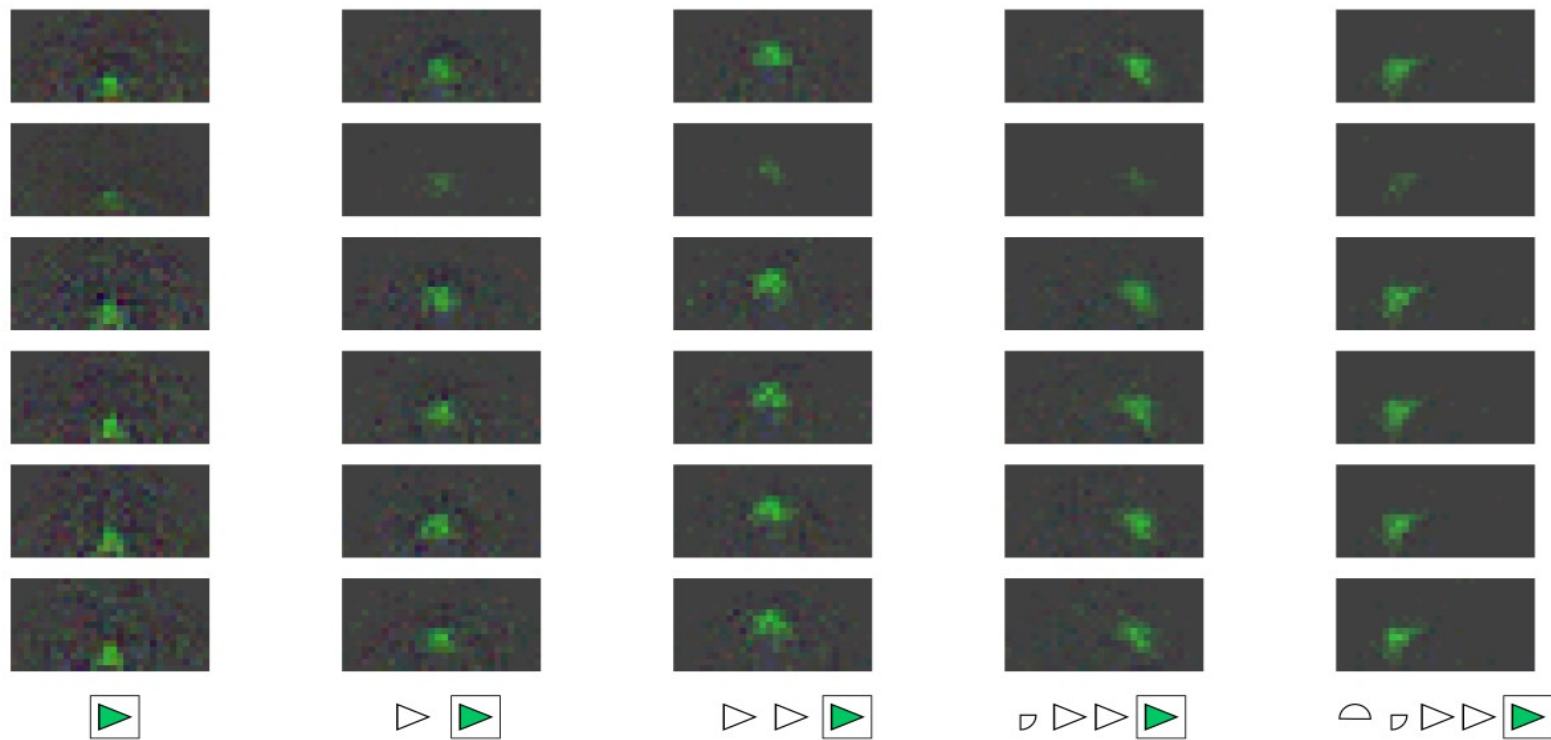
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



(obtenues après 20 000 cycles d'enaction)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

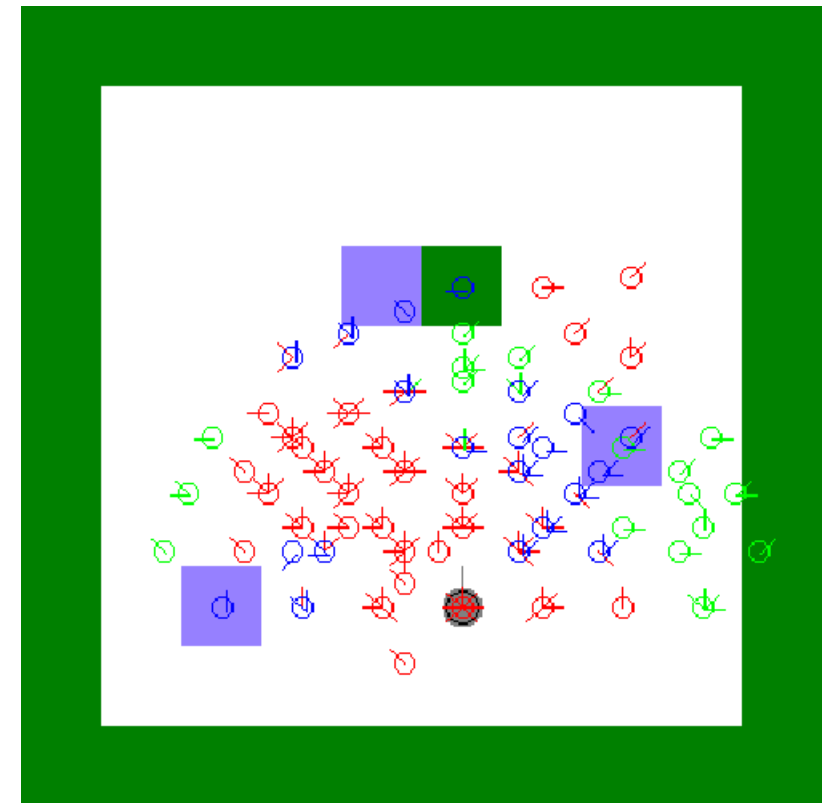
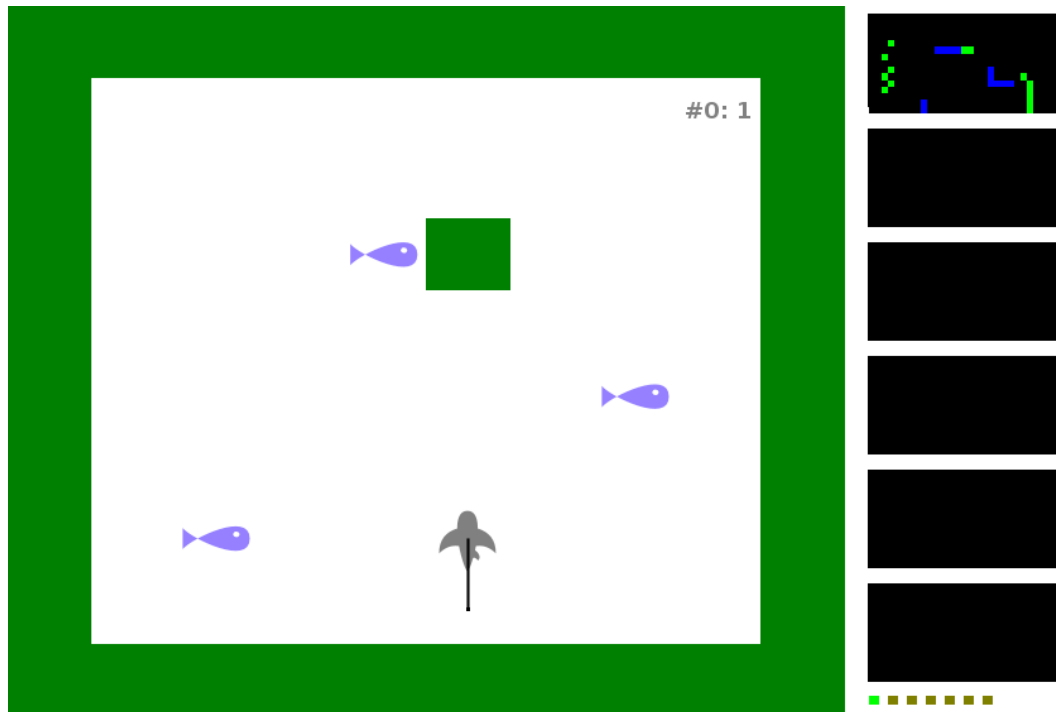
- La mémoire spatiale : les signatures d'interaction
 - Il devient possible de 'projeter' une signature par une séquence d'interaction primaire :



- Nous appelons **Instance d'un objet** un contexte qui, s'il est déplacé par rapport à l'agent par une certaine transformation, afforde l'interaction associée à cet objet.

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

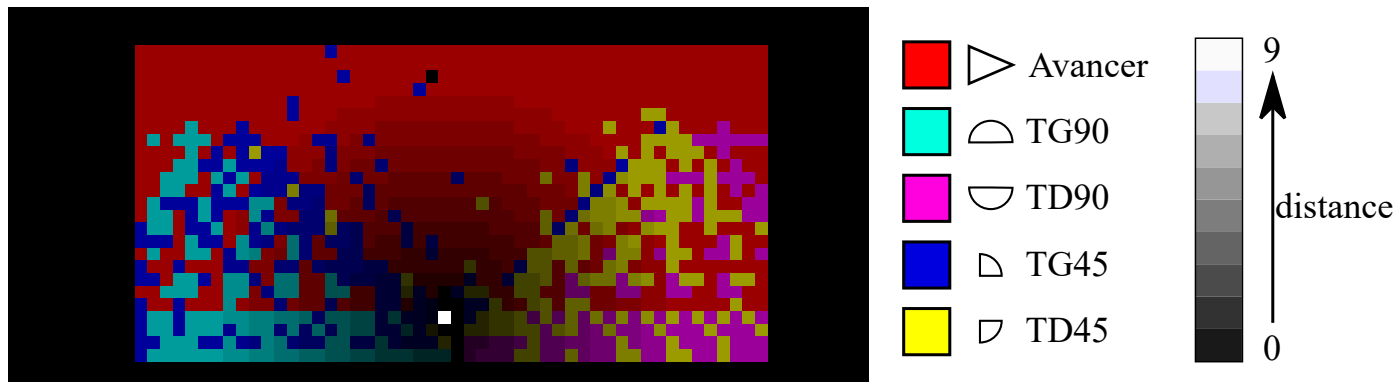
- La mémoire spatiale : détection des affordances distantes



« Localiser un objet signifie simplement que nous nous représentons les mouvements qu'il faut faire pour atteindre cet objet ; et qu'on ne nous dise pas que pour se représenter ces mouvements, [...], la notion d'espace [géométrique] doit, [...], préexister. » (Poincaré, La Science et l'Hypothèse, 1902)

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

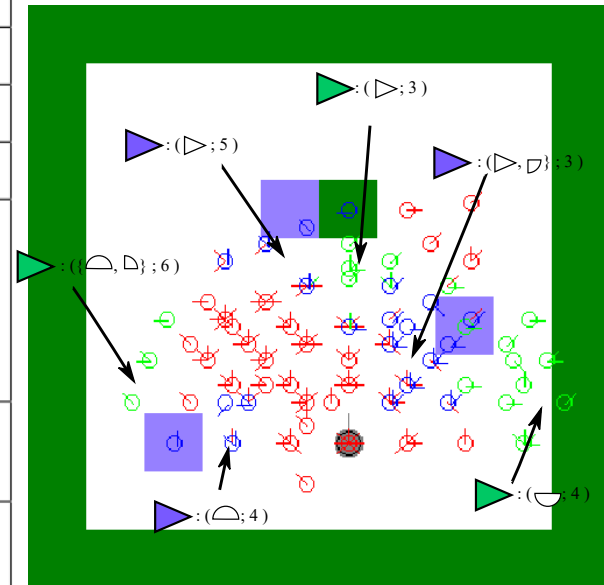
- La mémoire spatiale : détection des affordances distantes
 - Il n'est pas nécessaire de conserver la séquence liée à la position. Seules deux informations sont nécessaire pour caractériser la position :
 - La distance
 - peut être caractérisé par la longueur de la séquence
 - L'interaction qui permet de s'en rapprocher le plus (\approx direction)
 - première interaction de la séquence
 - Nous définissons un lieu comme un ensemble de positions aux propriétés identiques.



