

# Apprentissage par renforcement

## Cours 7: Curriculum RL, Hierarchical RL & Multi-Agents

Sylvain Lamprier

UE RLD - Master DAC

2020

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

Curriculum Learning : Augmentation graduelle de la difficulté des problèmes

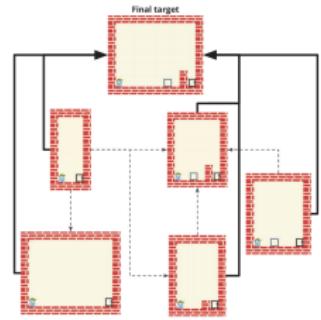
- Lorsque le problème est très complexe, il peut être efficace de ne pas l'attaquer de front
- Mais de définir un parcours d'apprentissage adapté
  - ⇒ Définition des problèmes d'entraînement : Souvent Relaxations du problème
  - ⇒ Transfert des compétences apprises sur une sous-tâche à une tâche suivante ?
  - ⇒ Définition d'un graphe de problèmes à résoudre :

---

## Algorithm Curriculum learning

---

- 1: **Given:** curriculum  $C = \langle V, E \rangle$
- 2:  $L = \{\}$  set of learned tasks
- 3:  $Q = \{\}$  set of value functions learned.
- 4: **while**  $V \setminus L \neq \emptyset$  **do**
- 5:   pick a task  $t$  in  $V \setminus L$  such that  $X_t \subseteq L$
- 6:    $Q_t = \text{learn}(t, \{Q_i | t_i \in X_t\})$
- 7:    $L = L \cup \{t\}$ ,  $Q = Q \cup \{Q_t\}$
- 8: Return  $Q_{tf}$



# Curriculum Learning : Sous-tâches

Un domaine  $\mathcal{D}$  contient l'ensemble des MDPs exprimables [Nar+16] :

- en faisant varier les degrés de liberté du domaine  $F = [F_0, \dots, F_M]$ 
  - Aux échecs un degré de liberté pourrait être la taille de l'échiquier, un autre le nombre de pièces d'un certain type, etc.
  - Chaque  $F_i \in F$  possède un intervalle de valeurs possibles  $\text{Rnge}(F_i)$ , ordonné selon la complexité.
- ou en appliquant des restrictions au MDP (e.g., suppression d'états, d'actions, modification des probabilités initiales, terminales, etc.).

[Nar+16] propose un ensemble de modifications (heuristiques) du problème :

- Task Simplification : on remplace une ou plusieurs caractéristiques  $F_i$  par une valeur inférieure
- Promizing initialization : on concentre les probabilité d'état initial autour des zones de fort reward (utile dans le cas de rewards très sparses)
- Action Simplification : retrait des actions qui tendent souvent à des mauvais taux de récompenses dans le problème cible
- Mistake Learning : ajout de chemins pour reconsiderer des mauvais choix constatés dans la tâche cible
- Ajout de sous-tâches, etc.

... Mais toutes ces modifications nécessitent une connaissance experte de la tâche cible !

# Curriculum Learning : Transfert

Comment transférer les compétences apprises entre tâches successives ?

⇒ Initialiser  $\pi$  ou  $Q$  selon tâches précédentes...

⇒ ...ou Reward shaping [NHR99]

- Ajout d'un signal de reward additionnel, dépendant de la tâche apprise :  
 $r'_t = r_t + f_t$ , avec  $f$  une fonction de "shaping"
- Une fonction de shaping permet de rajouter des feedbacks à la récompense de l'environnement (e.g., pour densifier les rewards ou donner des conseils experts)
- [NHR99] montre qu'avec  $f_t$  de la forme d'une différence de potentiels :  
 $f_t = \gamma\phi(s_{t+1}) - \phi(s_t)$ , on peut retrouver  $\pi^*$  à partir des valeurs optimales  $Q^F$  d'une procédure type Q-Learning qui utilise  $r_t + f_t$  :

À convergence, on a :

$$Q^F(s, a) = \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + F(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q^F(s', a')] \text{ (optimalité de Bellman)}$$

Soit  $Q'(s, a) = Q^F(s, a) + \phi(s)$ , on a alors  $Q^F(s, a) = Q'(s, a) - \phi(s)$  et :

$$\begin{aligned} Q'(s, a) &= \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + \gamma\phi(s') - \phi(s) + \gamma \max_{a'} Q^F(s', a')] + \phi(s) \\ &= \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + \gamma \max_{a'} (Q^F(s', a') + \phi(s'))] \\ &= \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q'(s', a')] \end{aligned}$$

⇒ Equation d'optimalité de Bellman, donc :  $Q'(s, a) = Q^*(s, a)$

⇒  $Q^*(s, a) = Q^F(s, a) + \phi(s)$

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a) = \arg \max_a Q^F(s, a) + \phi(s) = \arg \max_a Q^F(s, a) = \pi^F(s)$$

# Curriculum Learning : Reward Shaping

## Reward Shaping

- ⇒ La politique  $\pi^F$  déduite des valeurs de  $Q^F$  est alors équivalente à la politique optimale qu'on obtiendrait sans reward shaping
- ⇒ ... Mais les valeurs  $F$  peuvent être utiles à la convergence de l'algorithme
- On note la similarité avec Actor-Critic basé sur  $r_t + \gamma V(s_{t+1}) - V(s_t)$

Mais la forme de  $f_t = \gamma\phi(s_{t+1}) - \phi(s_t)$  limitée à des guidages uniquement sur les états

- [WCE03] étend le reward shaping aux "look ahead advices" qui permettent de considérer des conseils etat-action
- Avec  $f_t = \gamma\phi(s_{t+1}, a_{t+1}) - \phi(s_t, a_t)$ , on peut retrouver  $\pi^*$  à partir des valeurs optimales  $Q^F$  d'une procédure type Q-Learning qui utilise  $r_t + f_t$  et une politique cible biaisée  $\pi^b(s) = \arg \max_a Q(s, a) + \phi(s, a)$  :

À convergence, on a (optimalité de Bellman) :

$$Q^F(s, a) = \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + F(s, a, s') + \gamma Q^F(s', a')] \text{ avec } a' = \arg \max_a Q^F(s', a) + \phi(s', a)$$

Soit  $Q'(s, a) = Q^F(s, a) + \phi(s, a)$ , on a alors  $Q^F(s, a) = Q'(s, a) - \phi(s, a)$  et :

$$\begin{aligned} Q'(s, a) &= \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + \gamma(Q^F(s', a') + \phi(s', a'))] \text{ avec } a' = \arg \max_a Q^F(s', a) + \phi(s', a) \\ &= \mathbb{E}_{s'}[R(s, a, s') + \gamma Q'(s', a')] \text{ avec } a' = \arg \max_a Q'(s', a) \end{aligned}$$

⇒ Equation d'optimalité de Bellman, donc :  $Q'(s, a) = Q^*(s, a)$

⇒  $Q^*(s, a) = Q^F(s, a) + \phi(s, a)$

⇒ On peut alors retrouver les valeurs de la politique optimale selon  $R$ , tout en se servant des  $F$  pour explorer

# \*Curriculum Learning : Parcours

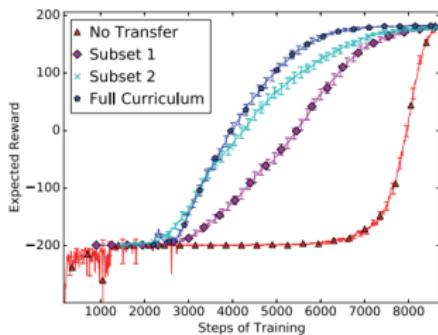
[Sve+17] se sert du reward shaping pour transférer les connaissances dans un parcours de curriculum :

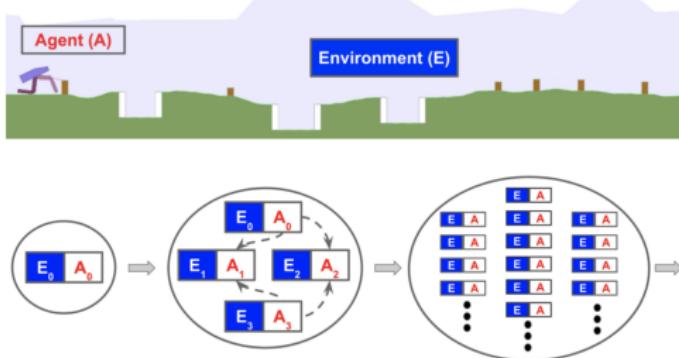
- Domaine d'application de  $Q_i$  de la tâche  $i$  sur les états  $S_j$  de la tâche  $j$  :  $D_{Q_i}(j) = \{s_j \in S_j \mid \exists a \in A_i \text{ tel que } Q_i(s_j, a) \text{ est défini}\}$
- Potentiel de transfert de  $i$  vers  $j$  :  $v(i, j) = \frac{D_{Q_i}(j)}{1 + |S_i| - |S_j|}$  (heuristique : plus on peut reutiliser les valeurs Q de  $i$ , plus on considère un bon transfert)
- Clustering des tâches selon caractéristiques puis création de dépendances entre tâches ou groupes de tâches si potentiel de transfert  $\geq \epsilon$
- Reward shaping :

$$\phi_{i,j}(s, a) = \begin{cases} Q_i(s, a) & \text{si } s \in D_{Q_i}(j) \wedge a \in A_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\phi_j(s, a) = \sum_{i \in X_j} \phi_{i,j}(s, a)$$

avec  $X_j$  l'ensemble des tâches parentes de la tâche  $j$  dans le graphe de curriculum





Algorithme de curriculum évolutionnaire :

- ① Génération de nouveaux environnements  $E$  à partir des environnements courants (mutations) ;
- ② Sélection des  $N$  meilleurs couples selon un critère de Novelty.
- ③ Optimisation d'agents  $A_i$  dans leur environnement associé  $E_i$  ;
- ④ Conservation des couples  $(E_i, A_j)$  obtenant un score  $R \in [R_{min}, R_{max}]$  (ni trop dur ni trop facile)
- ⑤ Recherche de transfert : si il existe un agent  $A_i$  meilleur que  $A_j$  sur chaque  $E_j$ , on associe  $A_i$  à  $E_j$
- ⑥ Retour en 1

Vidéo POET : <https://www.youtube.com/embed/D1WWhQY9N4g>

# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

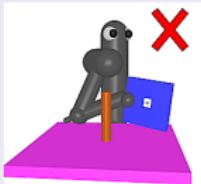
... Mais établissement des tâches très heuristique (et dépendant de la tâche finale) !

⇒ Et si on partait du but ? : démarrer de zones de plus en plus loin du but, plutôt que composer des stratégies de manière bottom-up avec connaissance experte

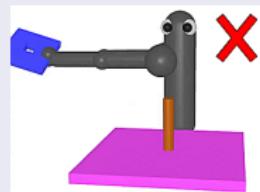
Exemple de tâche avec reward très sparse :

- Contrôle d'un robot récompensé si il arrive à insérer un anneau sur un bâton
- ⇒ Aucun reward tant qu'on n'a pas atteint le but recherché

Agent aléatoire a très peu de chances d'arriver à obtenir le moindre feedback si il démarre toujours loin de la cible :



Même si on fait du reward shaping (non expert) pour densifier le reward selon proximité à la cible :



⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Si on est très proche du but, même un agent aléatoire peut réussir la tâche et commencer à apprendre
- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

$S^g$ : goal states we want to reach from everywhere.

$s^g$ : one goal state is provided



- Hypothèse 1 : On connaît au moins 1 des buts finaux du problème  $s^g \in S^g$
- Hypothèse 2 : On est capable de faire démarrer l'environnement de n'importe quel état arbitraire
- Hypothèse 3 : À partir de n'importe quel état que l'on pourrait échantillonner comme état de départ, il existe au moins un chemin vers les états finaux

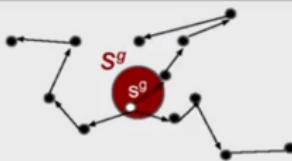
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 1:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- À partir de l'état de départ, marches aléatoires pour trouver des points d'intérêt proches

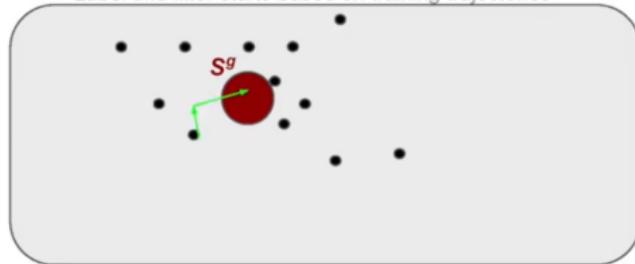
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 1:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- Collecte de trajectoires et Apprentissage RL à partir de tous les points trouvés (exemple TRPO)

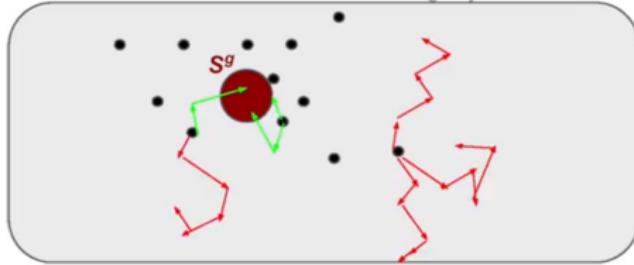
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 1:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- Collecte de trajectoires et Apprentissage RL à partir de tous les points trouvés (exemple TRPO)

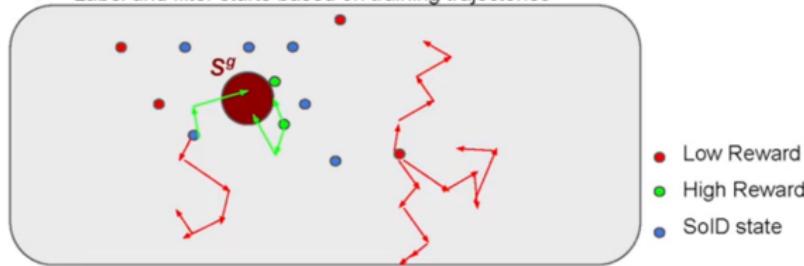
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 1:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- Selection des points d'intérêt (Solid States)
- Un point  $s_0^i$  est intéressant comme point de départ si (reward binaire, succès/échec final) :
  - le succès à partir du point est suffisamment incertain (sinon  $V(s_0^i) \approx 1$ , ce qui donne un gradient PG quasi nul)
  - le succès à partir du point est suffisamment probable (sinon  $V(s_0^i) \approx 0$ , ce qui donne aussi un gradient PG quasi nul)
- On sélectionne les points dont  $V(s_0^i)$  est dans  $[R_{min}; R_{max}] = [0.1; 0.9]$
- Estimation de  $V(s_0^i)$  selon traces collectées dans la phase d'apprentissage

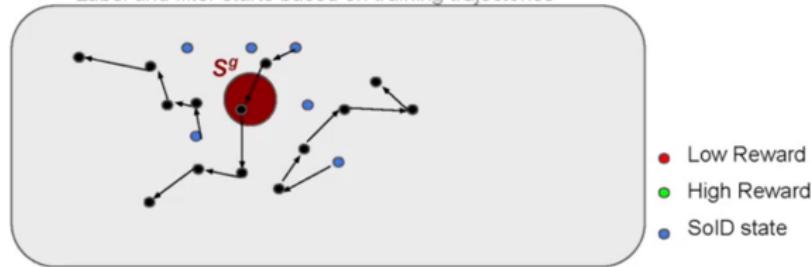
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 2:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- À partir des points retenus, marches aléatoires pour trouver de nouveaux points d'intérêt
- Hypothèse : les points proches des points d'intérêt identifiés sont eux aussi probablement des points d'intérêt

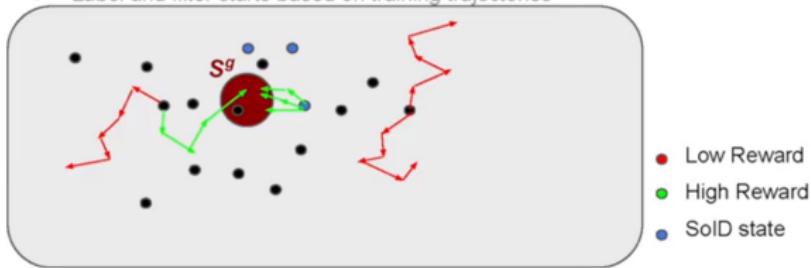
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 2:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- À nouveau apprentissage à partir de l'ensemble des points obtenus (nouveaux et anciens SolID)

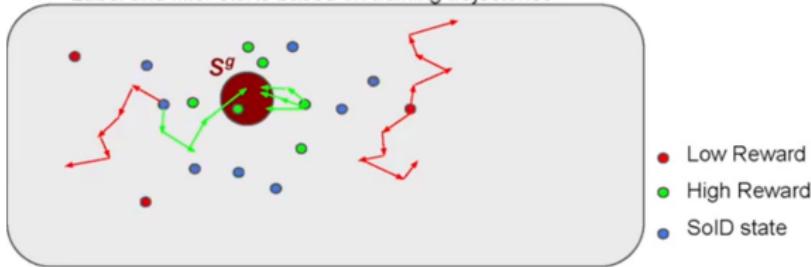
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 2:

- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



- À nouveau apprentissage à partir de l'ensemble des points obtenus (nouveaux et anciens SoID)
- Re-selection, etc...