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : détection des affordances distantes

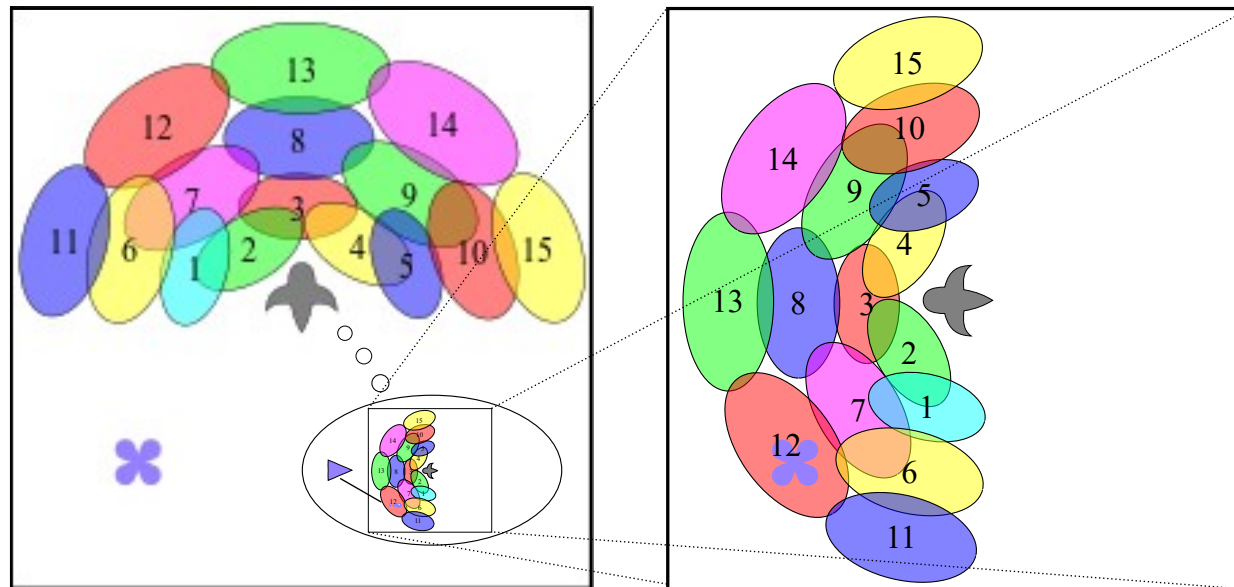
afforded interaction	interactions	dist.	main positions
		0	
		3	
		4	
		6	
		3	
		4	
		5	



- Question : comment suivre les objets quand on ne peut plus les percevoir ?
 - On va exploiter ces lieux !

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

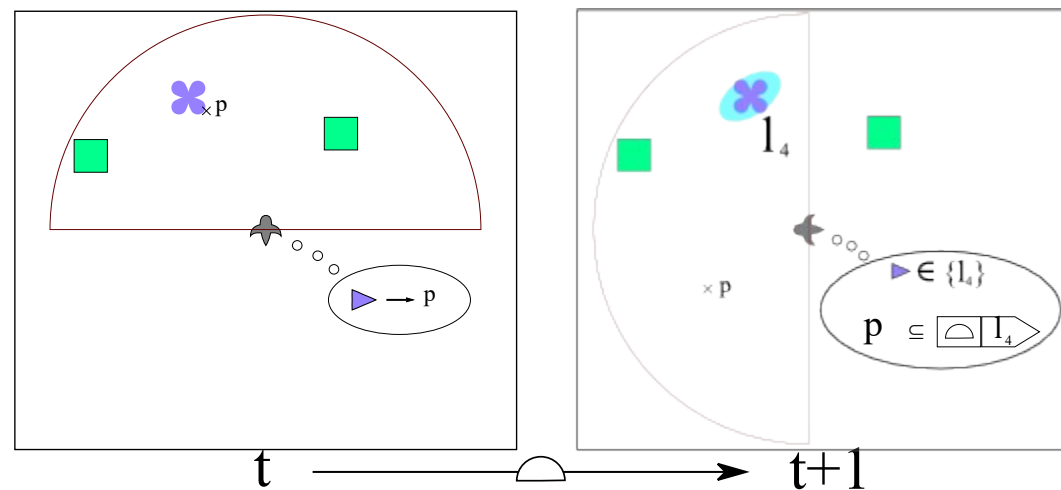
- La mémoire spatiale : une mémoire des affordances



- Si l'agent effectue une interaction tourner à gauche, l'élément initialement dans l'espace non-observable se retrouve dans le lieu l_{12} de l'espace observable.
- Initialement, il était possible de caractériser la position de l'instance d'objet avec le **lieu composite** [tourner à gauche ; l_{12}].
- Les lieux composites permettent de suivre une affordance en supprimant progressivement les interactions de la séquence des lieux lorsqu'elles sont énoncées.

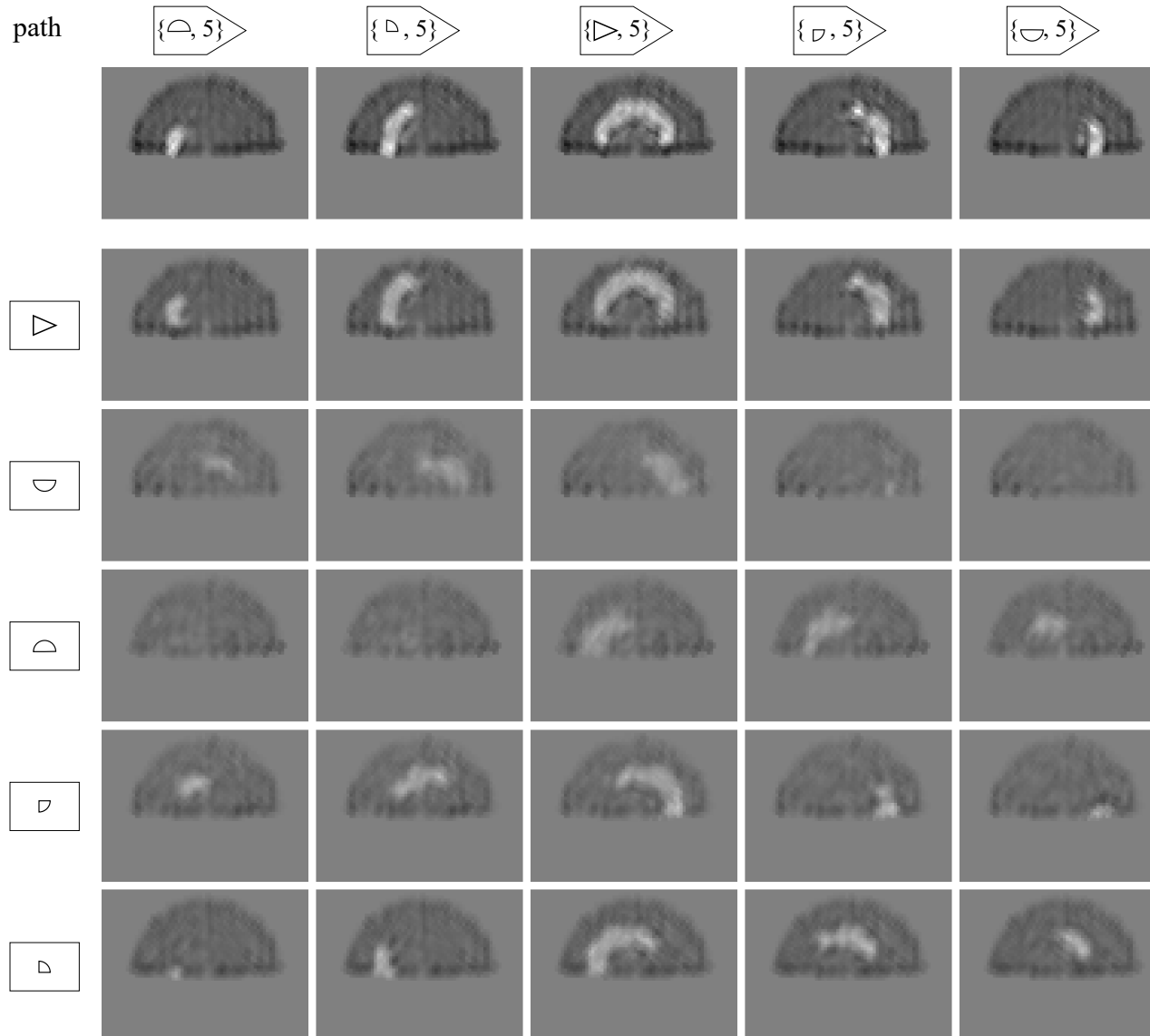
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : une mémoire des affordances
- Il faut apprendre par l'expérience quelles 'positions' (séquences d'interactions) font partie d'un lieu composite.



- Nous appelons ***signature de lieu*** l'ensemble des positions de l'espace considérées comme faisant partie d'un lieu composite.

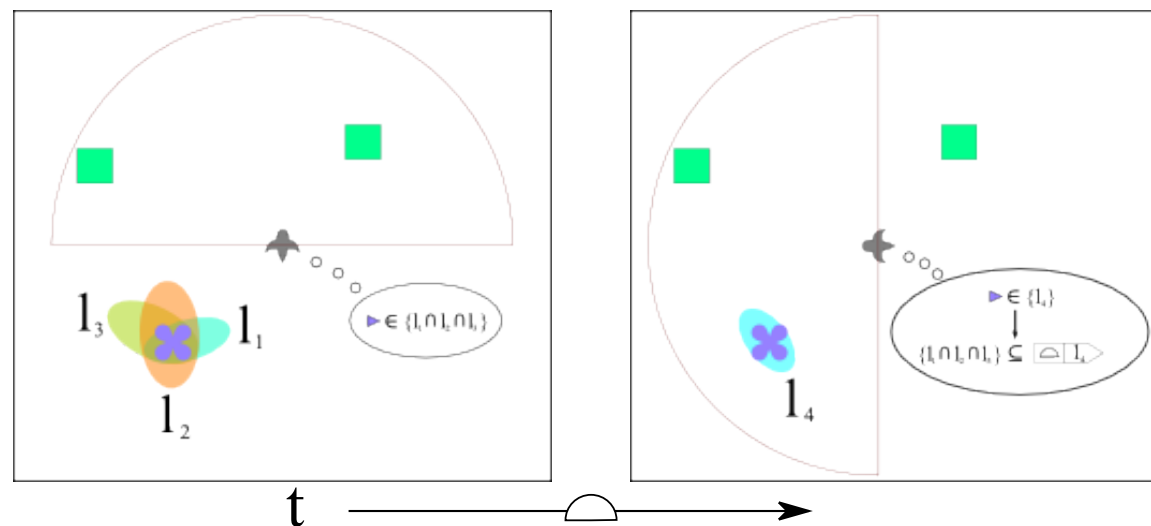
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



Exemples de signatures de lieu

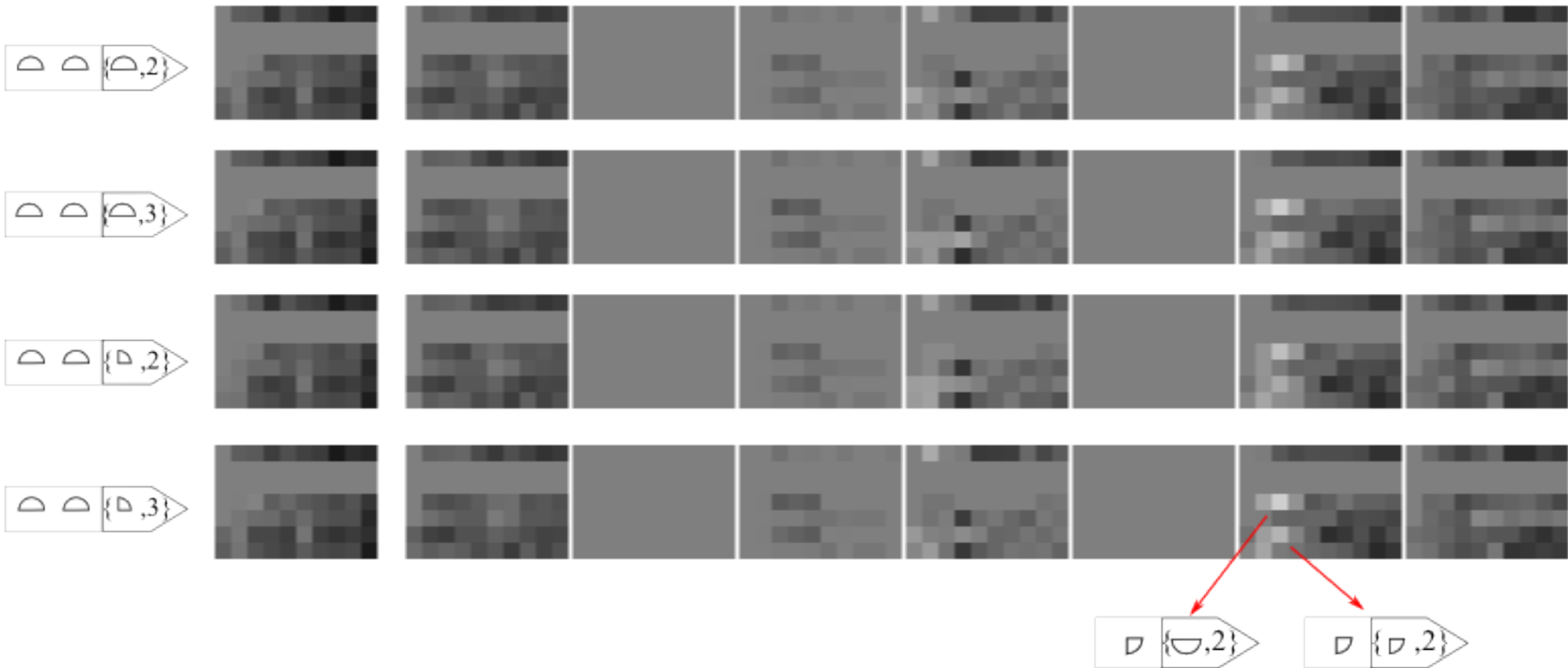
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- Le suivi est limité par la longueur des lieux composites. Des lieux plus long implique un plus grand nombre de lieux composites
 - On peut considérer qu'un ensemble de lieu (en particulier l'intersection) caractérisant la position d'une instance d'objet définit une région de l'espace global
 - L'agent peut apprendre les ensembles de lieu faisant partie d'un lieu composite, y compris dans l'espace non observable



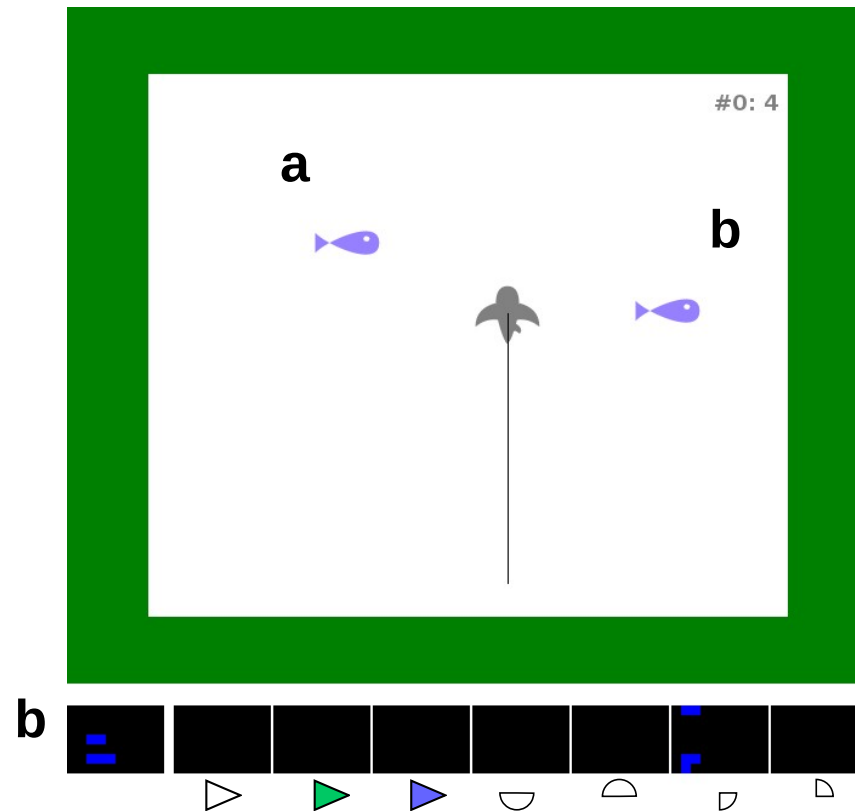
- Nous appelons **Signature de présence** les ensembles de lieux qui caractérisent une région de l'espace supposée contenue par la région caractérisée par un lieu composite