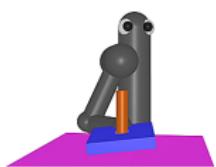
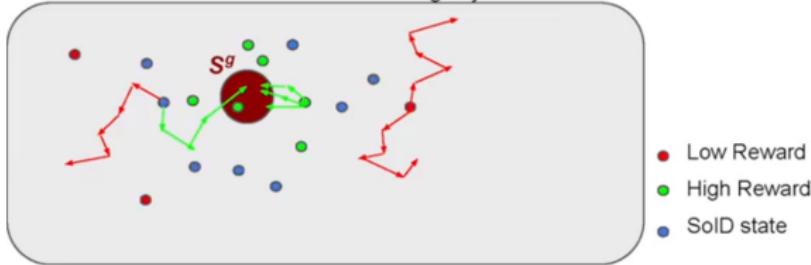
# Reverse curriculum generation for reinforcement learning

⇒ Reverse curriculum generation for reinforcement learning [Flo+17b]

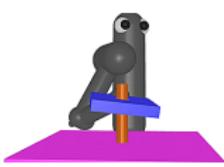
- Idée : faire redémarrer l'agent de plus en plus loin progressivement

## Iteration 2:

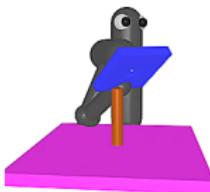
- Run Brownian motion
- Obtain trajectories from collected starts to train policy
- Label and filter starts based on training trajectories



Start



Middle



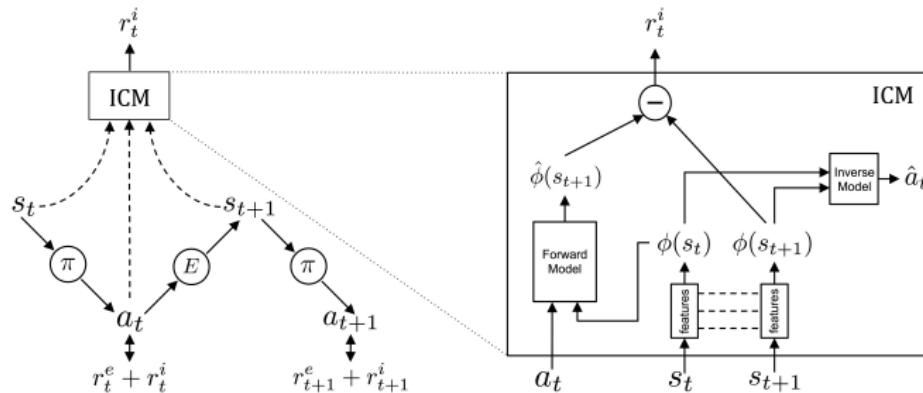
End

# Curiosity Driven RL

... Mais nécessite de savoir démarrer de n'importe où !

## Curiosity Driven RL [Pat+17]

- Apprentissage de rewards internes  $r_t^i$  pour l'exploration
  - Inverse Model vise à apprendre des représentations d'état sans perte d'info
  - Puis comparaison entre représentation du prochain état et sa prédiction par Forward Module
- ⇒ Si l'état d'arrivée est peu prévisible par le modèle : zone peu connue, à explorer plus avant et donc fort reward interne
- ⇒ Prise en compte de la somme des rewards externes (exploitation) et internes (exploration) dans le rollout



# Curriculum RL Automatique

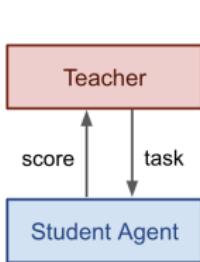
... Mais pas vraiment d'apprentissage incrémental sur la tâche finale (juste + curieux) !

⇒ Problématique si reward sparse et espace de grande taille

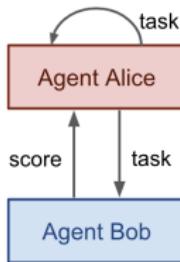
⇒ Problématique si zones difficiles à prédire

⇒ Objectif : Apprentissage de curriculum automatique [Por+20]

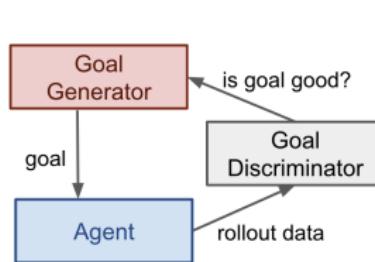
- 5 types de méthodes [Wen20] :



(1) Teach-Student

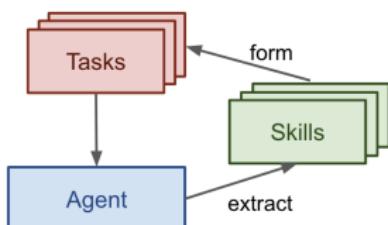


(2) Self-Play

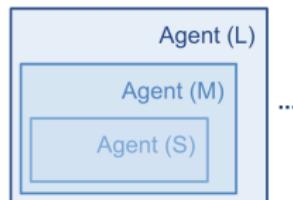


(3) Goal Generation

■ curriculum producer  
■ policy of interest



(4) Skills Extraction



(5) Distillation



## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
  - Teach-Student
  - Self-play
  - Goal-Generation
  - Skills Extraction
  - Distillation de politiques
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
  - Teach-Student
  - Self-play
  - Goal-Generation
  - Skills Extraction
  - Distillation de politiques
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Curriculum guidé par un professeur

Selon un ensemble  $\Gamma$  de  $N$  sous-tâches prédéfinies :

- Agent professeur en charge de sélectionner une sous-tâche  $\tau \in \Gamma$  sur laquelle entraîner l'agent élève pendant  $k$  itérations [Mat+17] :



Figure 1: The Teacher-Student setup

- Sélection par le professeur basée sur des estimations de progrès d'apprentissage (Learning Progress) :  $r_t = x_t^{(i)} - x_{t'_i}^{(i)}$ , avec
  - $i$  la tâche choisie pour la période d'apprentissage  $t$ ,
  - $x_t^{(i)}$  la récompense cumulée de l'agent  $i$  sur cette tâche pendant la période  $t$ ,
  - $t'_i$  la période précédente où  $i$  avait été sélectionnée
- Objectif : maximiser  $\sum_{t=1}^T r_t = \sum_{i=1}^N x_{T_i}^{(i)}$
- Maximisation en ligne + Rewards bruités + Compromis exploration/exploitation  $\Rightarrow$  Problème de bandits à  $N$  bras
- Version avec tâches continues (sélection de paramètres continus spécifiant la tâche) proposée dans [Por+19]

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
  - Teach-Student
  - Self-play
  - Goal-Generation
  - Skills Extraction
  - Distillation de politiques
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

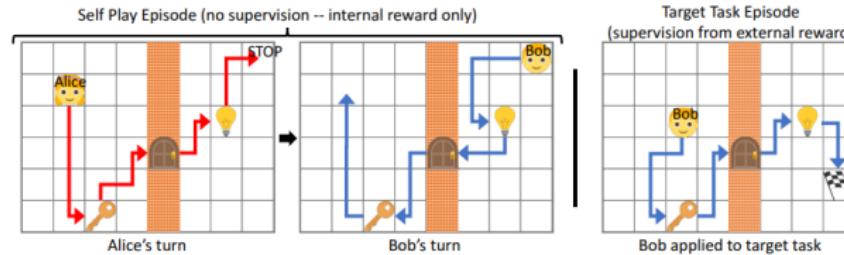
## 3 Multi-Agents RL

# Exploration : Automatic Curricula Via Asymmetric Self-Play

... Mais nécessite toujours de la connaissance expert pour spécifier les sous-tâches !

Et si on faisait travailler le professeur sur les mêmes problèmes que l'élève ?

- Hypothèse : environnement réversible ou réinitialisable
- Automatic Curricula Via Asymmetric Self-Play [Suk+17] : faire rejouer à l'élève (Bob) les trajectoires réalisées par le professeur (Alice)
- Objectif de Bob : compléter chaque problème en un temps minimal  $\Rightarrow r_B = -\gamma t_B$ , avec  $t_B$  le temps mis par Bob pour compléter la tâche
- Objectif d'Alice : proposer des problèmes adaptés à Bob  $\Rightarrow r_A = \max(0, t_B - t_A)$
- ⇒ Entraîner Bob à atteindre n'importe quel état à partir de n'importe quel autre



Tâches spécifiées par Alice selon des buts à atteindre :

- Politique de Bob dirigée par un (ou des) but  $g$  :  $\pi_B(a|s, g)$
- Buts spécifiés par Alice selon  $\pi_A(a|s, s_0)$ 
  - Politique conditionnée par le point de départ  $s_0$  pour permettre à Alice de mesurer la difficulté
  - Possibilité de conditionner également par des sous-buts qu'elle a déjà définis
- $t_B$  borné par  $t_{Max} - t_A$ 
  - Plus  $t_A$  petit, plus  $t_B$  a la possibilité d'être grand
  - ⇒ Alice a intérêt à produire une tâche qu'elle complète le plus rapidement et que Bob ne sait pas résoudre
  - ⇒ Bob apprend progressivement car il a toujours une tâche juste au-delà de ses capacités.

# Exploration : Automatic Curricula Via Asymmetric Self-Play

---

**Algorithm 1** Pseudo code for training an agent on a self-play episode

---

```
function SELFPLAYEPISODE(REVERSE/REPEAT, $t_{\text{MAX}}$ ,  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ )
     $t_A \leftarrow 0$ 
     $s_0 \leftarrow \text{env.observe}()$ 
     $s^* \leftarrow s_0$ 
    while True do
        # Alice's turn
         $t_A \leftarrow t_A + 1$ 
         $s \leftarrow \text{env.observe}()$ 
         $a \leftarrow \pi_A(s, s_0) = f(s, s_0, \theta_A)$ 
        if  $a = \text{STOP}$  or  $t_A \geq t_{\text{Max}}$  then
             $s^* \leftarrow s$ 
            env.reset()
            break
        env.act( $a$ )
         $t_B \leftarrow 0$ 
        while True do
            # Bob's turn
             $s \leftarrow \text{env.observe}()$ 
            if  $s = s^*$  or  $t_A + t_B \geq t_{\text{Max}}$  then
                break
             $t_B \leftarrow t_B + 1$ 
             $a \leftarrow \pi_B(s, s^*) = f(s, s^*, \theta_B)$ 
            env.act( $a$ )
         $R_A \leftarrow \gamma \max(0, t_B - t_A)$ 
         $R_B \leftarrow -\gamma t_B$ 
        policy.update( $R_A, \theta_A$ )
        policy.update( $R_B, \theta_B$ )
    return
```

---

# Exploration : Automatic Curricula Via Asymmetric Self-Play

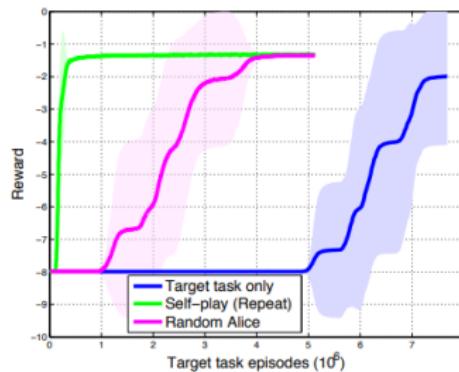
⇒ Fine-tuning de Bob sur la tâche cible (son but est alors  $\emptyset$ )

**Algorithm 2** Pseudo code for training an agent on a target task episode

---

```
function TARGETTASKEPISODE( $t_{\text{MAX}}$ ,  $\theta_B$ )
     $t \leftarrow 0$ 
     $R \leftarrow 0$ 
    while True do
         $t \leftarrow t + 1$ 
         $s \leftarrow \text{env.observe}()$ 
         $a \leftarrow \pi_B(s, \emptyset) = f(s, \emptyset, \theta_B)$ 
        if env.done() or  $t \geq t_{\text{MAX}}$  then
            break
        env.act( $a$ )
         $R = R + \text{env.reward}()$ 
    policy.update( $R, \theta_B$ )
return
```

---



## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
  - Teach-Student
  - Self-play
  - Goal-Generation
  - Skills Extraction
  - Distillation de politiques
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# HER : Hindsight Experience Replay

... Mais limité à des tâches dont les récompenses dépendent uniquement du temps mis pour atteindre des états-but ! (+ requiert reversibilité/réinitialisation)

Comment dépasser cela pour générer des buts adaptés ?

Contexte : Problèmes multi-goals, où le but peut changer à chaque épisode :

- Politique dirigée par un but :  $\pi(a|s,g)$
- Universal Value Function :  $Q : S \times A \times G \rightarrow \mathbb{R}$  où  $G$  est l'ensemble des buts
- Exemple : prendre un objet et l'emmener à une position précise
- Tâches très complexes pour algos classiques type DDPG lorsque rewards sparses

## Exemple de tâche jouet

On cherche un vecteur binaire en effectuant des permutations successives de bits :

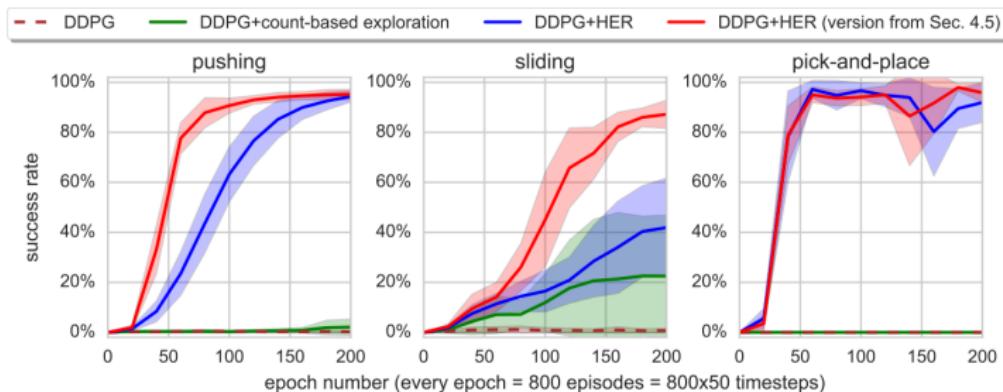
- Espace des états-but très large
  - Rewards très peu informatifs (-1 à chaque step)
- ⇒ [And+17] montre que DQN est incapable de résoudre le problème si taille des vecteurs > 13 (après quoi le taux de succès tombe à 0)

```
Initial State: [0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1]
Goal: [1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0]
State at step 0: [1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1]
State at step 1: [1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1]
State at step 2: [1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1]
State at step 3: [1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1]
State at step 4: [1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1]
State at step 5: [1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0]
State at step 6: [1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0]
Success!
Press enter...□
```

- HER [And+17] tire profit des expériences passées en spécifiant les états rencontrés comme buts des actions réalisées dans l'épisode

# HER : Hindsight Experience Replay

- Plutôt que de dire seulement à l'agent que ce qu'il fait est bon au mauvais selon le but spécifié, on l'informe de ce qu'il fait bien :
  - ⇒ il a réussi à atteindre les états qu'il a rencontrés au cours de l'épisode
- Dans un épisode, toutes les actions  $a_i$  prises avant  $t$  ont permis d'atteindre  $s_t$  :
  - ⇒ On peut se servir de  $s_t$  pour apprendre  $Q(s_i, a_i, s_t)$  et  $\pi(a_i | s_i, s_t)$
  - HER : ajout de transitions  $(s_t^\tau, a_t^\tau, s_{t+1}^\tau, s_x^\tau)$ , avec  $x > t$ , en plus des transitions  $(s_t^\tau, a_t^\tau, s_{t+1}^\tau, g^\tau)$  dans le buffer de replay, avec  $g^\tau$  le but initial de l'épisode  $\tau$  (apprentissage DDPG)
- ⇒ On apprend à explorer l'espace efficacement, Rewards plus denses
- ⇒ Agent capable de résoudre des tâches à buts multiples



- ⇒ Efficace même pour des problèmes à buts uniques

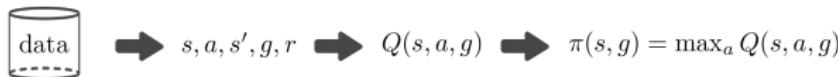
# RIG : Visual Reinforcement Learning with Imagined Goals

... Mais nécessite d'avoir un but exprimable dans un espace d'états régulier !

RIG [Nai+18] exploite le même genre d'idée mais avec des buts imaginés

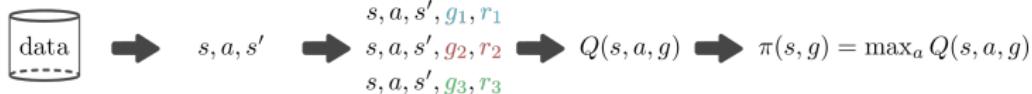
Q-Learning classique :

1. Collect
2. Sample
3. Train
4. Extract



Q-Learning plus efficace, si on avait accès à un moyen de générer des buts et des rewards correspondants à chaque transition :

1. Collect
2. Sample
3. Relabel
4. Train
5. Extract

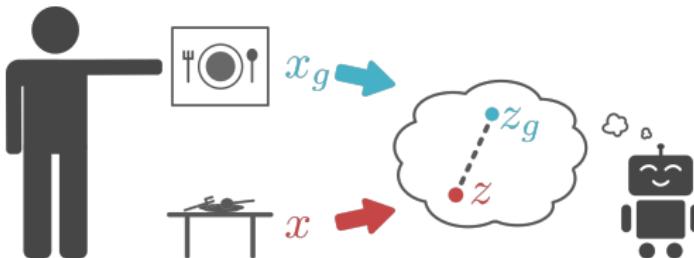


Problèmes (dans le cadre de buts visuels dans RIG) :

- Comment spécifier les sous-buts ?
- Comment attribuer des récompenses correspondantes ?

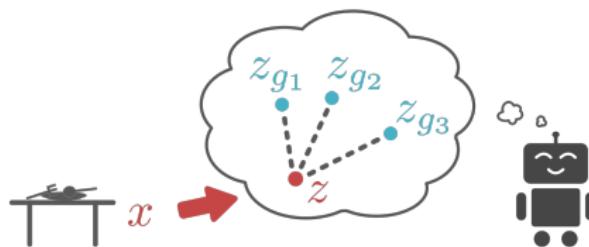
# RIG : Visual Reinforcement Learning with Imagined Goals

Encodage des images (correspondant aux différents états) dans un espace latent de plus faible dimension (par exemple par VAE)

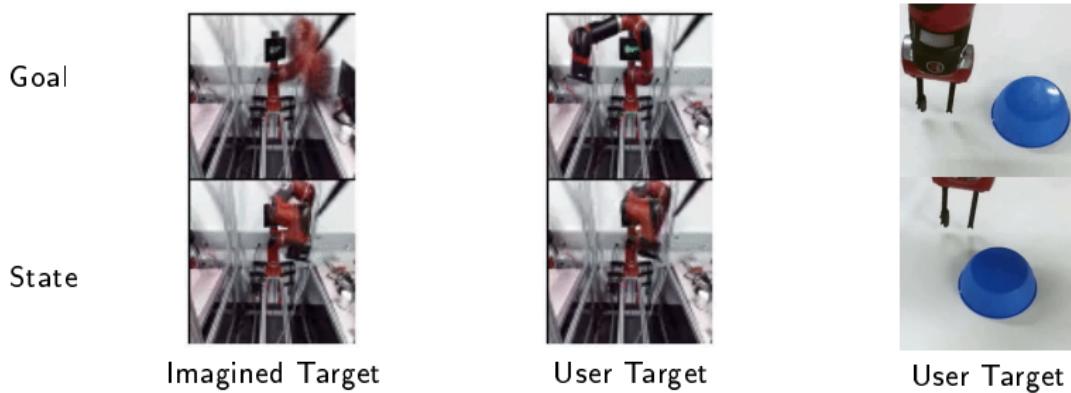
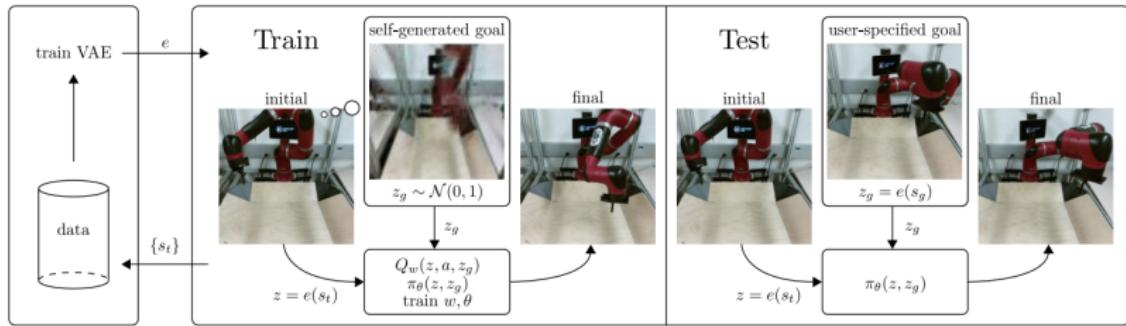


⇒ Reward peut être défini comme une distance au but dans cet espace

Imagination de différents sous-but, selon les distributions dans l'espace latent :



# RIG : Visual Reinforcement Learning with Imagined Goals



# Goal Generation : GoalGAN

... Mais pas de filtrage des buts selon le niveau de l'agent !

GoalGAN [Flo+17a] définit :

- Une politique  $\pi(a|s, g)$  qui est optimisée pour atteindre des états cible  $s \in S^g$  pour les buts  $g$  qu'on lui demande d'atteindre, selon reward :  
 $r^g(s_t, a_t, s_{t+1}) = \mathbb{I}\{s_{t+1} \in S^g\}$
- Un critère de sélection des buts utiles parmi les états atteints par la politique
  - Soit  $R^g(\pi) = \mathbb{P}(\exists t \in [1 \dots T] : s_t \in S^g \mid \pi, g)$
  - Goals of Intermediate Difficulty définis à l'itération  $i$  selon  
 $GOID_i := \{g : R_{\min} \leq R^g(\pi_i) \leq R_{\max}\} \subseteq \mathcal{G}$
- Un générateur de buts qui décode un but à partir d'une variable aléatoire  $z \sim p_z(z) = \mathcal{N}(0, 1)$
- Un discriminateur  $D$  qui prédit 1 si un but est d'intérêt (selon  $GOID_i$ ) et facilement atteignable par  $\pi_i$  (semble issu de  $p_{data}$  correspondant à la distribution d'états du replay buffer).

Problème d'optimisation adverse (avec  $y_g = 1$  si  $g \in GOID_i$ , 0 sinon) :

$$\begin{aligned} \min_D V(D) &= \mathbb{E}_{g \sim p_{\text{data}}(g)} [y_g(D(g) - 1)^2 + (1 - y_g)(D(g) + 1)^2] \\ &\quad + \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [(D(G(z)) + 1)^2] \\ \min_G V(G) &= \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [(D(G(z)) - c)^2] \end{aligned}$$

$\Rightarrow c = 0$  : On cherche à générer des **buts sur lesquels le discriminateur est indécis** (i.e., buts de niveau adapté à l'agent)

## Goal Generation : GoalGAN

---

**Algorithm 1** Generative Goal Learning

**Input:** Policy  $\pi_0$

**Output:** Policy  $\pi_N$

$$(G, D) \leftarrow \text{initialize\_GAN}()$$

$$goals_{old} \leftarrow \emptyset$$

**for**  $i \leftarrow 1$  **to**  $N$  **do**

$z \leftarrow \text{sample\_noise}(p_z(\cdot))$

$goals \leftarrow G(z) \cup \text{sample}(goals_{\text{old}})$

$$\pi_i \leftarrow \text{update\_policy}(goals, \pi_{i-1})$$

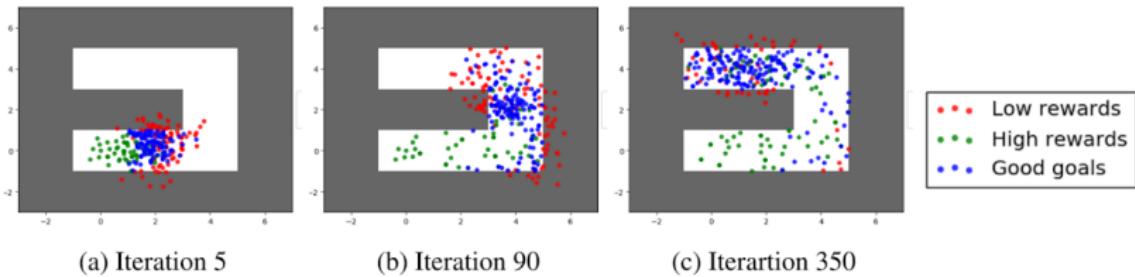
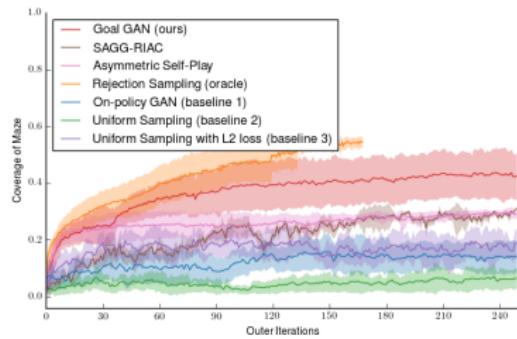
*returns*  $\leftarrow$  evaluate\_policy(*g*)

*labels*  $\leftarrow$  label.goals(*returns*)

$(G, D) \leftarrow \text{train\_GAN}(goals, labels,$

$goals_{\text{old}} \leftarrow \text{update\_replay}(goals)$

end for



# Goal Generation : GoalGAN

Extension de GoalGAN dans [Rac+19] :

- Juge  $J$  appris à prédire le reward pour un but généré par le générateur  $S$  selon un niveau de faisabilité  $f$  :

$$\mathcal{L}_{\text{XE}} = -\mathbb{E}_{z \in \mathcal{N}(0,1), f \in \text{Uniform}(0,1), g = S(z, f)} [R_g \log(\sigma(J(g))) + (1 - R_g) \log(1 - \sigma(J(g)))]$$

- Générateur  $S$  (réseau inversible [DSB16]) appris à générer des buts atteignables par la politique  $\pi$  courante (avec  $p = \mathcal{N}(0, 1)$ ) :

$$\mathcal{L}_{\text{val}} = \mathbb{E}_{\substack{g \sim \text{achieved by } \pi, \\ \xi \in \text{Uniform}(0, \delta), \\ f \in \text{Uniform}(0, 1)}} [-\log p(S^{-1}(g + \xi, f))]$$

- Générateur appris à générer des buts d'un niveau de faisabilité  $f$  donné :

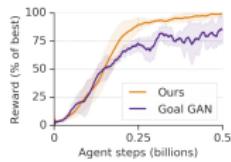
$$\mathcal{L}_{\text{feas}} = \mathbb{E}_{\substack{z \in \mathcal{N}(0,1), \\ f \in \text{Uniform}(0,1)}} [J(S(z, f)) - \sigma^{-1}(f)^2]$$

- Générateur appris à maximiser la couverture des buts selon un terme d'entropie (avec  $p$  la probabilité des buts générés obtenus à partir de  $p(z)$  et utilisant les propriétés d'inversibilité de  $S$ ) :

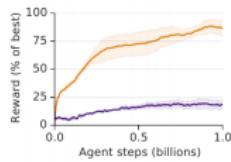
$$\mathcal{L}_{\text{cov}} = \mathbb{E}_{\substack{z \in \mathcal{N}(0,1), \\ f \in \text{Uniform}(0,1)}} [\log p(S(z, f))]$$

# Goal Generation : GoalGAN

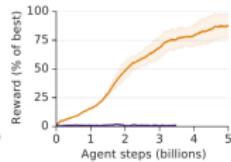
Comparaison de [Rac+19] avec GoalGAN :



(a) Location finding in 3D room.

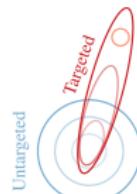


(b) Color finding in 3D room.

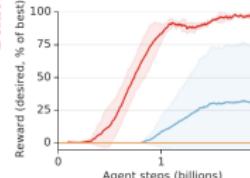


(c) Color pair finding in 3D room.

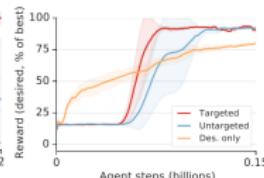
Possibilité de rajouter un coût pour cibler une zone désirée de l'espace des buts :



(a) Motivation.

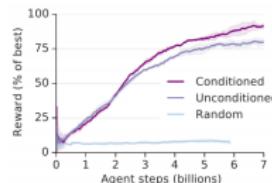


(b) 3D color finding.

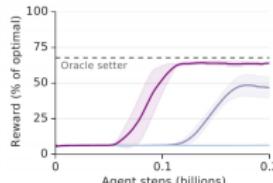


(c) Grid-world alchemy.

Possibilité de conditionner l'architecture selon des conditions d'environnement changeantes :



(a) Color-pair finding, recolored 3D.



(b) Grid-world alchemy.

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

### • Curriculum RL automatique

- Teach-Student
- Self-play
- Goal-Generation
- Skills Extraction
- Distillation de politiques

### • Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Skills Extraction : Diversity Is All You Need (DIAYN)

Une autre approche consiste à inférer des compétences latentes, de manière non supervisée, dans l'environnement

- Politique  $\pi_\theta(a_t|s_t, z)$  conditionnée par une compétence  $z$  échantillonnée d'un prior  $p(z)$  pour chaque épisode
- Deux manières d'utiliser ces compétences sur la tâche cible :
  - Finetuner la compétence qui donne les meilleurs résultats sur la tâche cible
  - Apprendre un contrôleur hiérarchique pour switcher entre compétences

DIAYN [Eys+18] s'appuie sur deux objectifs :

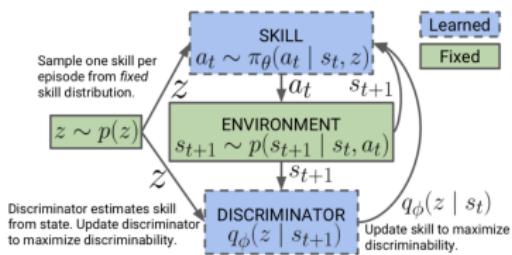
- Les compétences doivent être diverses et conduire à des distributions d'états différentes
  - ⇒ Maximisation de l'info mutuelle  $I(S; Z)$
- Connaissant l'état, les compétences ne doivent pas être corrélées aux actions (compétence = proba de buts, indépendamment des moyens d'y arriver)
  - ⇒ Minimisation de l'information mutuelle conditionnée à l'état  $I(A; Z|S)$

# Skills Extraction : Diversity Is All You Need (DIAYN)

Ajout d'un terme d'entropie pour compléter l'objectif à maximiser :

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(\theta) &= I(S; Z) + H[A|S] - I(A; Z|S) \\ &= (H(Z) - H(Z|S)) + H[A|S] - (H[A|S] - H[A|S, Z]) \\ &= H[A|S, Z] - H(Z|S) + H(Z) \\ &= H[A|S, Z] + \mathbb{E}_{z \sim p(z), s \sim \rho(s)} [\log p(z|s)] - \mathbb{E}_{z \sim p(z)} [\log p(z)] \\ &\geq H[A|S, Z] + \mathbb{E}_{z \sim p(z), s \sim \rho(s)} [\log D_\phi(z|s) - \log p(z)]\end{aligned}$$

;"pseudo-reward" in red.



## Algorithm 1: DIAYN

**while** not converged **do**

    Sample skill  $z \sim p(z)$  and initial state  $s_0 \sim p_0(s)$

**for**  $t \leftarrow 1$  **to**  $steps\_per\_episode$  **do**

        Sample action  $a_t \sim \pi_\theta(a_t | s_t, z)$  from skill.

        Step environment:  $s_{t+1} \sim p(s_{t+1} | s_t, a_t)$ .

        Compute  $q_\phi(z | s_{t+1})$  with discriminator.

        Set skill reward  $r_t = \log q_\phi(z | s_{t+1}) - \log p(z)$

        Update policy ( $\theta$ ) to maximize  $r_t$  with SAC.

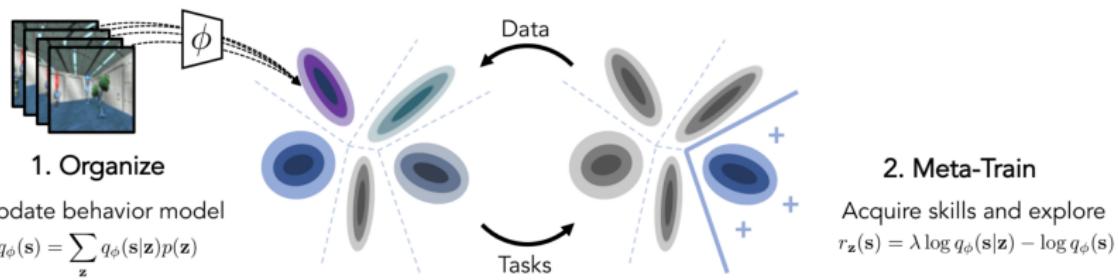
        Update discriminator ( $\phi$ ) with SGD.

⇒ Contrairement aux approches adverses type GoalGAN, jeu d'optimisation collaboratif entre discriminateur et politique (moins de points-selles, plus stable)

# \*Skills Extraction : CARML [Jab+19]

Une autre approche consiste à partitionner l'espace d'états en compétences

- La probabilité de se trouver dans un état  $s$  défini selon mixture sur des sous-politiques de compétences
- Chaque sous-politique de compétence  $z$  est apprise pour se spécialiser sur les états probables pour cette compétence
- Hypothèse : permettra de s'adapter rapidement à la tâche cible (meta-RL)



On souhaite maximiser l'information mutuelle entre trajectoires  $\tau$  et compétences  $z$ , ce qui revient à maximiser  $\mathcal{H}(\tau)$  (exploration) et minimiser  $\mathcal{H}(\tau|z)$  (spécialisation) :

$$\begin{aligned} I(\tau; z) &= \mathcal{H}(\tau) - \mathcal{H}(\tau|z) \\ &\geq \mathbb{E}_{z \sim q_\phi(z), s \sim \pi_\theta(s|z)} [\log q_\phi(s|z) - \log \pi_\theta(s)] && ; \text{discard the order of states.} \\ &\approx \mathbb{E}_{z \sim q_\phi(z), s \sim \pi_\theta(s|z)} [\log q_\phi(s|z) - \log q_\phi(s)] && ; \text{assume learned marginal distr. matches policy.} \end{aligned}$$

Où  $q_\phi$  est obtenu en maximisant :  $\mathbb{E}_{s \sim \pi} [\log q_\phi(s)] \geq \mathbb{E}_{s \sim \pi} \mathbb{E}_{z \sim q_\phi(z)} [\log q_\phi(s|z)]$

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
  - Teach-Student
  - Self-play
  - Goal-Generation
  - Skills Extraction
  - Distillation de politiques
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

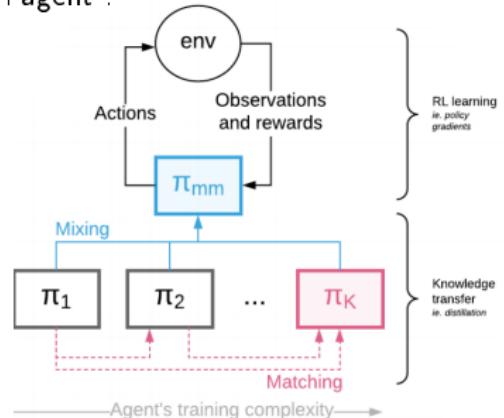
- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Distillation de politiques : Mix&Match

Plutôt que de chercher des environnements plus simples, Mix&Match [Cza+18] propose de travailler avec la complexité croissante de l'agent :

- $K$  agents de politiques respectives  $\pi_1, \dots, \pi_K$  (éventuellement partage de certains paramètres)
- $\pi_K$  est l'agent final que l'on souhaite entraîner
- Capacités croissantes de  $\pi_1$  à  $\pi_K$  (par exemple NN de plus en plus gros ou utilisation de plus d'informations)
- Mixture de politiques :  
$$\pi_{mm}(a|s) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \pi_i(a|s),$$
 avec  $\alpha$  un vecteur de paramètres sommant à 1