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

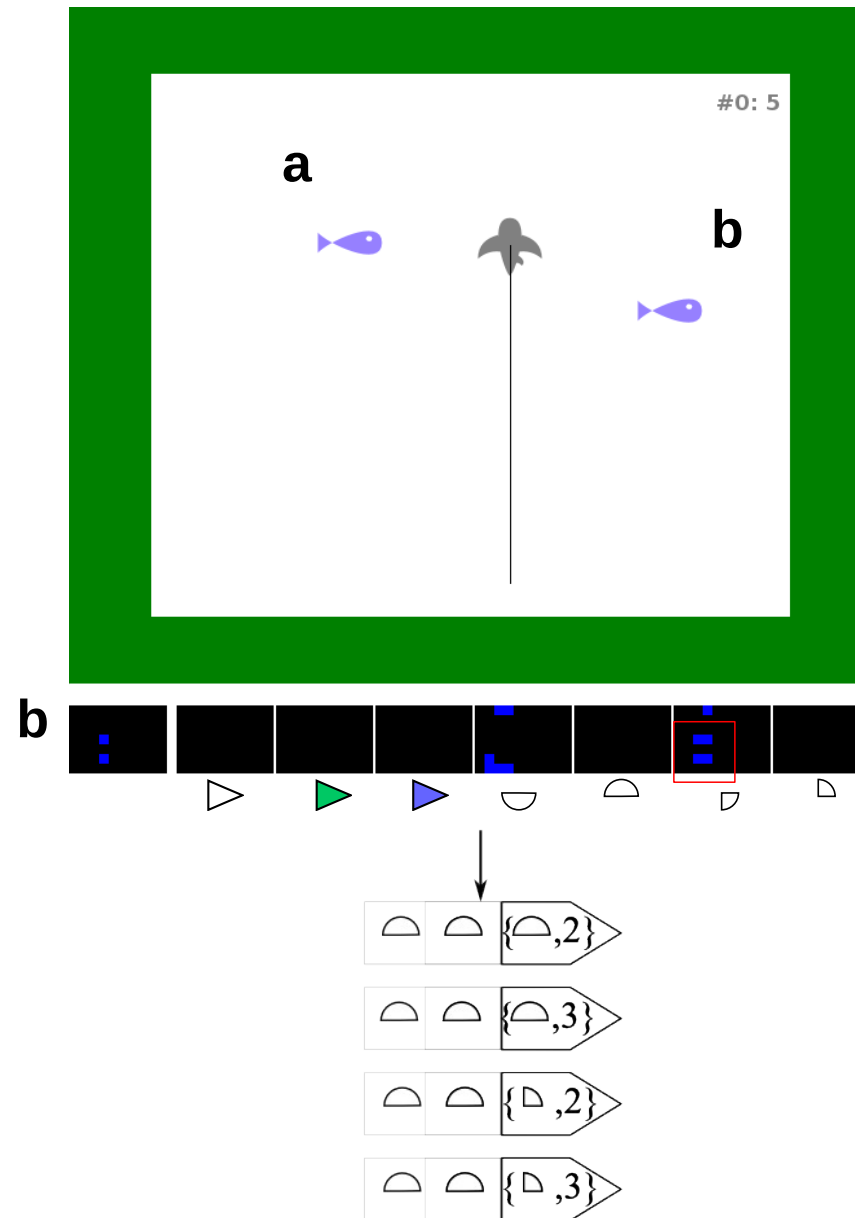


Exemples de signatures de présence

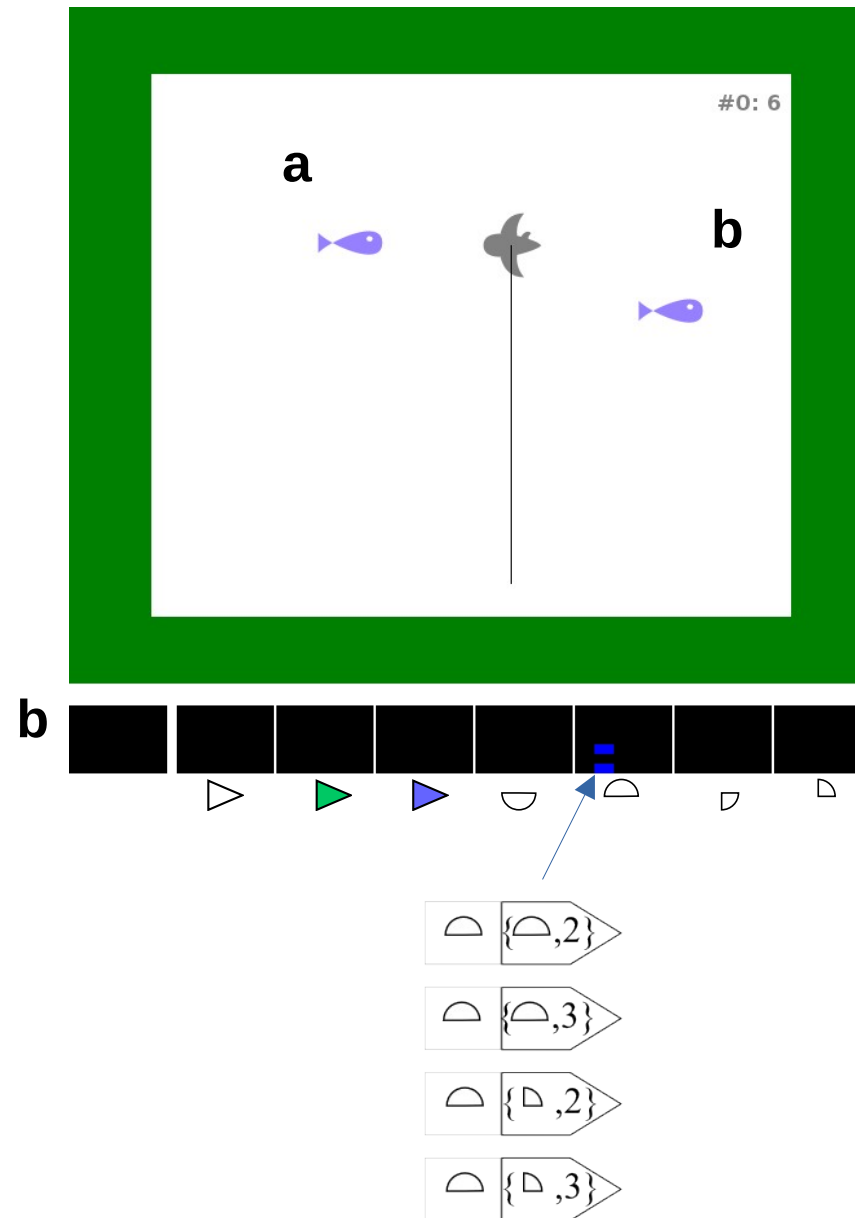
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

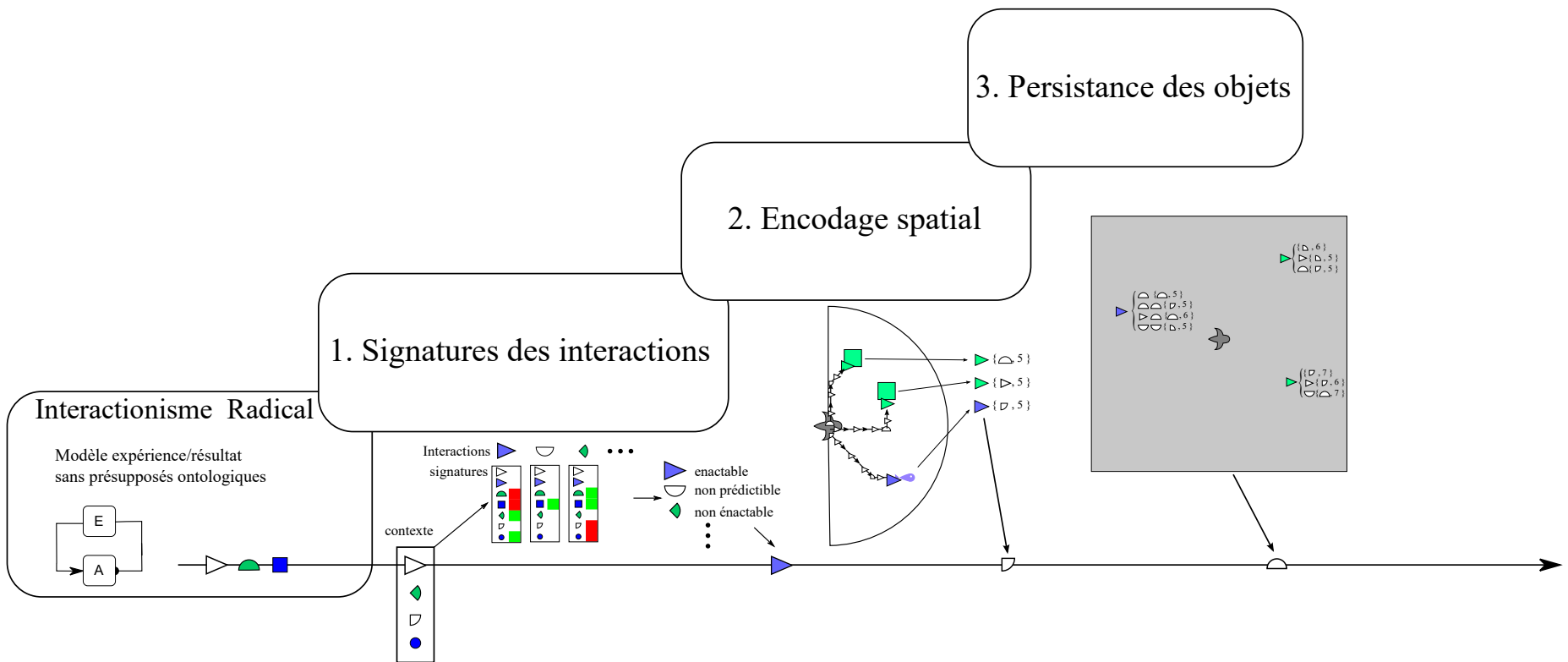


Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : une mémoire des affordances



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

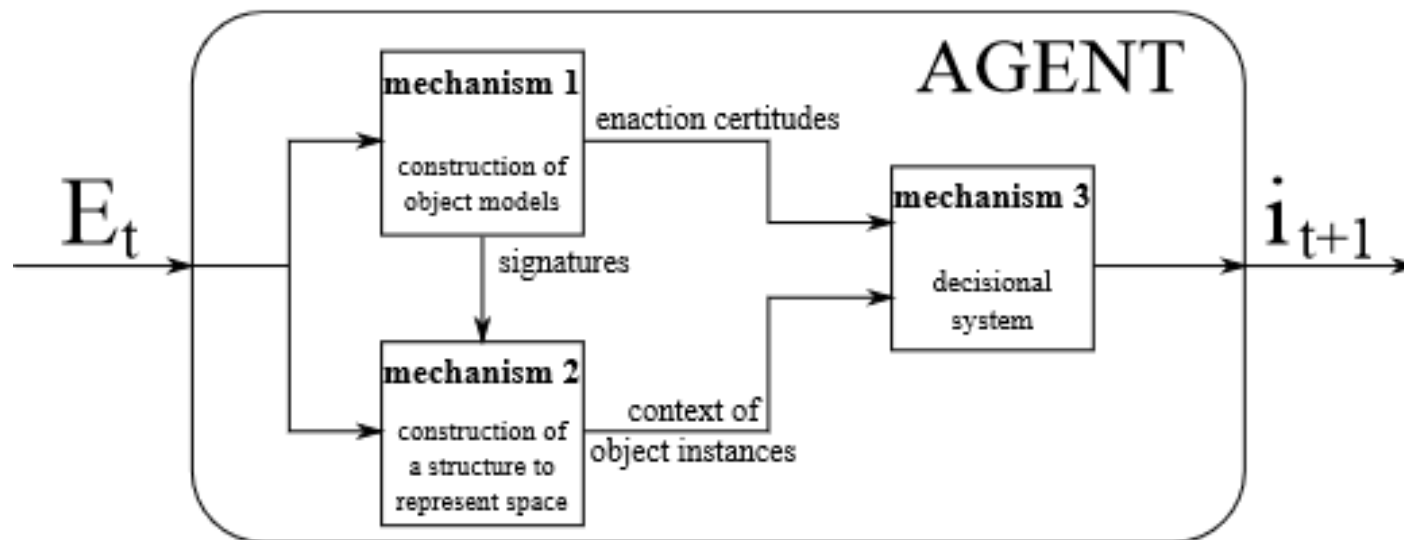
- La mémoire spatiale : les modèles de décision
 - Curiosité sensorimotrice : l'agent teste une interaction quand sa signature fournit une certitude trop faible (en valeur absolue)
 - Satisfaction à court et moyen terme : l'agent ajoute une valeur d'utilité à la valeur de satisfaction de ses interactions :
 - Principe : l'agent cherche à se rapprocher des affordances permettant d'énacter une interaction à satisfaction positive et à rester éloignée des affordances liées à une interaction 'négative'
 - Valeur d'utilité positive si l'interaction rapproche une interaction positive
 - Valeur négative si l'interaction permet rapproche une interaction négative

$$v'_i = v_i + \beta \cdot \sum_{a \in M | i \in L_a} f(d_a) \cdot v_a$$

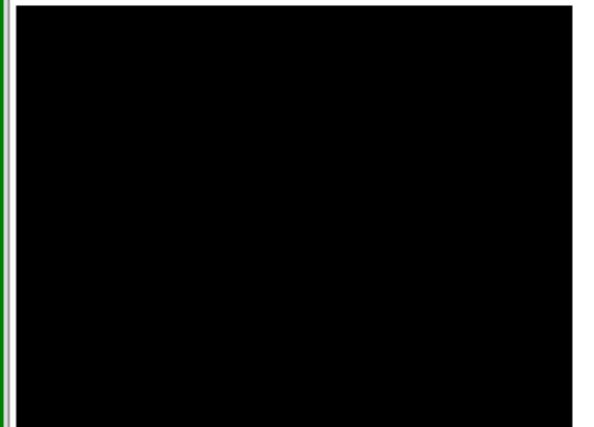
v_i la satisfaction de i , β le coefficient de la mémoire spatiale, a une affordance stockée par la mémoire M , L_a groupe de lieu localisant a , f une fonction strictement décroissante et positive,