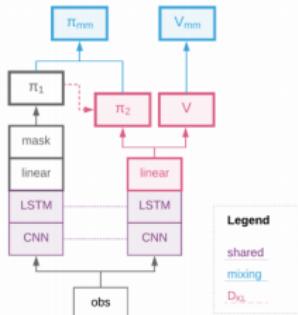
Problème d'optimisation :  $\mathcal{L}(\theta) = \mathcal{L}_{RL}(\pi_{mm}; \theta) + \lambda \mathcal{L}_{mm}(\theta)$ , avec  $\mathcal{L}_{RL}(\pi_{mm}; \theta)$  un coût de renforcement à optimiser selon des trajectoires collectées (par exemple selon A2C) et  $\mathcal{L}_{mm}(\theta)$  un coût d'incitation au transfert de connaissances entre politiques (policy distillation) :

$$\mathcal{L}_{mm}(\theta) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{1}{|\text{par}(i)|} \sum_{j \in \text{par}(i)} \frac{\alpha_j}{|\mathcal{R}|} \sum_{\tau \in \mathcal{R}} \sum_{t=1}^{|\tau|} D_{KL}(\pi_j(.|s_t) || \pi_i(.|s_t))$$

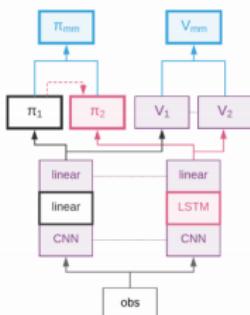
Optimisation de  $\theta$  et  $\alpha$  selon Population Based Training of neural networks[Jad+17]

- Paramétrisation online des hyper-paramètres  $\alpha$  selon population de  $\pi_{mm}$
- En début de process  $a_1 = 1$ , puis évolution jusqu'à  $a_K = 1$

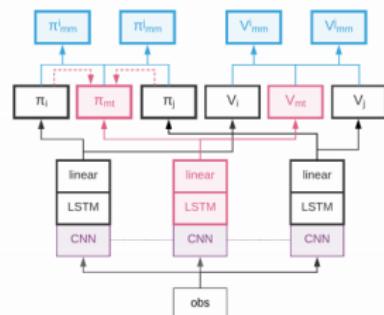
# Distillation de politiques : Mix& Match



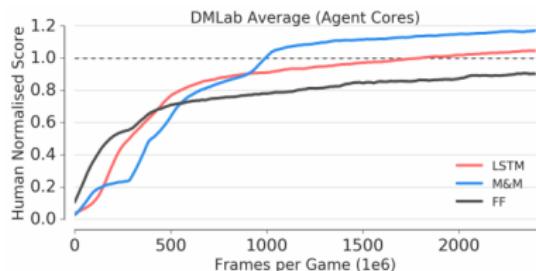
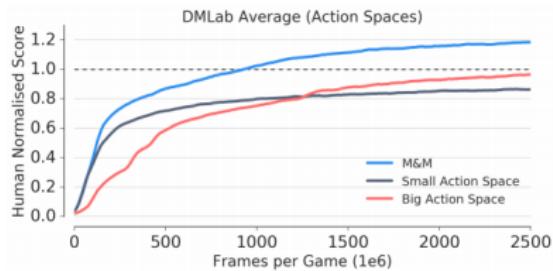
(a) M&M for action spaces progression



(b) M&M for architecture progression



(c) M&M for multitask progression



## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

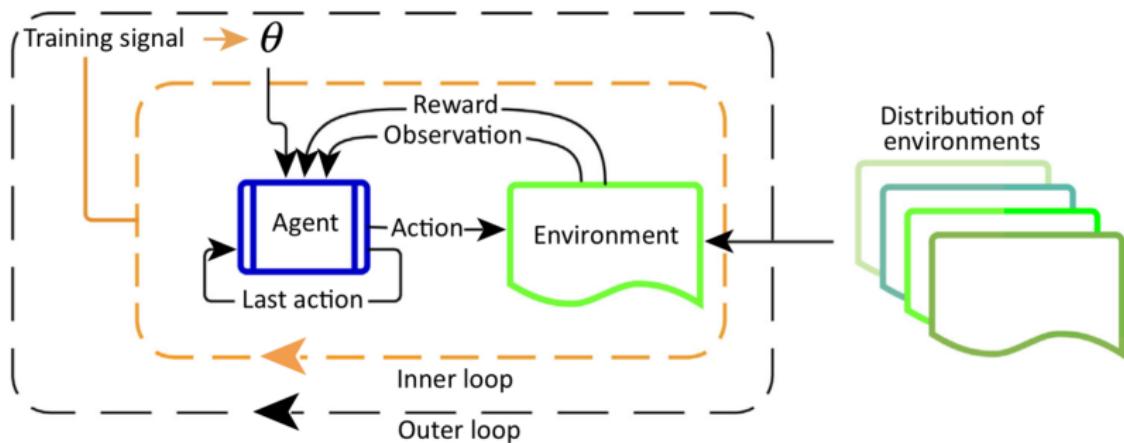
## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Meta-RL

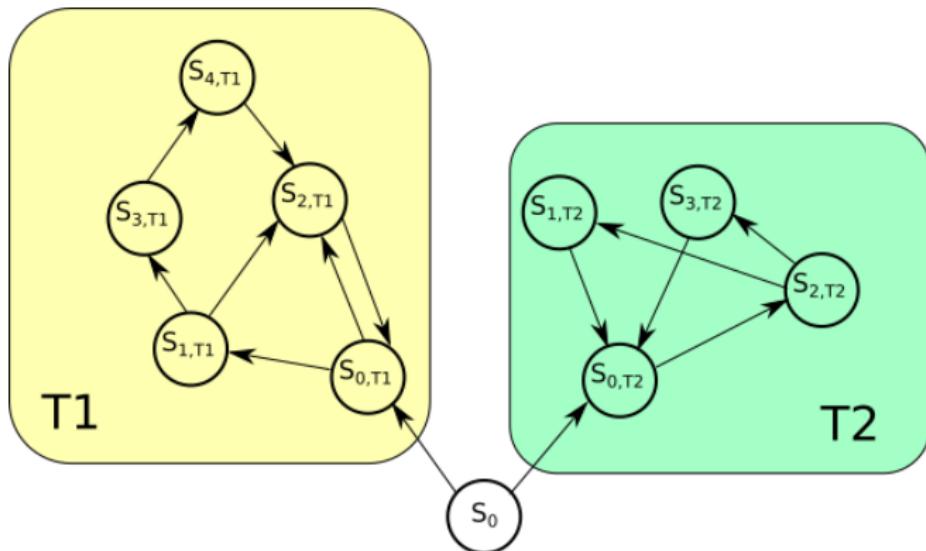
Meta-RL = Apprendre à apprendre



On a une distribution  $\rho(\mathcal{T})$  sur les MDPs

- Une boucle interne interagit avec un environnement  $\mathcal{T}$  fixe pendant  $N$  épisodes pour apprendre une politique pour  $\mathcal{T}$ 
  - ⇒ Maximisation de l'espérance de reward cumulé par épisode sur  $\mathcal{T}$
- La boucle externe échantillonne des environnements différents pour chaque session d'apprentissage (trial) de la boucle interne
  - ⇒ Maximisation de l'espérance de reward cumulé par session selon  $\rho(\mathcal{T})$

Meta-RL = problème POMDP : On n'observe pas les spécificités de la tâche  
(observation incomplète des états)

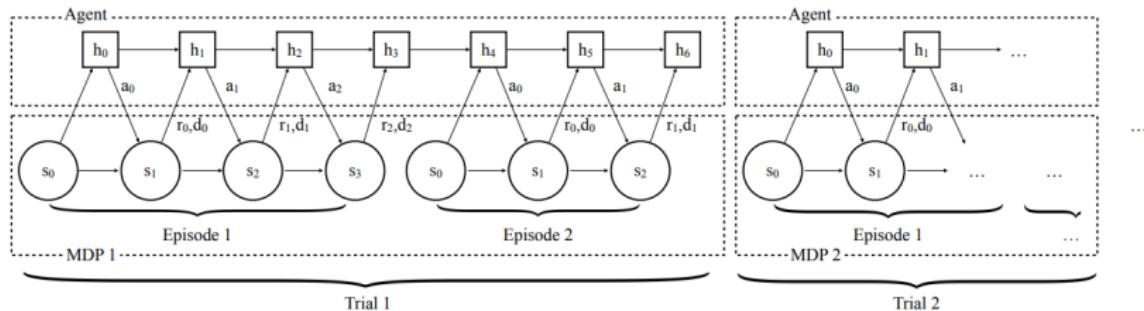


Objectif : apprendre à s'adapter à la tâche le plus rapidement possible

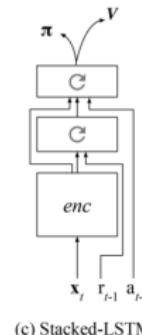
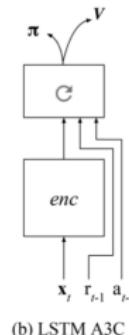
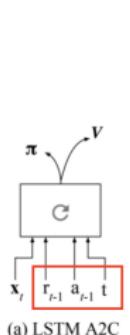
# Meta-RL : RL<sup>2</sup> [Dua+16]

RL<sup>2</sup> : Fast Reinforcement Learning via Slow Reinforcement Learning

- ⇒ Réseau récurrent sur chaque session, capable de collecter de l'information sur la tâche en cours pendant la session courante, épisode après épisode.

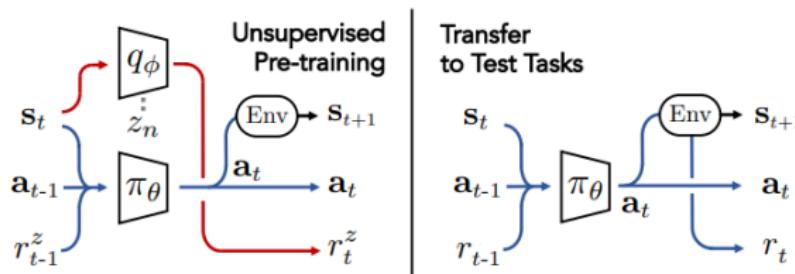


Différentes architectures récurrentes possibles :



# \*Extraction de compétences : CARML

CARML [Jab+19] présenté ci-dessus comme une méthode de curriculum, a un objectif meta-RL :



---

## Algorithm 1: CARML

---

- 1: **Require:**  $\mathcal{C}$ , an MDP without a reward function
  - 2: Initialize  $f_\theta$ , an RL algorithm parameterized by  $\theta$ .
  - 3: Initialize  $\mathcal{D}$ , a reservoir of state trajectories, via a randomly initialized policy.
  - 4: **while** not done **do**
  - 5:   Fit a task-scaffold  $q_\phi$  to  $\mathcal{D}$ , e.g. by using Algorithm 2. E-step §3.2
  - 6:   **for** a desired mixture model-fitting period **do**
  - 7:     Sample a latent task variable  $\mathbf{z} \sim q_\phi(\mathbf{z})$ .
  - 8:     Define the reward function  $r_z(s)$ , e.g. by Eq. 8, and a task  $\mathcal{T} = \mathcal{C} \cup r_z(s)$ .
  - 9:     Apply  $f_\theta$  on task  $\mathcal{T}$  to obtain a policy  $\pi_\theta(a|s, \mathcal{D}_T)$  and trajectories  $\{\tau_i\}$ .
  - 10:    Update  $f_\theta$  via a meta-RL algorithm, e.g. RL<sup>2</sup> [13]. M-step §3.3
  - 11:    Add the new trajectories to the reservoir:  $\mathcal{D} \leftarrow \mathcal{D} \cup \{\tau_i\}$ .
  - 12: **Return:** a meta-learned RL algorithm  $f_\theta$  tailored to  $\mathcal{C}$
-

# Model-Agnostic Meta-Learning for Fast Adaptation of Deep Networks

MAML [FAL17] : plutôt qu'inférence de tâche via RNN, recherche de forte plasticité structurelle

⇒ Être capable de s'adapter à toute nouvelle tâche en un seul pas de gradient

---

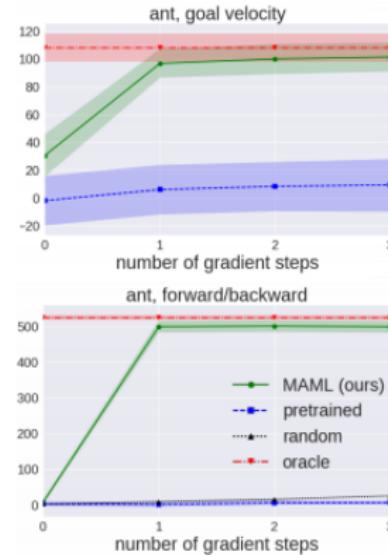
## Algorithm MAML for Reinforcement Learning

---

Require:  $p(\mathcal{T})$ : distribution over tasks

Require:  $\alpha, \beta$ : step size hyperparameters

- 1: randomly initialize  $\theta$
  - 2: **while** not done **do**
  - 3:   Sample batch of tasks  $\mathcal{T}_i \sim p(\mathcal{T})$
  - 4:   **for all**  $\mathcal{T}_i$  **do**
  - 5:     Sample  $K$  trajectories  $\mathcal{D} = \{(\mathbf{x}_1, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{x}_H)\}$  using  $f_\theta$  in  $\mathcal{T}_i$
  - 6:     Evaluate  $\nabla_\theta \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i}(f_\theta)$  using  $\mathcal{D}$   
      and  $\mathcal{L}_{\mathcal{T}_i}(f_\phi) = -\mathbb{E}_{\mathbf{x}_t, \mathbf{a}_t \sim f_\phi, q_{\mathcal{T}_i}} \left[ \sum_{t=1}^H R_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{a}_t) \right]$
  - 7:     Compute adapted parameters with gradient descent:  
       $\theta'_i = \theta - \alpha \nabla_\theta \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i}(f_\theta)$
  - 8:     Sample trajectories  $\mathcal{D}'_i = \{(\mathbf{x}_1, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{x}_H)\}$  using  $f_{\theta'_i}$  in  $\mathcal{T}_i$
  - 9:   **end for**
  - 10:   Update  $\theta \leftarrow \theta - \beta \nabla_\theta \sum_{\mathcal{T}_i \sim p(\mathcal{T})} \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i}(f_{\theta'_i})$  using each  $\mathcal{D}'_i$
  - 11: **end while**
- 



- Implique une dérivation du second-ordre (approximation premier ordre possible) :

$$\min_{\theta} \sum_{\mathcal{T}_i \sim p(\mathcal{T})} \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i} \left( f_{\theta'_i} \right) = \sum_{\mathcal{T}_i \sim p(\mathcal{T})} \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i} \left( f_\theta - \alpha \nabla_\theta \mathcal{L}_{\mathcal{T}_i}(f_\theta) \right)$$

# Meta-RL : apprendre à sonder l'environnement

Soit  $\mathcal{T} = MDP(\mu)$  avec  $\mu \sim \rho(\mu)$  : l'environnement est déterminé selon un vecteur de paramètres  $\mu$ .

- Hypothèse : si on connaît  $\mu$ , la découverte de la politique optimale est largement facilitée
- Hypothèse 2 :  $\mu$  peut (au moins partiellement) être découverte en interagissant avec l'environnement

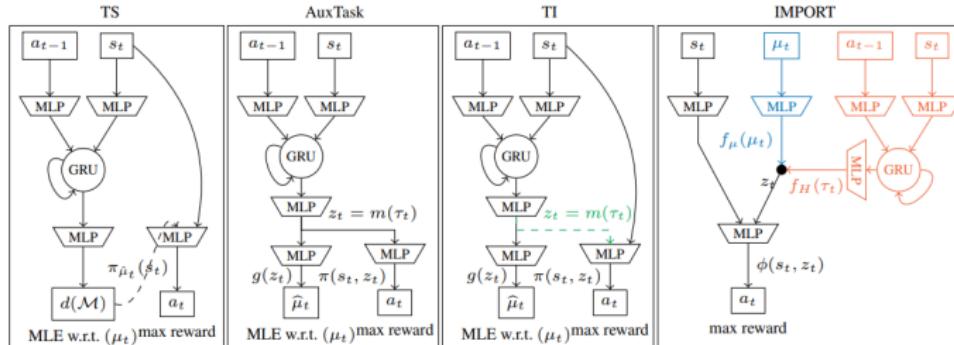
Exemple de problème :



- Dans la moitié des cas, le schéma de récompenses  $(r(G1), r(G2))$  est  $(1; -1)$ , dans l'autre moitié on a  $(-1; 1)$
- Dans l'état sign est inscrite l'information du schéma en cours (i.e.,  $\mu$ )
  - ⇒ Inciter l'agent à passer par le signe
- Problème à récompenses parcimonieuses difficile pour méthodes type RL<sup>2</sup> :
  - Comprendre qu'il faut se diriger vers le signe
  - Interpréter l'information pour s'en servir pour aller vers le bon but

# Exploitation d'informations privilégiées

- Information privilégiée : Pendant l'apprentissage, on dispose de l'information  $\mu$
- Objectif : se servir de l'information  $\mu$  pour guider l'agent apprenant



- TS [Osb+19] apprend une politique de découverte de  $\mu$ , puis s'en sert pour découvrir la politique optimale : pas d'apprentissage global
- AuxTask [Hum+19] possède un double objectif de découverte et de maximisation des rewards : optimisation biaisée (e.g., si partie de  $\mu$  inutile)
- TI [Hum+19] n'incite pas à la découverte des informations (pas de retro-propagation du reward vers la représentation)
- IMPORT [Kam+20] : Partage de paramètres entre agent privilégié (en bleu) et agent apprenant (en orange)  $\Rightarrow$  Pas de biais, Incitation à sonder
  - L'agent apprenant utilise un RNN pour inférer une représentation  $z_t$  proche de celle utilisée par l'agent privilégié