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

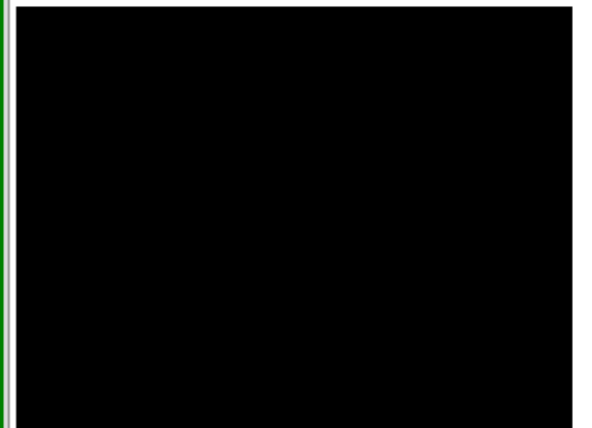
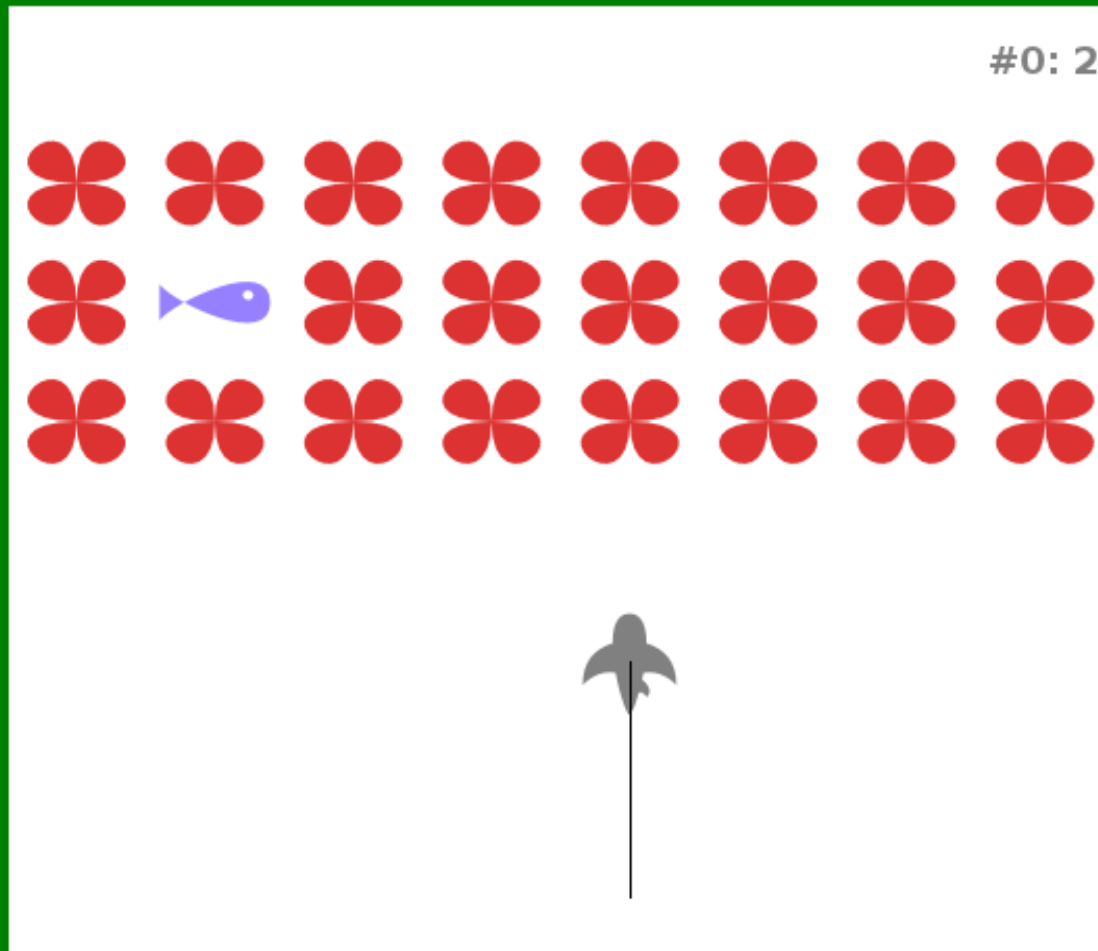
- La mémoire spatiale : architecture globale



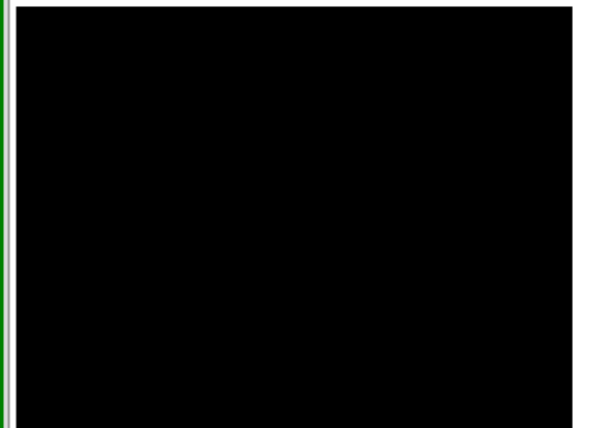
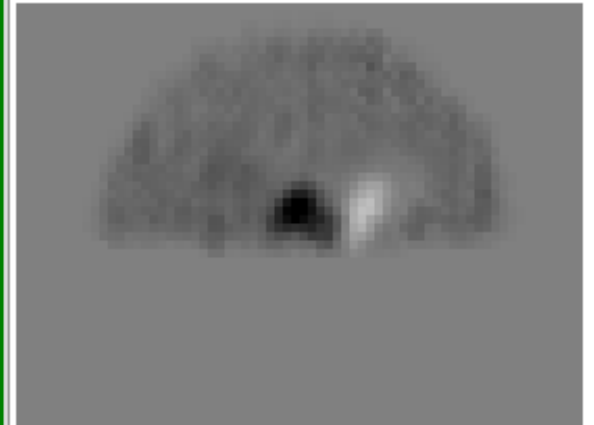
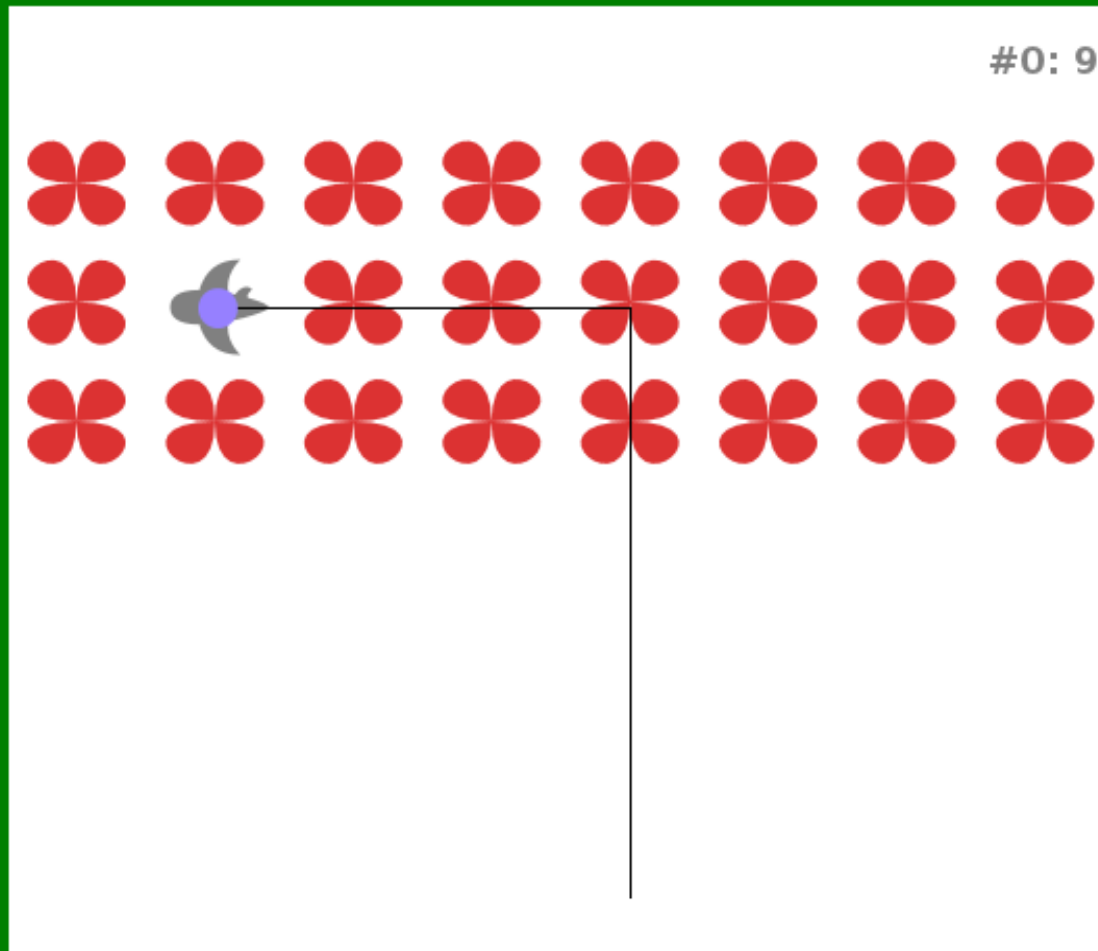
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



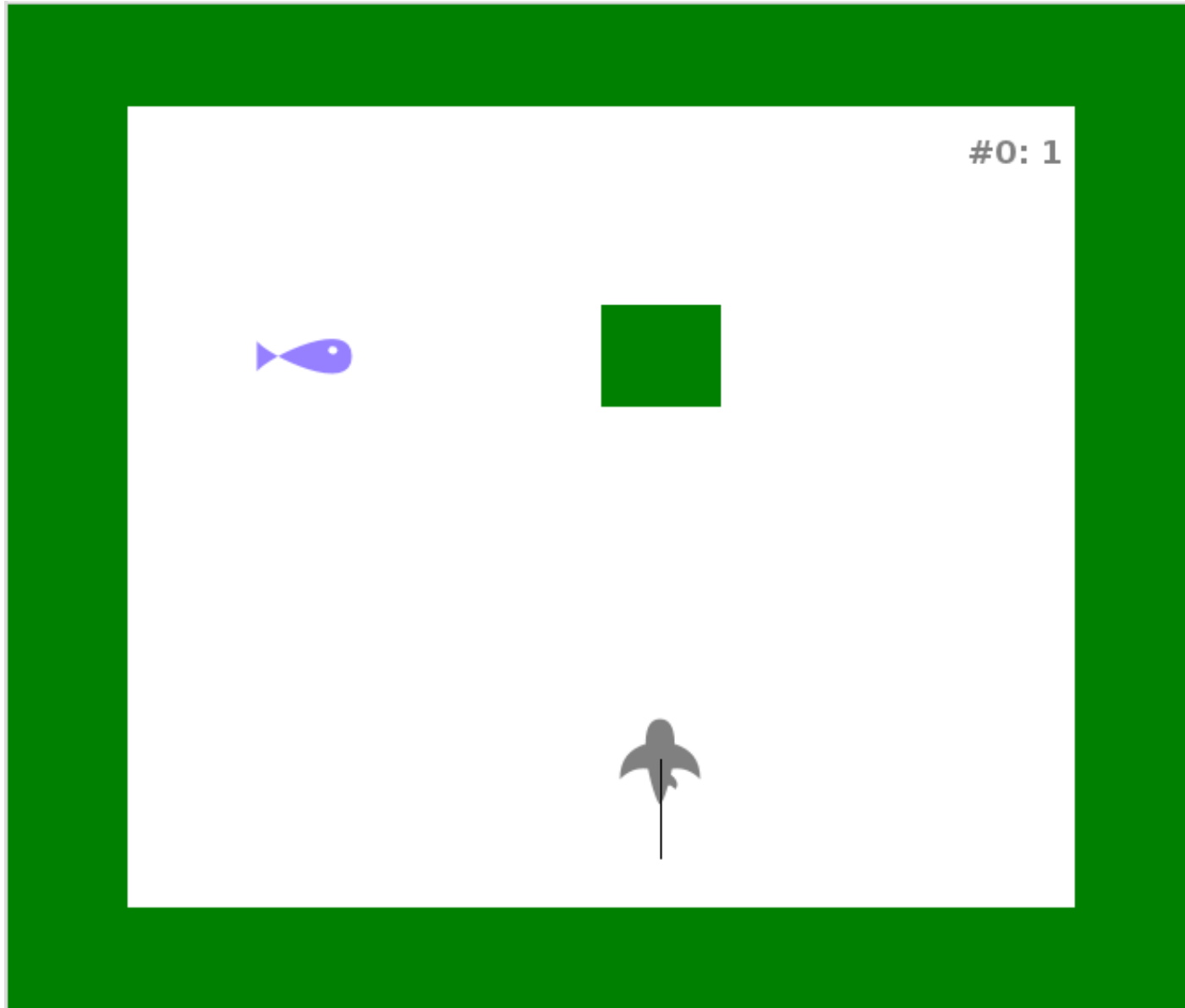
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