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

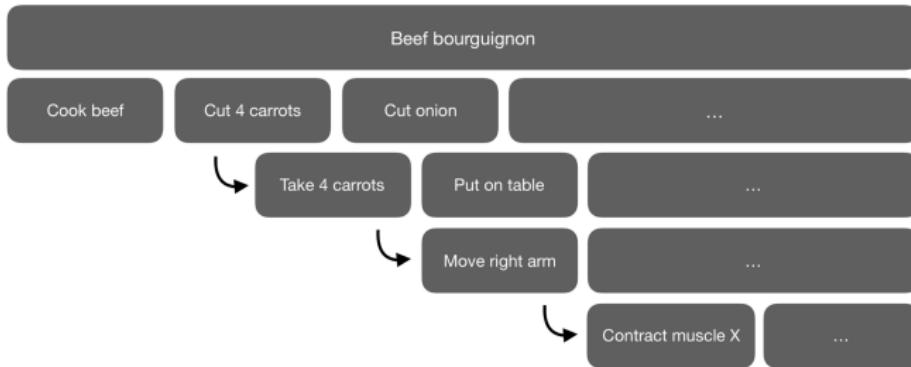
## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Hierarchical Reinforcement Learning

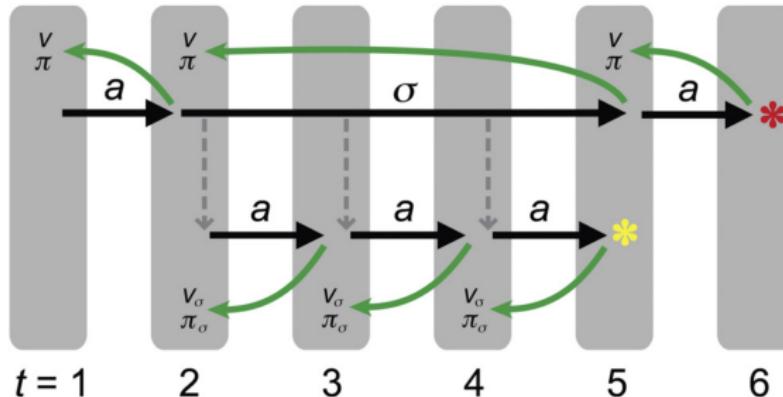
Différents niveaux de granularité d'actions :



- ⇒ Hierarchical RL : représentation explicite de ces différents niveaux
  - ⇒ chaque niveau  $l < L$  dépend d'un niveau supérieur  $l + 1$  qui correspond à une prise de décision plus large
  - ⇒ Regroupement de séries d'actions plus fines pour accomplir des sous-but plus larges

# Hierarchical Reinforcement Learning

Politiques et sous-politiques :

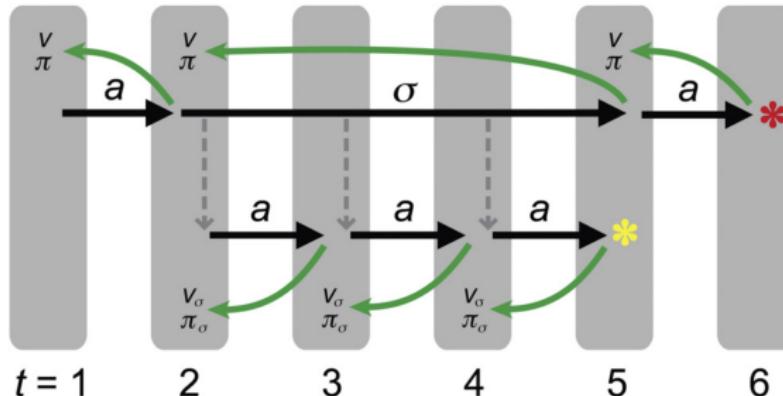


Objectifs :

- Long-term credit assignment : apprentissage plus rapide et meilleure généralisation
- Structured exploration : exploration via sous-politiques plutôt qu'avec actions primitives
- Transfer learning : tâches différentes => planifications différentes de sous-tâches (mais sous-tâches communes)

# Hierarchical Reinforcement Learning

Politiques et sous-politiques :



Formulation selon Semi-Markov Decision Process (SMDP) :

- Différentes résolutions temporelles entre niveaux : Les niveaux supérieurs attendent la terminaison des procédures des niveaux inférieurs
- On n'a alors pas une formulation MDP classique avec transitions définies selon  $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$
- SMDP pour HRL : au niveau  $I$ ,  $P(s'_I, N_I|s_I, a_I)$ , avec  $N_I$  le nombre d'actions primitives prises par le niveau inférieur depuis la décision  $a_I$  au niveau  $I$

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

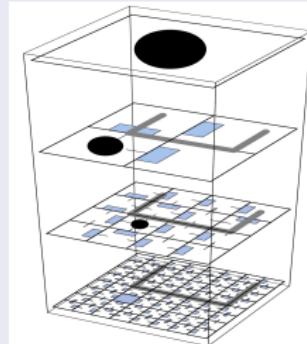
# Feudal HRL

Le type d'approche HRL "féodal" [DH93] crée un système hiérarchique dans lequel

- Les lords (ou managers) apprennent à assigner des tâches (ou sous-buts) à leurs serfs (ou sous-managers)
- Chaque niveau ne se soucie que de ses propres buts, pas de la manière dont les niveaux inférieurs répondent à la demande, ni des éventuelles mauvaises commandes passées par les niveaux supérieurs
- **Multi-résolution** : résolution différente de l'information à chaque niveau

## Exemple sur un problème de labyrinthe

- Objectif : atteindre la case bleutée (3,3) dans le labyrinthe complet tout en bas
- Niveau inférieur : autant d'états que de positions
- + on monte dans les niveaux, + on regroupe les états
- Politiques supérieures décident si elles doivent rester dans une zone ou chercher à en sortir
- Q-values à convergence des actions :
  - de déplacement  $\Rightarrow$  carrés bleus
  - de rester sur zone  $\Rightarrow$  sphères noires



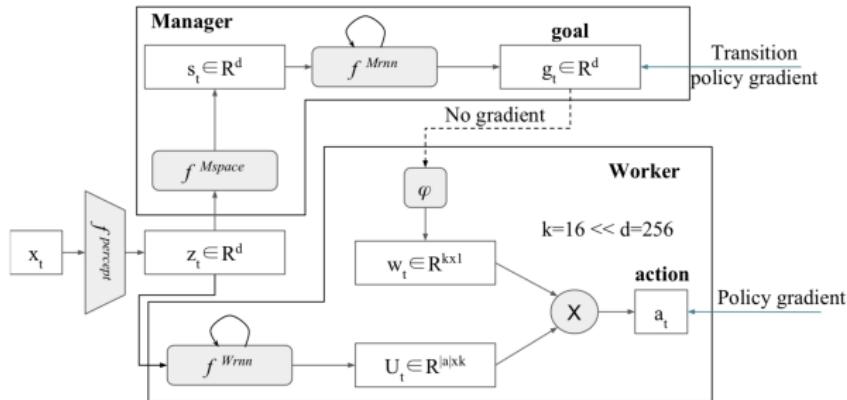
Malheureusement :

- Requiert la capacité de découper l'espace d'états et spécifier les actions à chaque niveau efficacement (expertise du domaine)
- Perte de temps si les niveaux supérieurs passent des commandes abhérentes : apprentissage de sous-politiques inutiles

# FUN : FeUdal Networks for HRL

FUN [Vez+17] relaxe l'aspect multi-resolution des états des approches féodales, mais en garde le passage de commande explicite :

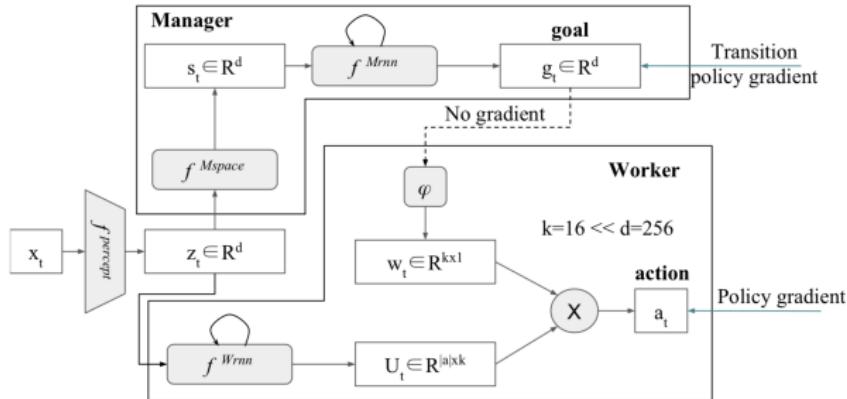
- Master génère des buts continus  $g_t$  pour le Worker sous la forme de directions dans l'espace latent  $s$ 
  - Plus facile de demander au Worker de faire en sorte de se déplacer dans une certaine direction plutôt que d'atteindre une position absolue de l'espace latent
  - Meilleure généralisation : un même angle peut être invoqué selon différents contextes
- ⇒ Demande au Worker de faire en sorte que la représentation latente de l'état au temps  $t + c$  soit dans la direction  $g_t$  en partant de  $s_t$ , avec  $c$  la résolution temporelle du manager ( $g_t$  est un but à accomplir dans  $c$  steps)



# FUN : FeUdal Networks for HRL

FUN [Vez+17] relaxe l'aspect multi-resolution des états des approches féodales, mais en garde le passage de commande explicite :

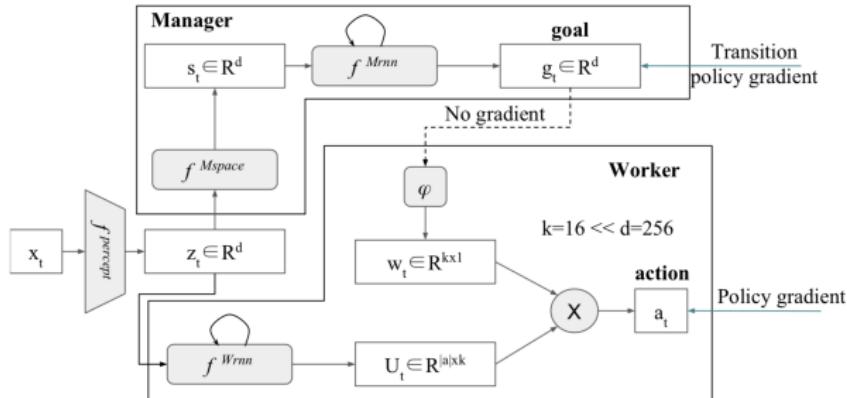
- Worker tente de maximiser  $R_t + \alpha R_t^I$ , avec  $R_t^I = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c d_{cos}(s_t - s_{t-i}, g_{t-i})$ 
  - Worker récompensé si il prend des actions menant à des déplacements de même direction que les  $c$  dernières directions données par le manager
  - Forme de régularité dans les déplacements : plutôt que de regarder uniquement  $d_{cos}(s_t - s_{t-c}, g_{t-c})$
- Worker mis à jour selon policy gradient classique avec rewards  $R_t + \alpha R_t^I$



# FUN : FeUdal Networks for HRL

FUN [Vez+17] relaxe l'aspect multi-resolution des états des approches féodales, mais en garde le passage de commande explicite :

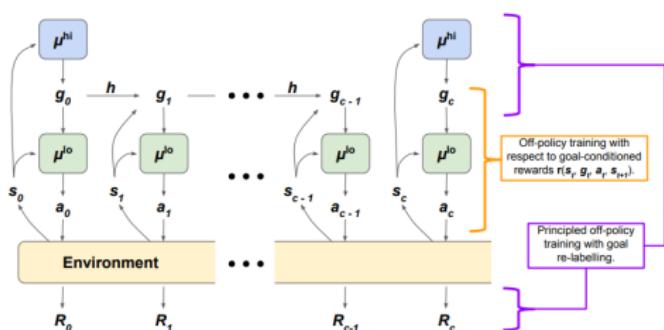
- Pas de gradient entre Worker et Master car cela retirerait tout sens sémantique aux buts (car optimisé à chaque action plutôt qu'au bout de  $c$  étapes)
  - Manager plutôt mis à jour selon PG sur des transitions temporelles de taille  $c$  :  $\mathbb{E}[A_t^M \nabla_\theta \log p(s_{t+c} | s_t, g_t)]$ , avec  $g_t = g_\theta(s_t)$  et  $A_t^M = R_t - V^M(x_t, \phi)$ .
  - Car FUN suppose que les directions dans l'espace latent suivent une distribution von Mises-Fisher de moyenne  $g_t$  :  $p(s_{t+c} | s_t, g_t) \propto e^{d_{cos}(s_{t+c} - s_t, g_t)}$
- ⇒ On prend alors :  $\nabla g_t = A_t^M \nabla_\theta d_{cos}(s_{t+c} - s_t, g_t)$



# \*HIRO : Data-Efficient Hierarchical Reinforcement Learning

Dans le même esprit que FUN, HIRO [Nac+18]. Mais :

- Goals = transitions dans l'espace des états
- Off-Policy PG du niveau inférieur selon transitions effectuées et commandées
- Off-Policy PG avec goal relabelling au niveau supérieur
  - ⇒ Prise en compte des possibles erreurs du niveau inférieur en re-spécifiant le but pour le faire correspondre à ce qui a été effectué et les rewards associés pour PG du niveau supérieur
- Fonction de transition entre buts  $h$



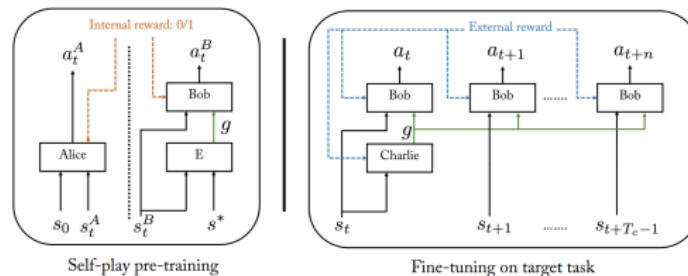
1. Collect experience  $s_t, g_t, a_t, R_t, \dots$
2. Train  $\mu^{lo}$  with experience transitions  $(s_t, g_t, a_t, r_t, s_{t+1}, g_{t+1})$  using  $g_t$  as additional state observation and reward given by goal-conditioned function  $r_t = r(s_t, g_t, a_t, s_{t+1}) = -||s_t + g_t - s_{t+1}||_2$ .
3. Train  $\mu^{hi}$  on temporally-extended experience  $(s_t, \tilde{g}_t, \sum R_{t:t+c-1}, s_{t+c})$ , where  $\tilde{g}_t$  is relabelled high-level action to maximize probability of past low-level actions  $a_{t:t+c-1}$ .
4. Repeat.

Figure 2: The design and basic training of HIRO. The lower-level policy interacts directly with the environment. The higher-level policy instructs the lower-level policy via high-level actions, or goals,  $g_t \in \mathbb{R}^{d_s}$  which it samples anew every  $c$  steps. On intermediate steps, a fixed goal transition function  $h$  determines the next step's goal. The goal simply instructs the lower-level policy to reach specific states, which allows the lower-level policy to easily learn from prior off-policy experience.

# \*Learning Goal Embeddings via Self-Play for HRL

Asymetric self-play pour HRL [Suk+18] :

- Politiques haut-niveau dirigent les politiques bas-niveau via des vecteurs continus de sous-but à atteindre
- Challenges pour apprendre un espace de représentation des sous-but :
  - L'espace doit être suffisamment général pour encoder diverses sortes de sous-but
  - L'espace ne doit encoder que les informations utiles pour la tâche
  - Les sous-but générés doivent être adaptés aux capacités des sous-politiques



The Hierarchical Self-Play model in pre-training (left) and fine-tuning (right) phases.

Pendant le fine-tuning (et l'exécution) sur la tâche :

- La politique du contrôleur Charlie consiste en un mapping d'un but  $g_t$  à partir de  $s_t$  :  $g_t = \pi(s_t)$ . Charlie émet un nouveau but tous les  $T_C = T_A$  steps
- Charlie (ainsi que fine-tuning de Bob) est appris selon les rewards externes

# \*Learning Goal Embeddings via Self-Play for HRL

Approche de pré-entraînement similaire à [Suk+17] mais :

- Alice réalise un nombre d'étapes fixées  $T_A$  ( $T_A$  pas dynamique pour limiter la complexité), que Bob doit accomplir en moins de  $T_B$  étapes (avec  $T_B$  légèrement  $> T_A$ )
- Reward d'Alice  $R_A = 1 - R_B$ , avec  $R_B$  le reward de Bob, qui vaut 1 si il arrive à approcher l'état cible d'une distance  $< \epsilon$ , 0 sinon (plutôt que rewards basés sur temps)
- Alice et Bob repartent avec  $s_0$  inclus dans l'episode d'Alice précédent pour éviter de ne se concentrer qu'autour d'un même  $s_0$
- Bob appris selon l'accomplissement de la tâche et un coût d'imitation d'Alice. Pour une trajectoire  $\tau_A$  de fin  $s_{\tau_A}^*$  et de point de départ  $s_0$  :

$$L_B = -\mathbb{E}_{\tau_B \sim \pi_B(\cdot | \cdot, s_{\tau_A}^*)}[R_B | s_0] - \alpha \sum_{t=0}^{|\tau_A|} \log \pi_B(a_t^A | s_t^A, s_{\tau_A}^*)$$

- Alice apprise selon un coût d'entropie  $H$  pour garantir une variété de tâches :

$$L_A = -\mathbb{E}_{\tau_A \sim \pi_A(\cdot, s_0)} [\mathbb{E}_{\tau_B \sim \pi_B(\cdot | \cdot, s_{\tau_A}^*)}[1 - R_A | s_0] + \beta \sum_{t=0}^{|\tau_A|} H(\pi_A(\cdot | s_t^A, s_0))]$$

- Bob utilise un encodeur de buts  $E$  :  $\pi_B(\cdot | s_t, s^*) = \pi_B(\cdot | s_t, E(s_t, s^*))$ .  $E$  permet de rendre plus compact l'expression du but et rend la génération de buts plus simple pour Charlie (phase d'exécution)

## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

## 2 RL Hiérarchique

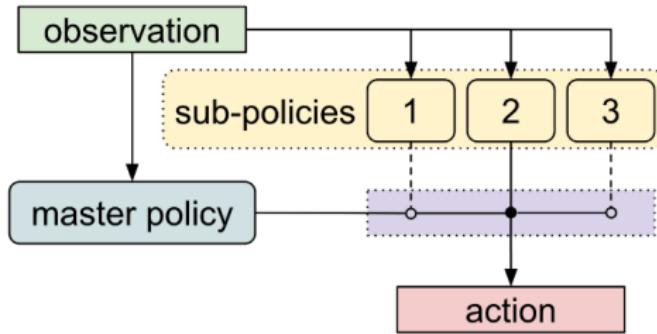
- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

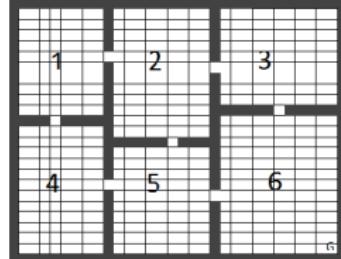
# Hierarchical Reinforcement Learning : Options

Autre framework HRL : Options [SPS99]

- Option=sous-politique  $\langle \pi_\omega, \beta_\omega \rangle$ , avec :
  - $\pi_\omega : S \times A \rightarrow [0; 1]$  la politique de l'option  $\omega$
  - $\beta_\omega : S \rightarrow [0; 1]$  son critère de terminaison
- Plutôt que de spécifier des buts aux niveaux inférieurs, on sélectionne une sous-politique lorsque la précédente a terminé



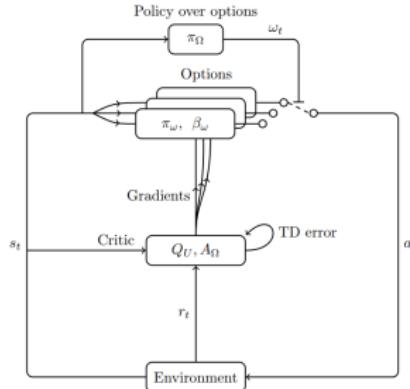
Exemple :  
1 option par pièce dans  
un Gridworld



# Hierarchical Reinforcement Learning : Options

L'architecture Option-Critic [BHP16] est composée :

- D'un manager qui choisit une sous-politique lorsque nécessaire (à la fin de la précédente) selon  $\pi_\Omega(\cdot|s)$
- D'un ensemble d'options  $\langle \pi_\omega, \beta_\omega \rangle$ , où  $\beta_\omega(s)$  retourne une proba de fin d'option  $\omega$  en l'état  $s$ .
- De réseaux de critiques  $Q_U$  et  $Q_\Omega$



$$Q_U(s, \omega, a) = \mathbb{E}_{s' \in S} p(s'|s, a)(R(s, a, s') + \gamma U(\omega, s'))$$

$$\text{avec : } U(\omega, s) = (1 - \beta_\omega(s))Q_\Omega(s, \omega)$$

$$+ \beta_\omega(s) \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\Omega(\omega|s)Q_\Omega(s, \omega)$$

$$\text{et : } Q_\Omega(s, \omega) = \sum_{a \in A} \pi_\omega(a|s)Q_U(s, \omega, a)$$

$$A_\Omega(s, \omega) = Q_\Omega(s, \omega) - \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\Omega(\omega|s)Q_\Omega(s, \omega)$$

---

**Algorithm 1:** Option-critic with tabular intra-option Q-learning

---

$s \leftarrow s_0$   
Choose  $\omega$  according to an  $\epsilon$ -soft policy over options  
 $\pi_\Omega(s)$

**repeat**

    Choose  $a$  according to  $\pi_{\omega, \theta}(a | s)$   
    Take action  $a$  in  $s$ , observe  $s', r$

**1. Options evaluation:**

$\delta \leftarrow r - Q_U(s, \omega, a)$   
    **if**  $s'$  **is non-terminal** **then**  
         $\delta \leftarrow \delta + \gamma(1 - \beta_{\omega, \theta}(s'))Q_\Omega(s', \omega) + \gamma\beta_{\omega, \theta}(s') \max_{\bar{\omega}} Q_\Omega(s', \bar{\omega})$

**end**

$Q_U(s, \omega, a) \leftarrow Q_U(s, \omega, a) + \alpha\delta$

**2. Options improvement:**

$\theta \leftarrow \theta + \alpha_\theta \frac{\partial \log \pi_{\omega, \theta}(a | s)}{\partial \theta} Q_U(s, \omega, a)$   
     $\vartheta \leftarrow \vartheta - \alpha_\vartheta \frac{\partial \beta_{\omega, \theta}(s')}{\partial \vartheta} (Q_\Omega(s', \omega) - V_\Omega(s'))$

**if**  $\beta_{\omega, \theta}$  terminates in  $s'$  **then**

    choose new  $\omega$  according to  $\epsilon$ -soft( $\pi_\Omega(s')$ )

$s \leftarrow s'$

**until**  $s'$  **is terminal**

---

# Hierarchical Reinforcement Learning : Options

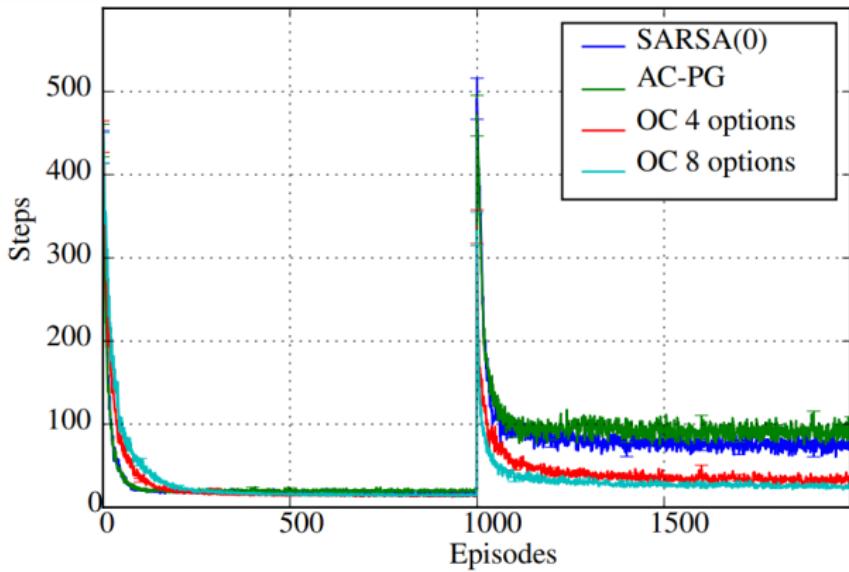


Figure : After a 1000 episodes, the goal location in the four-rooms domain is moved randomly. Option-critic (“OC”) recovers faster than the primitive actor-critic (“AC-PG”) and SARSA(0). Each line is averaged over 350 runs.

# Meta Learning of Shared Hierarchies

MLSH [Fra+17] : RL multi-tâches avec options

- un meta-controlleur apprend à choisir les sous-politiques selon la tâche en cours (période de warm-up)
- des sous-politiques que l'on adapte à chaque nouvelle tâche (joint update)

---

**Algorithm 1** Meta Learning Shared Hierarchies

---

```
Initialize  $\phi$ 
repeat
    Initialize  $\theta$ 
    Sample task  $M \sim P_M$ 
    for  $w = 0, 1, \dots, W$  (warmup period) do
        Collect  $D$  timesteps of experience using  $\pi_{\phi, \theta}$ 
        Update  $\theta$  to maximize expected return from  $1/N$  timescale viewpoint
    end for
    for  $u = 0, 1, \dots, U$  (joint update period) do
        Collect  $D$  timesteps of experience using  $\pi_{\phi, \theta}$ 
        Update  $\theta$  to maximize expected return from  $1/N$  timescale viewpoint
        Update  $\phi$  to maximize expected return from full timescale viewpoint
    end for
until convergence
```

---

Avec  $\phi$  un ensemble de politiques ( $\phi_1, \dots, \phi_k$ )

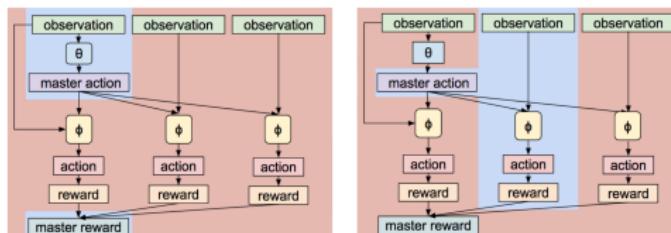


Figure 2: Unrolled structure for a master policy action lasting  $N = 3$  timesteps. Left: When training the master policy, the update only depends on the master policy's action and total reward (blue region), treating the individual actions and rewards as part of the environment transition (red region). Right: When training sub-policies, the update considers the master policy's action as part of the observation (blue region), ignoring actions in other timesteps (red region)

# Modulated Policy Hierarchies

MPH [Pas+18] : hiérarchie de contrôleurs qui prennent en entrée l'état du système et les vecteurs binaires des contrôleurs supérieurs

- Optimisation selon PPO
- Utilisation d'un reward intrinsèque de curiosité [Pat+17]
- ⇒ Objectifs : Stabilité, Modularité, Exploration

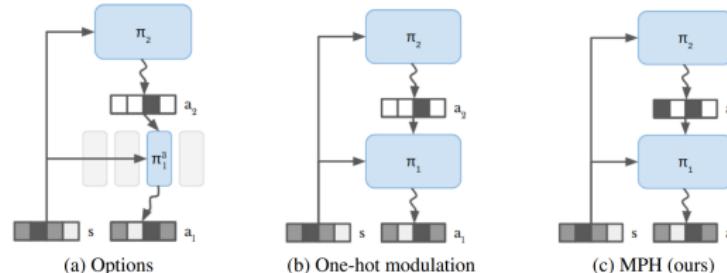
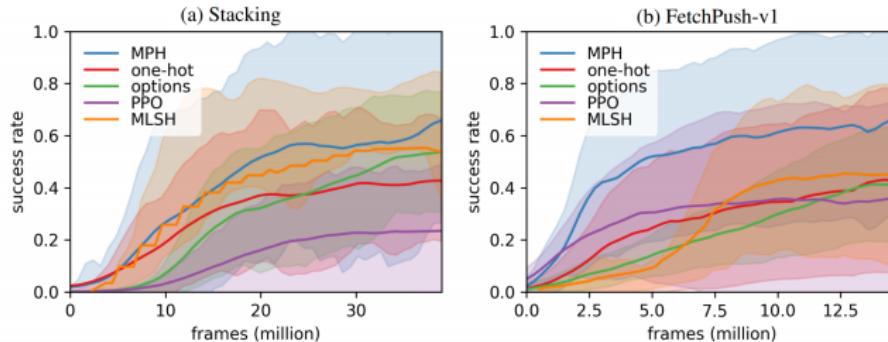


Figure 2: Overview of hierarchical policies. (a) The options agent selects between separate skill networks using a categorical master policy. (b) The one-hot agent combines the skills into a single network and is modulated by a 1-hot signal. (c) Our modulated policy hierarchy sends a binary vector, allowing for richer communication and mixing of skills.



## 1 Curriculum RL & Meta-RL

- Curriculum RL automatique
- Meta-RL

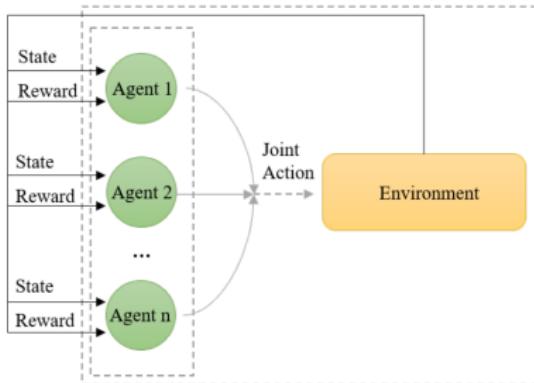
## 2 RL Hiérarchique

- Approches Féodales
- Options

## 3 Multi-Agents RL

# Multi-Agents Reinforcement Learning

Problèmes de décision séquentiels où plusieurs agents interagissent simultanément avec le même environnement :



- Ensemble d'actions jointes pour  $N$  agents :  $A = (A_1, A_2, \dots, A_N)$
- Transitions  $P : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$  définies selon l'ensemble d'actions A
- Rewards  $R : S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}^N$  selon actions communes
- $V^\pi : S \rightarrow \mathbb{R}^N$  défini selon l'ensemble des politiques  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$
- $Q^\pi : S \times A \rightarrow \mathbb{R}^N$  défini selon l'ensemble des politiques  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$  et des actions A
- En général, observations partielles pour chaque agent :  $O^t = (O_1^t, \dots, O_N^t)$

# Multi-Agents Reinforcement Learning

En théorie des jeux, un équilibre de Nash est une situation où :

- Chaque joueur prévoit correctement le choix des autres
- Chaque joueur maximise son gain, compte tenu de cette prévision.

Dilemme du prisonnier (D=dénonciation du complice, C=ne rien faire) :

- Si seul A (resp. B) dénonce, A (resp. B) est libre, B (resp. A) écoppe de 10 ans
- Si les deux dénoncent, les deux écoppent de 5 ans
- Si aucun ne dénonce, les deux écoppent de 6 mois

		D		C
D	😊😊	😊😊	😊😊	😊😊
C	😊😊	😊😊	😊😊	😊😊

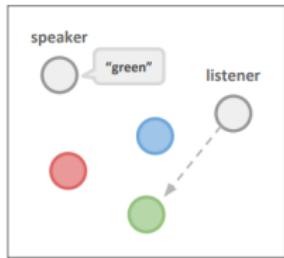
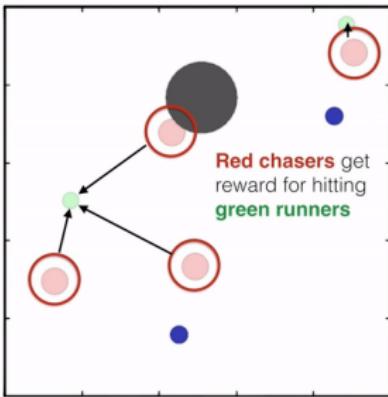
Équilibre de Nash si aucun des joueurs ne regrette son choix/n'aurait pas pu faire mieux compte tenu de ce qu'ont fait les autres (case D,D)

Appliqué au RL Multi-Agents, équilibre de Nash en  $\pi_*^1, \dots, \pi_*^N$  si pour tout  $i$ , pour tout  $\pi^i \in \Pi^i$ , on a pour chaque  $s$  [Kön03] :

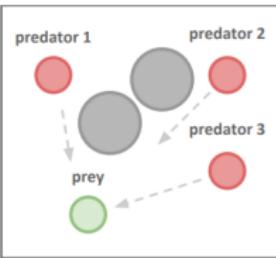
$$V_{\pi_*^1, \dots, \pi^i, \dots, \pi_*^N}^i(s) \leq V_{\pi_*^1, \dots, \pi_*^N}^i(s)$$

avec  $\Pi^i$  l'ensemble des politiques possibles pour l'agent  $i$ .

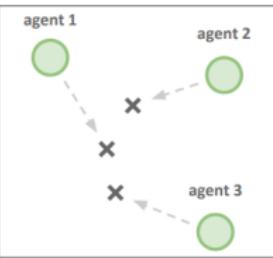
# Multi-Agents Cooperative/Competitive tasks



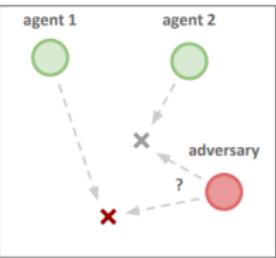
Cooperative Communication



Predator-Prey



Cooperative Navigation



Physical Deception

## Challenges :

- Non-stationnarité des transitions
  - ⇒ dépendant des actions des autres agents :  
 $P(s'|s, a_i, \pi_1, \dots, \pi_N) \neq P(s'|s, a_i, \pi'_1, \dots, \pi'_N)$
- Design du but / des rewards
- Hétérogénéité des agents :
  - différentes capacités
  - différents rôles
  - différents buts
- Scalabilité : nombre de paramètres peut exploser si nombreux agents avec paramètres individuels
- Problèmes de communication
- Observations partielles
- Agents asynchrones

# Multi-Agents Reinforcement Learning

## Première Approche : Exécution centralisée

- Agrégation de l'ensemble des informations (observations) récoltées par les différents agents
- Définition d'un reward global ou somme des rewards individuels
- Un seul contrôleur dont la politique retourne un ensemble d'actions à chaque pas de temps  $\pi(a_t|o_t)$ , avec  $a_t = (a_t^1, \dots, a_t^N)$  et  $o_t = (o_t^1, \dots, o_t^N)$  l'ensemble des actions et des observations au temps  $t$ .

⇒ Revient à un POMDP classique mais...

 Croissance exponentielle des espaces d'actions et d'observations avec le nombre d'agents (problème combinatoire)

 Limité à des problèmes où l'on peut contrôler conjointement l'ensemble des agents

- Confrontation d'un sous ensemble d'agents avec d'autres que l'on ne contrôle pas impossible
- Suppose une communication parfaite entre les agents et le contrôleur
- Ajout de nouveaux agents difficile
- Définition reward global pas toujours évident (pas adapté aux problèmes adverses par exemple)

 Dans les problèmes collaboratifs, tend à converger vers certains agents qui prennent le contrôle et d'autres qui deviennent "fainéants" [Sun+17]

# Multi-Agents Reinforcement Learning

## Première Approche : Exécution centralisée

- Possibilité : Factorisation des actions  $\pi(a_t|o_t) = \prod_{i=1}^N \pi_i(a_t^i|o_t)$ 
  - ⇒ Perte de dépendances entre actions des différents agents
  - ⇒ Apprentissage de  $\pi_i(a_t^i|o_t)$  pas forcément facilité car doit prendre en compte les distributions sur les autres agents mais...
- thumb up Reduit la complexité de la politique qui ne doit plus mapper qu'entre l'espace des observations jointes et l'espace des actions individuelles :
  - Complexité de  $\pi$  selon les actions passe de  $|\mathcal{A}|^N$  à  $N|\mathcal{A}|$ , si  $\mathcal{A}$  est l'ensemble d'actions possible pour un agent
- hand pointing down Croissance de l'espace des observations toujours exponentielle en fonction de N
- hand pointing down Toujours limité à des problèmes où l'on a accès à l'ensemble des observations
- hand pointing down Toujours problématique pour les environnements collaboratifs / concurrentiels
- ⇒ On préfère généralement des approches à exécution décentralisée : chaque agent (ou groupe d'agents) est contrôlé individuellement

# Multi-Agents Reinforcement Learning

Approche concurrente :

- Chaque agent est contrôlé individuellement selon ses propres observations, avec chacun une politique différente  $\pi_i(a_t^i|o_t^i)$
- Apprentissage simultané ou alterné des différents agents indépendants [Tam+17]
- Dans le cadre des PG, pour chaque agent  $i$ , on peut considérer (avec  $\pi(\tau)$  la probabilité de  $\tau$  selon l'environnement et tous les agents) :

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i + \mathbb{E}_{\tau \sim \pi(\tau)} \sum_{t=1}^{|\tau|-1} \nabla_{\theta_i} \log \pi_{\theta_i}(a_t^i | o_t^i) \sum_{t'=t}^{|\tau|-1} \gamma^{t'-t} r_t^i$$

- Ou dans le cas d'un reward global avec  $r_t$  à la place de  $r_t^i$  (+ de garanties de convergence, mais pas toujours plus rapide en pratique [BN06] et pas toujours possible)
  - 👍 Permet le contrôle d'agents hétérogènes mais...
  - 👎 Pas de partage d'expérience entre agents
  - 👎 Dynamiques de l'environnement non stationnaires (si on considère les autres agents comme appartenant à l'environnement)
  - 👎 Instabilité, Expérience Replay impossible

# Multi-Agents Reinforcement Learning

Approche décentralisée avec Partage de paramètres :

- Chaque agent est contrôlé selon ses propres observations
- Mais partage de paramètre entre agents : agent  $m$  contrôlé selon  $\pi_\theta(a_t^m | o_t^m, m)$
- Exemple : PS-TRPO [GEK17]

---

## Algorithm 1 PS-TRPO

---

**Input:** Initial policy parameters  $\Theta_0$ , trust region size  $\Delta$

**for**  $i \leftarrow 0, 1, \dots$  **do**

    Rollout trajectories for all agents  $\vec{\tau} \sim \pi_{\theta_i}$

    Compute advantage values  $A_{\pi_{\theta_i}}(o^m, m, a^m)$  for each agent  $m$ 's trajectory element.

    Find  $\pi_{\theta_{i+1}}$  maximizing Eq. (1)

        subject to  $\overline{D}_{KL}(\pi_{\theta_i} \| \pi_{\theta_{i+1}}) \leq \Delta$

---

Avec Eq.(1) :  $\mathcal{L}(\pi_{\theta_{i+1}}) = \sum_{m=1}^N \mathbb{E}_{(o,a) \sim p_{\theta_i}^m(o,a)} \left[ \frac{\pi_{\theta_{i+1}}(a|o,m)}{\pi_{\theta_i}(a|o,m)} A_{\theta_i}(o, m, a) \right],$

où  $(o, a) \sim p_{\theta_i}^m(o, a)$  correspond à un échantillonnage d'un couple observation-action pour l'agent  $m$  dans l'ensemble des trajectoires obtenues à l'étape  $i - 1$ .

Partage d'expérience, meilleure stabilité |

Différents comportements peuvent être appris car différentes observations et index  $m$  donné en entrée du réseau |

# Centralized training with decentralized execution

Dans divers cas, il est possible d'accéder à plus d'informations pendant l'entraînement que pendant l'exécution :

- Execution décentralisée (basée sur observations locales) mais apprentissage centralisé
- Par exemple entraînement sur simulateur permet de connaître l'état courant (voire les dynamiques du monde), ou Oracle en situation réelle (caméra qui observe le monde par exemple)
- ... Mais les agents n'ont pas directement accès à ces informations supplémentaires

Si on connaît les dynamiques du monde, il est possible de définir dans le cadre des Dec-POMDPs [KB16] :

$$Q_i^*(h_i, a_i) = \sum_{s, a_{-i}, h_{-i}} \pi(a_{-i} | h_{-i}) P_i(s, h_{-i} | h_i) \left[ R(s, \vec{a}) + \sum_{\omega_i \in \Omega_i} P_i(\omega_i | s, \vec{a}) \max_{b \in \mathcal{A}_i} Q_i^*((h_i, a_i, \omega_i), b) \right]$$

avec  $\omega_i$  une observation pour l'agent  $i$ ,  $h_i = (\omega_i^0, a_i^1, \omega_i^1, \dots, a_i^t, \omega_i^t)$  l'historique des actions-observations de l'agent  $i$  au temps  $t$ ,  $a_{-i}$  l'ensemble des observations sauf celle de l'agent  $i$ .

- $\pi(a_{-i} | h_{-i})$  retourne 1 seulement si toutes les actions sauf celle de  $i$  correspondent à celles choisies par les agents selon leurs historiques respectifs, i.e.  $\pi(a_{-i} | h_{-i}) = 1$  si  $\forall j \neq i, a_j = \text{argmax}_{a' \in \mathcal{A}_j} Q_j^*(h_j, a')$ .
- $P_i(\omega_i | s, \vec{a}) = \sum_{s'} P(s' | s, \vec{a}) O_i(\omega_i | s', \vec{a})$ , avec  $O_i(\omega_i | s', \vec{a})$  la probabilité d'observer  $\omega_i$  dans l'état  $s'$  si les actions précédentes étaient  $\vec{a}$ .

# \*Centralized training with decentralized execution

Objectif à maximiser :  $\sum_{a_i \in \mathcal{A}_i} \pi(a_i, \omega_i^0) Q_i^*(h_i^0, a_i)$

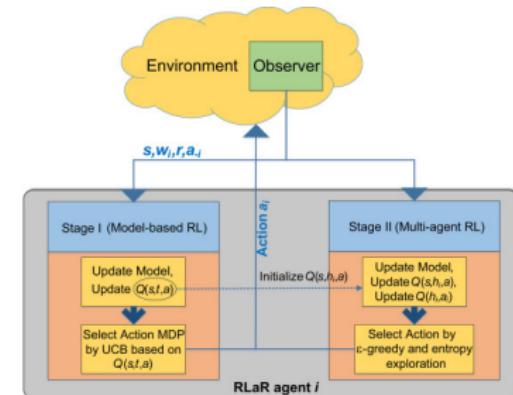
- Malheureusement, planification stochastique impossible dans la plupart des cas (problème au moins NEXP-complet).  
⇒ RL même lorsque les dynamiques du monde sont connues

RLaR [KB16] :

- Model-based MARL : Chaque agent apprend un modèle  $\hat{P}(s'|s, \vec{a})$ ,  $\hat{R}(s, \vec{a})$ ,  $\hat{O}_i(\omega_i|s', \vec{a})$ ,  $\hat{P}_i(a_i|s, h_i)$ ,  $\hat{P}_i(s|h_i)$
- Deux phases d'apprentissage :

- 1  $Q(s, t, \vec{a}) = \hat{R}(s, \vec{a}) + \sum_{s' \in S} \hat{P}(s'|s, \vec{a}) \max_{\vec{a}' \in A} Q(s', t+1, \vec{a}')$
- 2  $Q_i(h_i, a_i) = \sum_{s, a_{-i}} \hat{P}_i(a_{-i}|s, h_i) \hat{P}_i(s|h_i) \tilde{Q}_i(s, h_i, \vec{a})$ , avec  
 $\tilde{Q}_i(s, h_i, \vec{a}) = \hat{R}(s, \vec{a}) + \sum_{\omega_i \in \Omega_i} \hat{P}_i(\omega_i|s, \vec{a}) \max_{a'_i \in \mathcal{A}_i} Q_i^*((h_i, a_i, \omega_i), a'_i)$

- Phase 1 sert à apprendre un modèle global du monde (et des politiques) en bénéficiant de toutes les informations à disposition
- Phase 2 permet d'adapter les agents aux informations partielles dont ils disposeront lors de l'exécution
- Après phase 1,  $\tilde{Q}_i(s, h_i, \vec{a})$  initialisé avec  $Q(s, t, \vec{a})$



# VDN : Value-Decomposition Networks For Cooperative Multi-Agent Learning

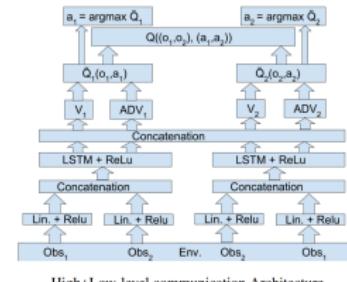
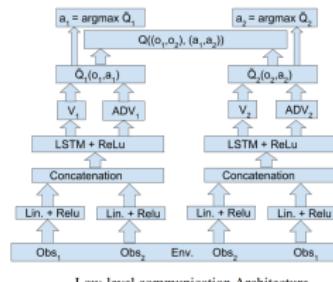
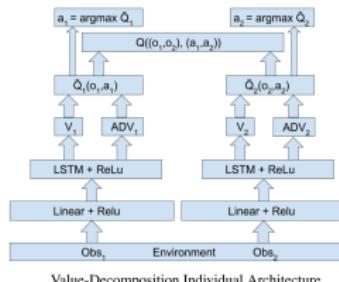
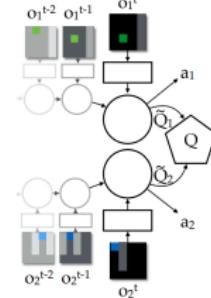
Mais modèle très complexe... Plus simplement, VDN [Sun+17] propose une approche à exécution décentralisée avec apprentissage centralisé basée sur la décomposition de fonctions de Valeur Q en valeurs individuelles, en supposant :

$$Q((h^1, h^2, \dots, h^N), (a^1, a^2, \dots, a^N)) \approx \sum_{i=1}^N \tilde{Q}_i(h^i, a^i)$$

avec  $h_i$  l'historique d'observations de l'agent  $i$ .

VDN se base sur DQN, en considérant un réseau par agent, dont les sorties sont sommées et comparées à  $r_t + \gamma \max_{\vec{a}} Q(h_{t+1}, \vec{a})$ .

Plusieurs architectures sont considérées :



Mais VDN limité à une certaine classe additive de fonctions de valeur (e.g., problématique pour objectifs inverses ou de scales différents) et impossible d'intégrer des informations supplémentaires sur l'état pendant l'apprentissage.

QMIX [Ras+18] relaxe ces contraintes en affirmant qu'il suffit que :

$$\arg \max_{\boldsymbol{u}} Q_{tot}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{u}) = \begin{pmatrix} \arg \max_{u_1} Q_1(\tau_1, u_1) \\ \dots \\ \arg \max_{u_N} Q_N(\tau_N, u_N) \end{pmatrix}$$

Cela correspond à la classe des fonctions de valeur Q monotones, c'est à dire respectant :

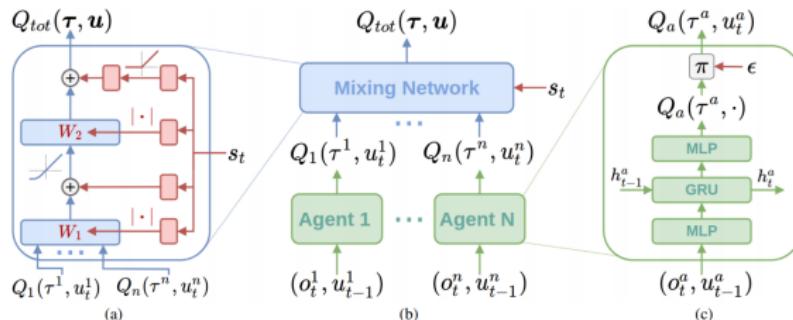
$$\frac{\partial Q_{tot}}{\partial Q_a} \geq 0, \forall a \in \{1, \dots, N\}$$

En plus d'élargir la classe de fonctions, cela permet de simplifier grandement le choix de  $\arg \max_{\boldsymbol{u}} Q_{tot}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{u})$  en fonction des valeurs individuelles.

# QMIX : Monotonic Value Function Factorisation for MARL

Pour s'assurer de la contrainte de monotonie, QMIX emploie 3 types de réseaux :

- **Agent Network** : produit la valeur  $Q_i$  pour chaque agent  $i$  en fonction de son historique (mémoire RNN), de son observation courante et de sa dernière action
- **Mixing Network** : produit  $Q_{tot}$  à partir des valeurs individuelles. Pour garantir la monotonie, les poids (mais pas les biais) de ce réseau sont tous non-négatifs.
- **Ensemble d'HyperNetworks** : chacun d'entre eux prend l'état en entrée (ou toute autre information additionnelle pendant l'apprentissage) et produit les poids et les biais de chaque couche du Mixing Network (activation valeur absolue pour les poids)



- ⇒  $Q_{tot}$  peut dépendre de l'état de manière non-monotone. Le passer en entrée du Mixing Network conduirait à contraindre trop fortement l'apprentissage.
- ⇒ Apprentissage par différence temporelle selon  $Q_{tot}^\theta$  et un réseau cible  $Q_{tot}^{\theta^-}$
- ⇒ Après l'apprentissage, seul l'Agent Network est utilisé. Et les actions sont choisies individuellement (complexité linéaire).

# \*QMIX : Monotonic Value Function Factorisation for MARL

Problème à 2 agents, 2 étapes :

		Agent 2	
		A	B
Agent 1	A	7	7
	B	7	7
		State 2A	

		Agent 2	
		A	B
Agent 1	A	0	1
	B	1	8
		State 2B	

Rewards selon les actions des deux agents à l'étape 2 selon l'action choisie par A à l'étape 1 (agent 2 n'a pas d'effet sur l'étape 1)

(a)	State 1		State 2A		State 2B	
	A	B	A	B	A	B
A	6.94	6.94	6.99	7.02	-1.87	2.31
	6.35	6.36	6.99	7.02	2.33	6.51

(b)	State 1		State 2A		State 2B	
	A	B	A	B	A	B
A	6.93	6.93	7.00	7.00	0.00	1.00
	7.92	7.92	7.00	7.00	1.00	8.00

$Q_{tot}$  on the two-step game for (a) VDN and (b) QMIX.

- 👍 Plus efficace que VDN pour de nombreux problèmes (moins contraint, plus d'info pendant l'apprentissage)
- 👎 Pas adapté aux problèmes non-monotones, où les actions de valeur maximale pour chaque agent dépendent des actions des autres

# COMA : Counterfactual Multi-Agent Policy Gradients

COMA [Foe+17] : Policy Gradient avec Centralized training et Decentralized execution :

- Actor-Critic avec critique centralisée (pendant l'apprentissage on peut disposer de toutes les observations, voire de l'état, pour former la critique, par exemple sur un simulateur)
- Reward global (tâches avec coopération nécessaire pour atteindre un but commun)
- Chaque agent dispose d'un historique d'action-observations  $\tau^a$  sur lequel il définit une politique  $\pi(u|\tau^a)$

Une approche naïve serait de considérer le gradient de politique suivant pour chaque acteur  $a$  à chaque temps  $t$  :

$$\nabla_{\theta_a} \pi_{\theta_a}(u_t | \tau_t^a) (r_t + \gamma V(s_{t+1}) - V(s_t))$$

avec  $\pi_{\theta_a}(u_t | \tau_t^a)$  la probabilité de l'action  $u_t$  selon la politique de l'agent  $a$  et l'historique d'observations-actions  $\tau_t^a$  au temps  $t$ .

⇒ Problème de credit assignment : difficile de distribuer le feedback sur les agents avec une critique globale, gradient très bruité

# COMA : Counterfactual Multi-Agent Policy Gradients

COMA [Foe+17] :

- Counterfactual baseline : Difference de rewards espérés selon les possibles actions de chaque agent
- Basé sur [WT02] qui introduit une baseline qui permet de comparer l'action choisie à une action défaut  $c^a$  :  $r(s, u) - r(s, (u^{-a}, c))$ 
  - Mais cela nécessite d'interagir de trop nombreuses fois avec le simulateur (+ requiert la possibilité de défaire une action)
- COMA intègre cette idée dans une fonction d'avantage (avec Q compatible) :

$$A^a(s, u) = Q(s, u) - \sum_{u'^a} \pi_{\theta_a}(u'^a | \tau_t^a) Q(s, (u^{-a}, u'^a)) \quad \text{Gradient ?}$$

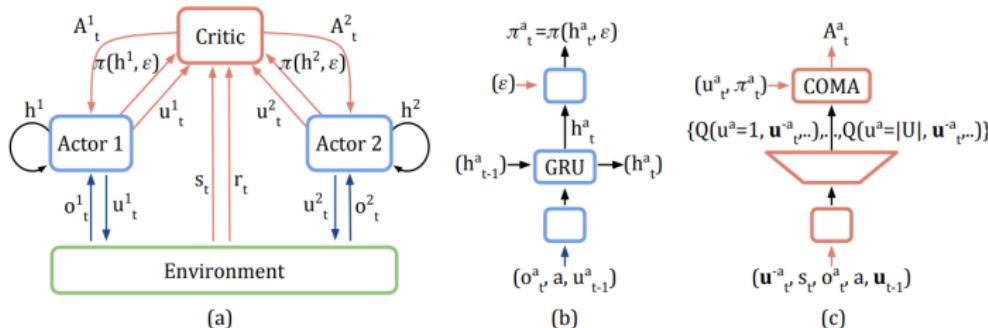
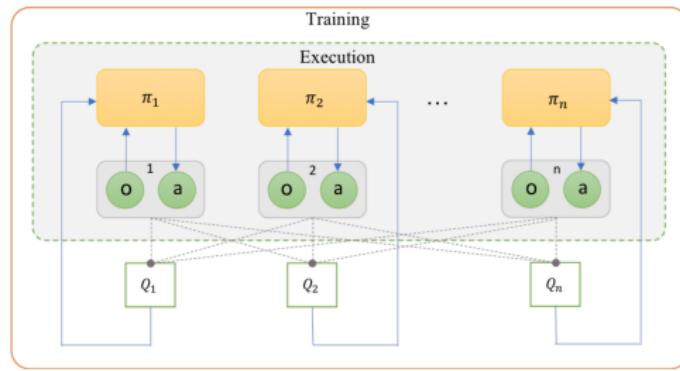


Figure 1: In (a), information flow between the decentralised actors, the environment and the centralised critic in COMA; red arrows and components are only required during centralised learning. In (b) and (c), architectures of the actor and critic.