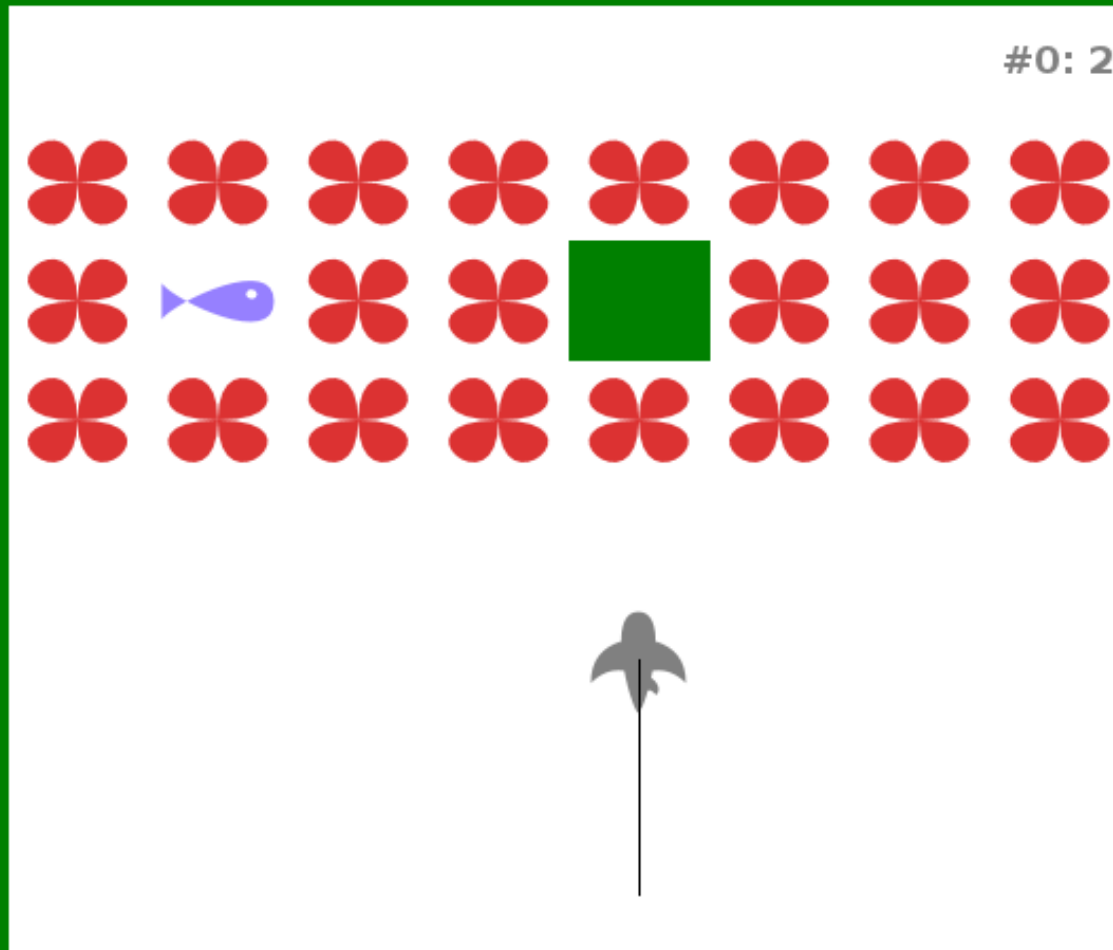
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



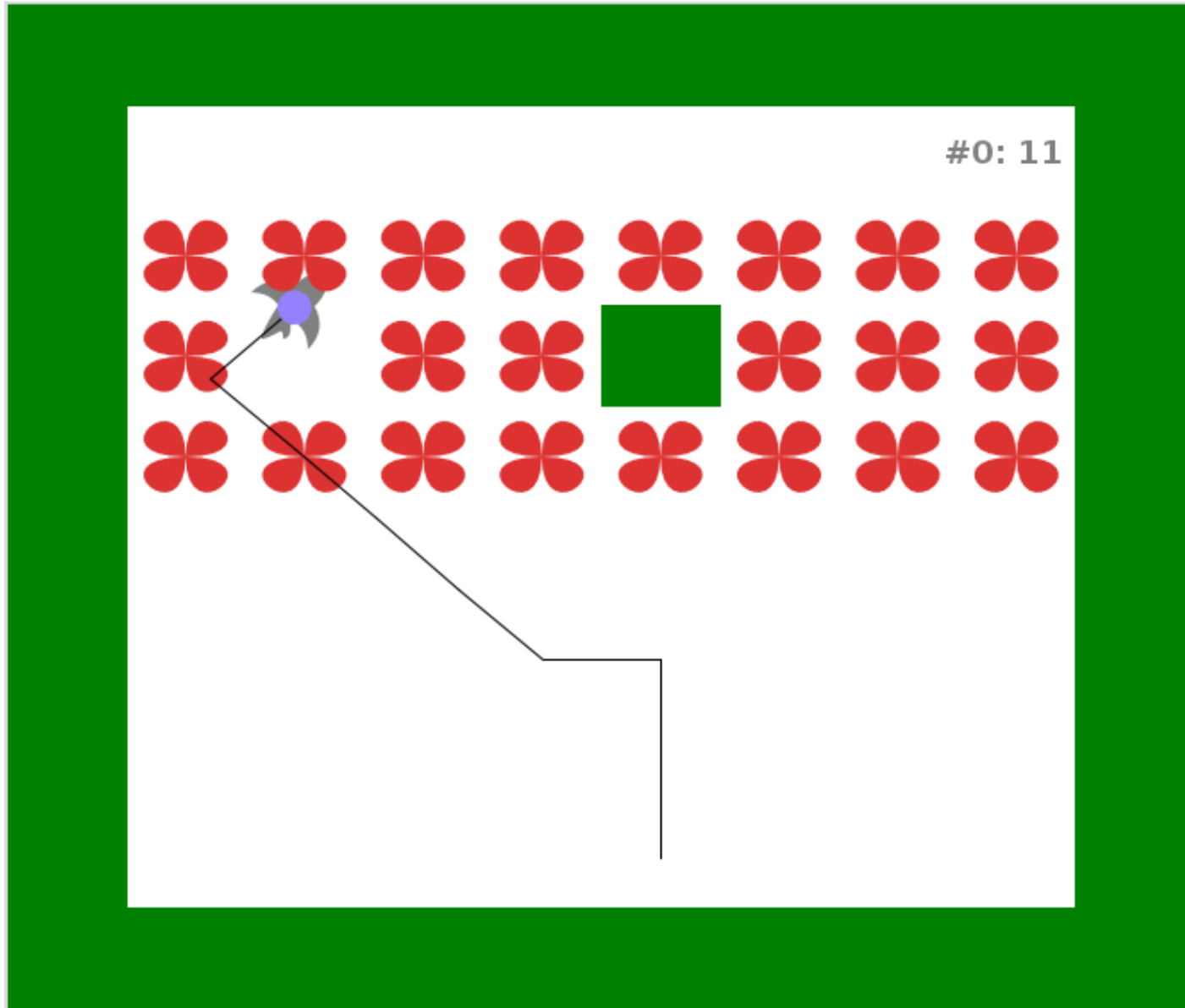
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



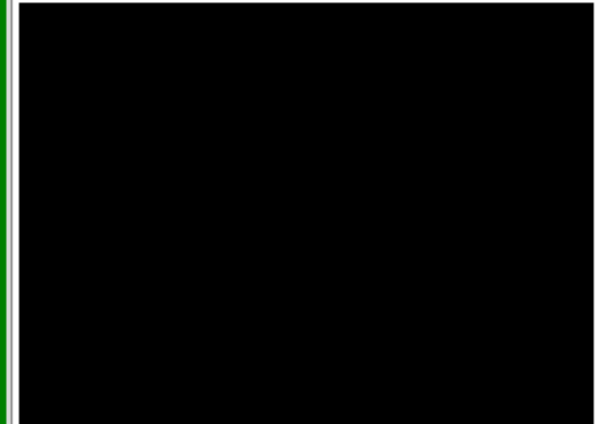
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

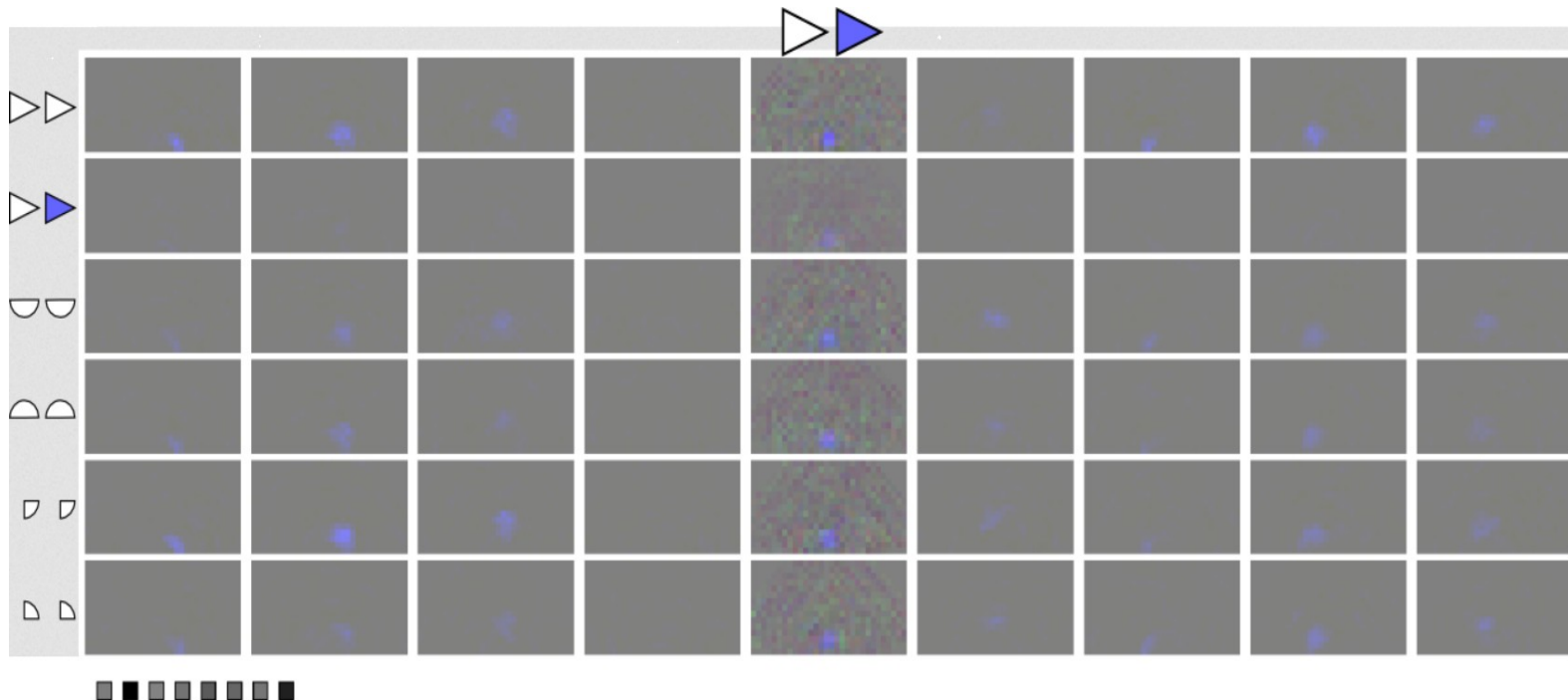


#0: 11



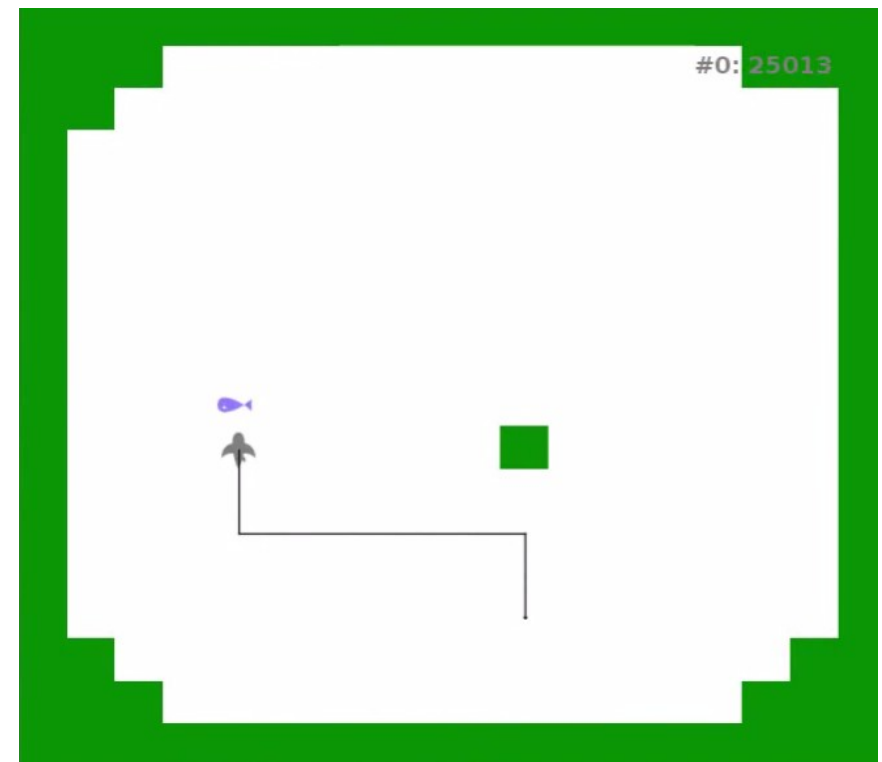
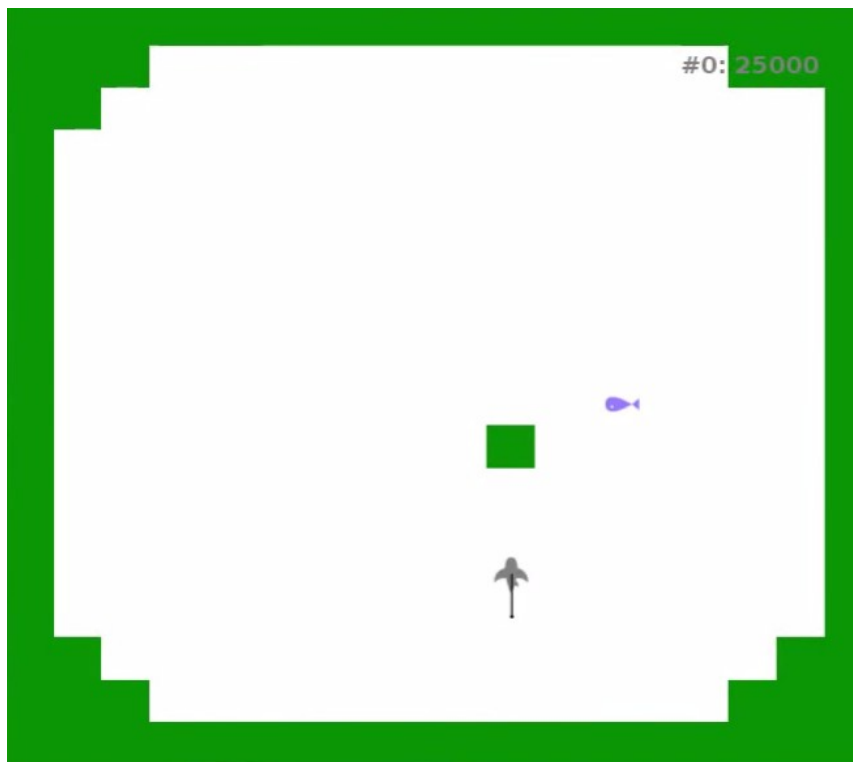
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La mémoire spatiale : Pour aller plus loin**
 - Les modèles séquentiels et spatiaux sont compatibles entre eux :
 - Un schème peut réussir ou échouer, on peut définir sa signature
 - En construisant des schèmes de deux interactions, on peut caractériser le déplacement d'éléments mobiles



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

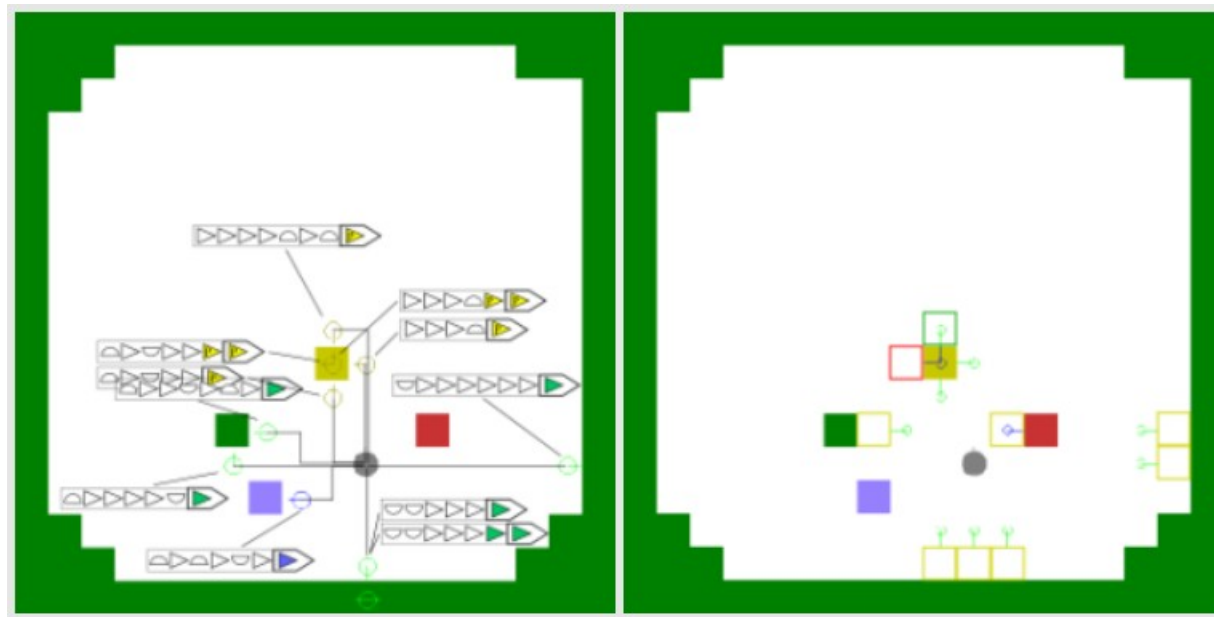
- La mémoire spatiale : Pour aller plus loin
 - L'agent devient capable d'anticiper la position future d'un élément mobile



<https://gaysimon.github.io/these/ater1.html>

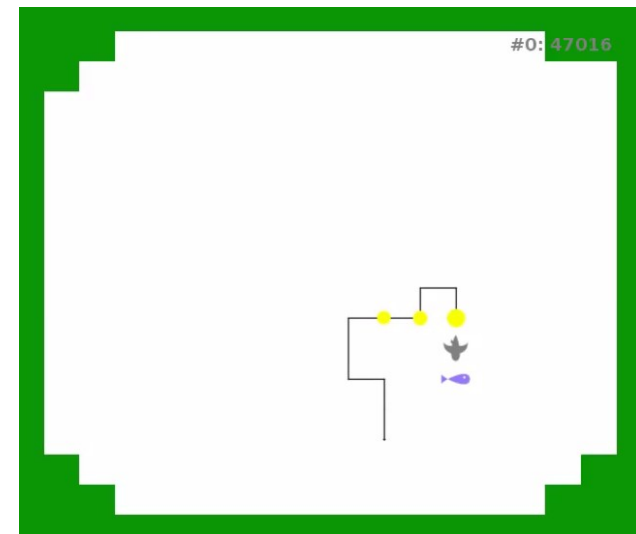
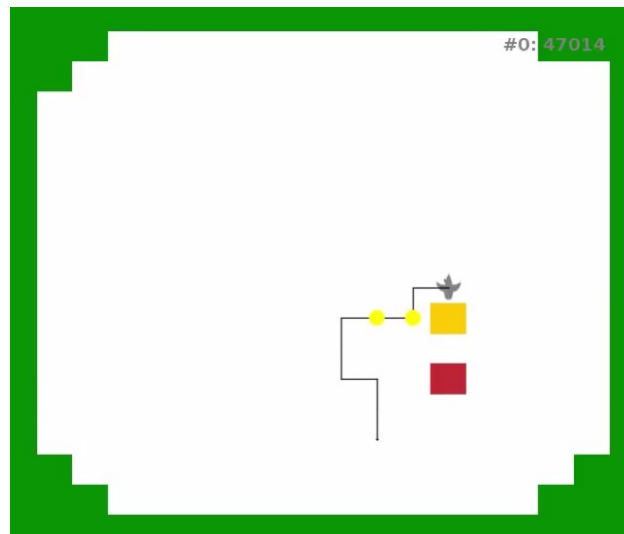
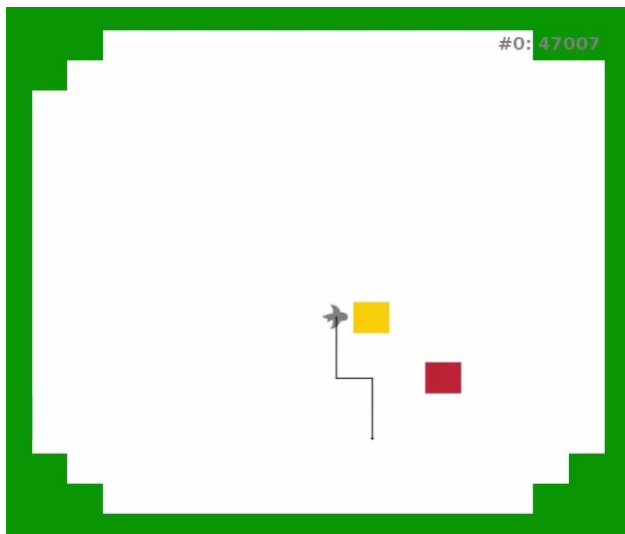
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : Pour aller plus loin
 - Avec une projection partielle des signatures, on peut détecter des affordances 'incomplètes'
 - L'agent peut détecter des affordances déplaçables et apprendre à les manipuler



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

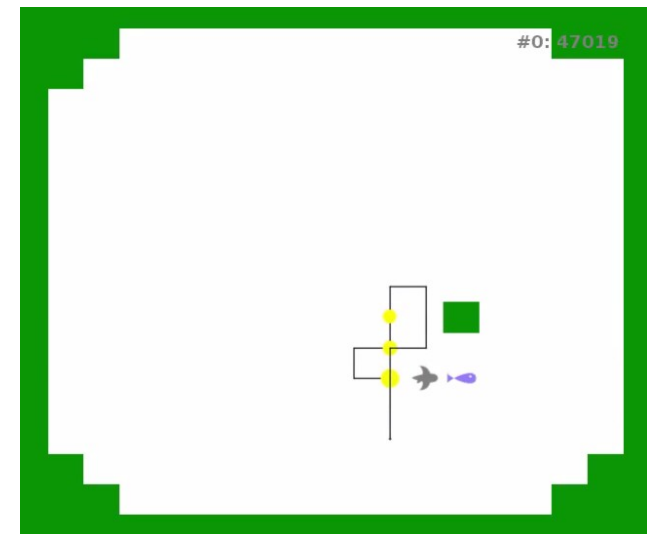
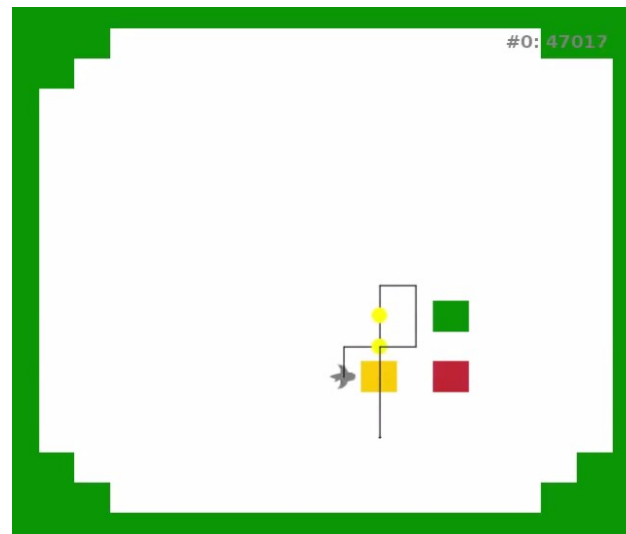
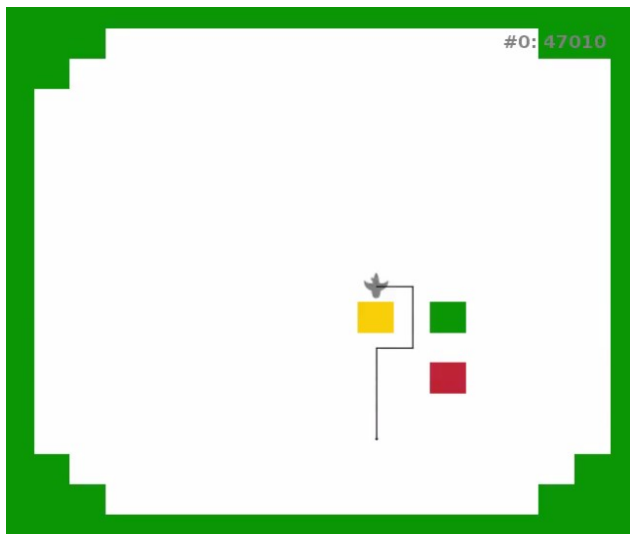
- La mémoire spatiale : Pour aller plus loin
 - L'agent peut générer des comportements pour manipuler des éléments déplaçables pour construire des affordances



<https://gaysimon.github.io/these/ater2.html>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

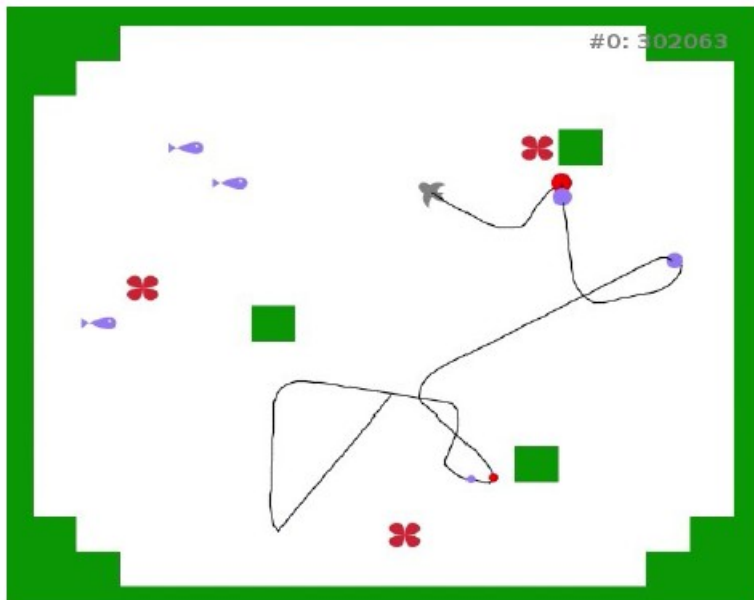
- La mémoire spatiale : Pour aller plus loin
 - L'agent peut générer des comportements pour manipuler des éléments déplaçables pour construire des affordances



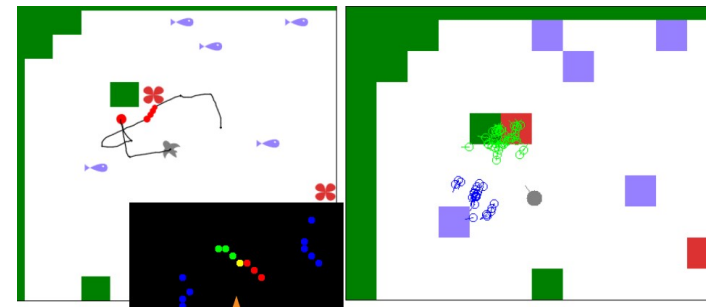
<https://gaysimon.github.io/these/ater2.html>

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : Pour aller plus loin
 - On peut également redéfinir les interactions pour un cycle d'interaction continu avec l'environnement



$i = (e, r)$ \longrightarrow $i = \boxed{\begin{array}{c} \Delta t_{\phi} \\ a \quad a \quad p \quad p \quad a \quad a \end{array}}$
experience/resultat Fenêtre temporelle d'événements
(action et perceptions indifférenciées)



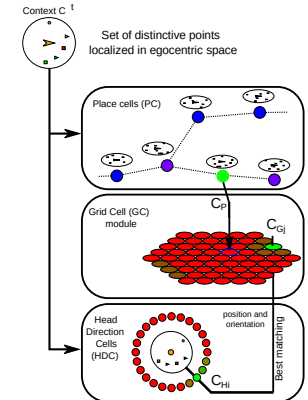
- Les signatures intègrent les propriétés de déplacement et d'inertie de l'agent

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

Et ensuite ?

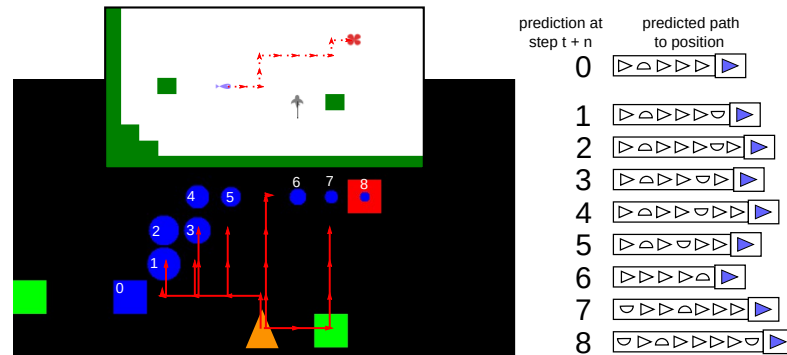
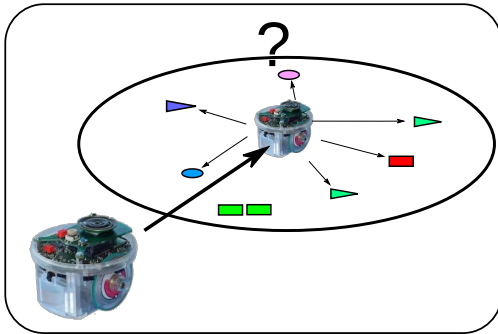
Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : et ensuite ?
 - Pistes de recherche :
 - Combiner pleinement l'aspect spatial et séquentiel
 - Individuation des agents
 - Comportements de complexité croissante
 - Utilisation de mécanismes de navigation bio-inspirés
 - Comportements 'longue distance'
- Systèmes multi-agents développementaux
 - Émergence de comportements collaboratifs
 - Émergence de formes de communication



Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- **La mémoire spatiale : et ensuite ?**
 - Pistes de recherche :
 - Anticiper les déplacements à partir des affordances entourant les autres agents



Gay et al. 2023

Introduction à l'Intelligence Artificielle : L'apprentissage développemental

- La mémoire spatiale : et ensuite ?
 - Pistes de recherche :
 - Définir des trajectoire d'interception pour définir la "position" d'un autre agent