# MADDPG : Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments

MADDPG [Low+17] :

- Rewards individuels permettant des environnements compétitifs
- Actions continues (basé sur DDPG)
- Critiques individuelles centralisées



Gradient pour l'agent  $i$  selon un buffer d'expérience replay  $\mathcal{D}$  :

$$\nabla_{\theta_i} J(\mu_i) = \mathbb{E}_{x,a \sim \mathcal{D}} [\nabla_{\theta_i} \mu_i(o_i) \nabla_{a_i} Q_i^\mu(x, a_1, \dots, a_N) |_{a_i=\mu_i(o_i)}]$$

avec  $x$  contenant le contexte d'action (état si disponible, observations des agents) et  $Q_i^\mu$  appris selon des politiques différentes  $\mu'$  et un réseau cible  $Q_i^{\mu'}$  :

$$\min \mathbb{E}_{x,a,x',r \sim \mathcal{D}} [(Q_i^\mu(x, a_1, \dots, a_N) - y)^2] \text{ avec } y = r_i + \gamma Q_i^{\mu'}(x, \mu'_1(o'_1), \dots, \mu'_N(o'_N))$$

# MADDPG : Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments

---

**Algorithm 1:** Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient for  $N$  agents

---

**for** episode = 1 to  $M$  **do**

    Initialize a random process  $\mathcal{N}$  for action exploration

    Receive initial state  $\mathbf{x}$

**for**  $t = 1$  to max-episode-length **do**

        for each agent  $i$ , select action  $a_i = \mu_{\theta_i}(o_i) + \mathcal{N}_t$  w.r.t. the current policy and exploration

        Execute actions  $a = (a_1, \dots, a_N)$  and observe reward  $r$  and new state  $\mathbf{x}'$

        Store  $(\mathbf{x}, a, r, \mathbf{x}')$  in replay buffer  $\mathcal{D}$

$\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x}'$

**for** agent  $i = 1$  to  $N$  **do**

        Sample a random minibatch of  $S$  samples  $(\mathbf{x}^j, a^j, r^j, \mathbf{x}'^j)$  from  $\mathcal{D}$

        Set  $y^j = r_i^j + \gamma Q_i^{\mu'}(\mathbf{x}'^j, a'_1, \dots, a'_N)|_{a'_k=\mu'_k(o'_k)}$

        Update critic by minimizing the loss  $\mathcal{L}(\theta_i) = \frac{1}{S} \sum_j (y^j - Q_i^{\mu}(\mathbf{x}^j, a_1^j, \dots, a_N^j))^2$

        Update actor using the sampled policy gradient:

$$\nabla_{\theta_i} J \approx \frac{1}{S} \sum_j \nabla_{\theta_i} \mu_i(o_i^j) \nabla_{a_i} Q_i^{\mu}(\mathbf{x}^j, a_1^j, \dots, a_i^j, \dots, a_N^j)|_{a_i=\mu_i(o_i^j)}$$

**end for**

    Update target network parameters for each agent  $i$ :

$$\theta'_i \leftarrow \tau \theta_i + (1 - \tau) \theta'_i$$

**end for**

**end for**

---

⇒ On établit la cible en fonction de  $\mu'_1(o'_1), \dots, \mu'_N(o'_N)$  plutôt que des actions suivantes enregistrées dans le buffer pour prendre en compte l'évolution des politiques

⇒  $\mu'_1(o'_1), \dots, \mu'_N(o'_N)$  plutôt que  $\mu_1(o'_1), \dots, \mu_N(o'_N)$  afin d'éviter les changements trop brutaux pour l'apprentissage de  $Q$

# MADDPG : Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments

L'idée derrière MADDPG (et l'évaluation de  $Q$  selon l'ensemble des actions des agents) est de se dire que si l'on connaît les actions prises par l'ensemble des agents, le problème devient stationnaire même si les politiques des agents évoluent :

$$P(s'|s, a_1, \dots, a_N, \pi_1, \dots, \pi_N) = P(s'|s, a_1, \dots, a_N) = P(s'|s, a_1, \dots, a_N, \pi'_1, \dots, \pi'_N)$$

Cependant l'évaluation de  $Q$  telle que définie précédemment nécessite de connaître l'ensemble des politiques. Si ce n'est pas le cas (agents ne communiquent pas), il est possible de faire apprendre à chaque agent  $i$  un modèle de chaque agent  $j \neq i$  :

$$\phi_i^j \leftarrow \phi_i^j + \alpha \mathbb{E}_{o_j, a_j} [\nabla_{\phi_i^j} \log p_{\phi_i^j}(a_j | o_j) - \lambda \nabla_{\phi_i^j} H(p_{\phi_i^j}(\cdot | o_j))]$$

avec par exemple  $p_{\phi_i^j}(a_j | o_j) = \mathcal{N}(a_j; \mu_{\phi_i^j}(j), \sigma_{\phi_i^j}^2(o_j)I)$  et  $H$  l'entropie de la distribution.

On peut alors considérer :

$$\min \mathbb{E}_{x, a, x', r \sim \mathcal{D}} [(Q_i^\mu(x, a_1, \dots, a_N) - y)^2] \text{ avec } y = r_i + \gamma Q_i^{\mu'}(x, \mu_{\phi_i^1}(o'_1), \dots, \mu_{\phi_i^N}(o'_N))$$

Encore faut-il supposer que l'on ait accès aux observations des différents agents, mais cela peut se faire lors de la transmission au buffer de replay (moins contraignant que la transmission des paramètres de politique qui devrait être réalisée en temps réel).

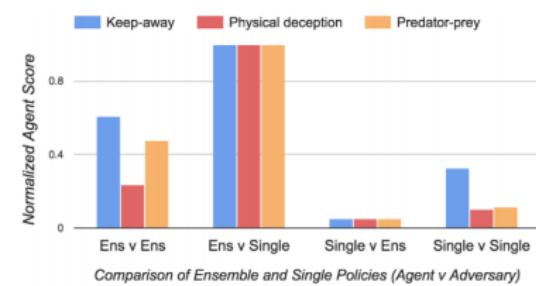
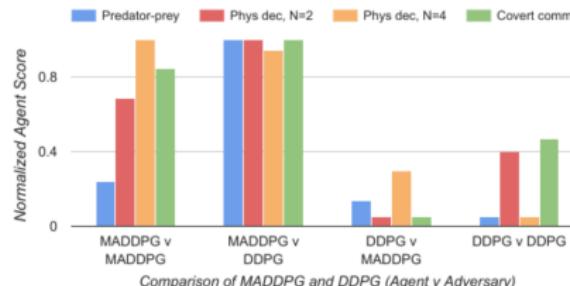
# MADDPG : Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments

Pour obtenir des politiques robustes aux changements des autres agents (e.g., éviter de sur-apprendre sur les politiques des agents concurrents), MADDPG propose également de considérer des ensemble de politiques par agent : chaque agent possède  $K$  politiques  $\mu_i^{(1)}, \dots, \mu_i^{(K)}$ .

On vise alors à maximiser pour chaque agent  $i$  :  $\mathbb{E}_{k \sim \text{unif}(1, K), s \sim d^\mu, a_i \sim \mu_i^{(k)}} [R_i(s, a_i)]$

Gradient correspondant (avec  $k$  replay buffers par agent) :

$$\nabla_{\theta_i^{(k)}} J(\mu_i) = \mathbb{E}_{x, a \sim D_i^{(k)}} [\nabla_{\theta_i^{(k)}} \mu_i^{(k)}(o_i) \nabla_{a_i} Q_i^\mu(x, a_1, \dots, a_N) |_{a_i = \mu_i^{(k)}(o_i)}]$$



- 👍 Bonnes performances sur diverses tâches collaboratives/competitives
- 👍 Ensemble de politiques meilleur que politiques uniques
- 👉 Taille de l'entrée de  $Q$  croît linéairement avec le nombre d'agents (on pourrait envisager de ne s'intéresser qu'à un voisinage d'agents pour limiter)

# \*Inequity aversion improves cooperation in MARL

Aucune de ces approches ne garantit qu'un agent ne puisse prendre trop de pouvoir

- Particulièrement vrai avec rewards individuels
- Mais aussi avec les rewards collectifs, pour lesquels on peut converger vers des solutions sous-optimales où certains agents sont négligés

Pour bien des tâches, c'est problématique : Si les agents considérés sont considérés, c'est a priori pour qu'ils servent à quelque chose (sinon problème mal-dimensionné)

Lorsque les moyennes de rewards cumulés par les agents devraient être comparables, on peut définir des récompenses qui modélisent l'aversion à l'inégalité [Hug+18] :

$$u_i(s_i^t, a_i^t) = r_i(s_i^t, a_i^t) - \frac{\alpha_i}{N-1} \sum_{i \neq j} \max(e_j^t(s_j^t, a_j^t) - e_i(s_i^t, a_i^t), 0) \\ - \frac{\beta_i}{N-1} \sum_{i \neq j} \max(e_i^t(s_i^t, a_i^t) - e_j(s_j^t, a_j^t), 0)$$

avec  $e_j^t(s_j^t, a_j^t)$  le reward lissé de l'agent  $j$ , mis à jour à chaque pas de temps  $t$  selon :

$$e_j^t(s_j^t, a_j^t) \leftarrow \lambda \gamma e_j^{t-1}(s_j^{t-1}, a_j^{t-1}) + r_i(s_i^t, a_i^t)$$

Dans [Hug+18] : agents A3C qui ont accès aux valeurs  $e_j^t$  de tous les agents  $j$ .  
 $\alpha_i$  et  $\beta_i$  contrôlent les caractéristiques de l'agent  $i$  :

- Un fort  $\alpha_i$  diminue le score de l'agent  $i$  si un autre agent a un meilleur reward extrinsèque que lui (envie)
- Un fort  $\beta_i$  diminue le score de l'agent  $i$  si un autre agent a un moins bon reward extrinsèque que lui (culpabilité)

# \*FEN : Fairness in Multi-Agents Reinforcement Learning

FEN [JL19] va plus loin que ce type de modèle d'envie et de culpabilité, en garantissant un équitable partage de ressources dans les problèmes sur lesquels ce genre de contrainte a un intérêt.

- Utilité considérée :  $u_t^i = \frac{1}{t} \sum_{j=0}^t r_j^i$ , avec  $r_t^i$  uniquement lié à l'utilisation des ressources en  $t$
- Critère d'équité considéré = coefficient de variation (CV) :  $\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(u^i - \bar{u})^2}{\bar{u}^2}}$
- ⇒ Reward intrinsèque :  $\hat{r}_t^i = \frac{\bar{u}_t/c}{\epsilon + |u_t^i/\bar{u}_t - 1|}$ , avec  $c$  le reward extrinsèque maximal atteignable sur un pas de temps
- ⇒ Objectif : maximiser pour chaque agent  $i$ , selon sa politique individuelle apprise de manière décentralisée,  $F_i = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma \hat{r}_t^i$

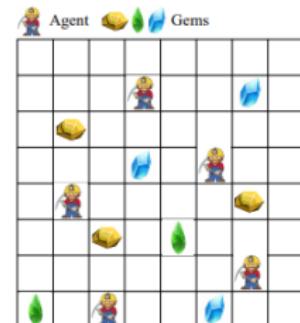
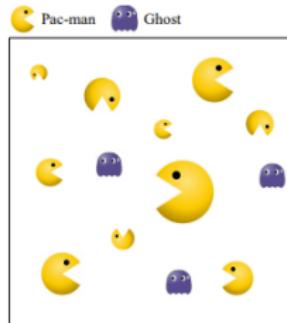
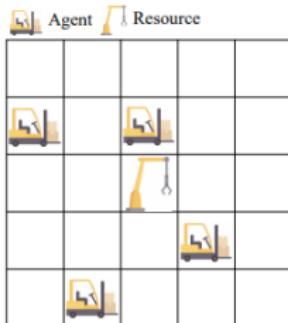


Illustration of experimental scenarios: job scheduling (*left*), the Matthew effect (*mid*), manufacturing plant (*right*).

# \*FEN : Fairness in Multi-Agents Reinforcement Learning

Après avoir montré qu'à l'optimum, on est garanti d'avoir un partage équitable des ressources avec ce genre de reward, FEN [JL19] définit la politique d'un agent comme un réseau hiérarchique (difficile de traiter les deux objectifs contradictoires fairness-efficiency sur un seul niveau) :

- Niveau supérieur : contrôleur qui choisit tous les T pas de temps entre les sous-politiques à appliquer

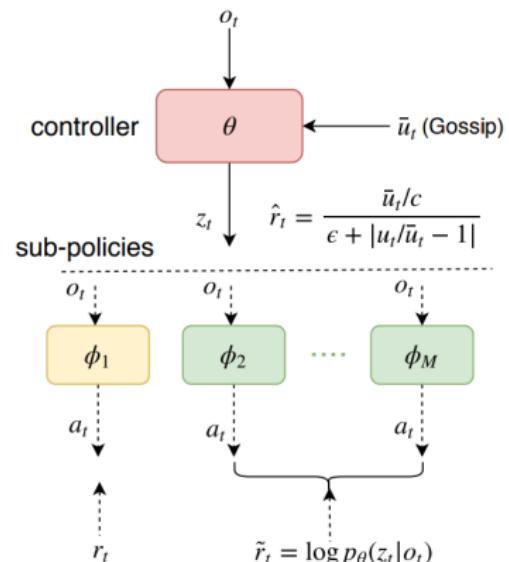
- Niveau inférieur : sous-politiques qui interagissent avec l'environnement

- 1 qui choisit une action en fonction de l'état et reçoit les récompenses de l'environnement.

**Objectif** : maximiser l'efficacité

- M-1 autres qui visent à être le plus diverses possibles (grâce à un terme d'entropie) et le plus favorables au contrôleur (grâce à un reward dépendant de leur probabilité d'être choisie selon l'observation en courante).

**Objectif** : trouver des stratégies qui servent la fairness



FEN architecture.

## Exécution et Apprentissage décentralisés

### Algorithm 1 FEN training

---

```

1: Initialize  $u_i$ ,  $\bar{u}_i$ , the controller  $\theta$  and sub-policies  $\phi$ 
2: for episode = 1, ...,  $\mathcal{M}$  do
3:   The controller chooses one sub-policy  $\phi_z$ 
4:   for  $t = 1, \dots, \text{max-episode-length}$  do
5:     The chosen sub-policy  $\phi_z$  acts to the environment
       and gets the reward  $\begin{cases} r_t & \text{if } z = 1, \\ \log p_\theta(z|o_t) & \text{else} \end{cases}$ 
6:     if  $t\%T = 0$  then
7:       Update  $\phi_z$  using PPO
8:       Update  $\bar{u}_i$  (with gossip algorithm)
9:       Calculate  $\hat{r}^i = \frac{\bar{u}_i/c}{\epsilon + |u^i/\bar{u}_i - 1|}$ 
10:      The controller reselects one sub-policy
11:    end if
12:  end for
13:  Update  $\theta$  using PPO
14: end for

```

---

⇒ Agents coordonnés par un consensus moyen d'utilité

⇒ Si communication limitée à un certain voisinage

⇒ Algorithme de Gossip pendant  $S$  itérations pour atteindre un consensus moyen sur le voisinage (algo de type Metropolis-Hastings) [XBK07] :

$$\bar{u}_i(s+1) \leftarrow \bar{u}_i(s) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i^t} w_{i,j} (\bar{u}_j(t) - \bar{u}_i(s)) \text{ avec } \bar{u}_i(0) = u_i^t \text{ et}$$

$$w_{i,j} = 1 / (\max(|\mathcal{N}_i^t|, |\mathcal{N}_j^t|) + 1) \text{ et } \mathcal{N}_i^t \text{ le voisinage de } i \text{ à l'instant } t.$$

# Multi-Agents Reinforcement Learning

Tableau de synthèse des principaux challenges et algorithmes associés  
(source : [NNN18])

Challenges	Value-based	Actor-critic	Policy-based
Partial observability	DRQN [36]; DDRQN [24]; RIAL and DIAL [23]; Action-specific DRQN [121]; MT-MARL [85]; PS-DQN [30]; RL as a Rehearsal (RLaR) [55]	PS-DDPG and PS-A3C [30]; MADDPG-M [48]	DPIQN and DRPIQN [42]; PS-TRPO [30]; Bayesian action decoder (BAD) [26]
Non-stationarity	DRUQN and DLCQN [12]; Multi-agent concurrent DQN [18]; Recurrent DQN-based multi-agent importance sampling and fingerprints [25]; Hysteretic-DQN [85]; Lenient-DQN [86]; WDDQN [120]	MADDPG [68]; PS-A3C [30]	PS-TRPO [30]
Continuous action spaces		Recurrent DPG [39]; DDPG [66]	TRPO [101]; PS-TRPO [30]
Multi-agent training schemes	Multi-agent extension of DQN [111]; RIAL and DIAL [23]; CommNet [109]; DRON [38]; MS-MARL [53, 54]; Linearly fuzzified joint Q-function for MAS [69]	MADDPG [68]; COMA [27]	
Transfer learning in MAS	Policy distillation [96]; Multi-task policy distillation [117]; Multi-agent DQN [20]	Progressive networks [97]	Actor-Mimic [87]

# Sources

- Yannis Flet-Berliac : <https://thegradient.pub/the-promise-of-hierarchical-reinforcement-learning/>
- Open-ai : <https://openai.com/blog/learning-to-cooperate-compete-and-communicate/>
- OpenAi :  
<https://openai.com/blog/learning-a-hierarchy/>

# References |

- [And+17] Marcin Andrychowicz et al. « Hindsight Experience Replay ». In : *CoRR abs/1707.01495* (2017). arXiv : 1707.01495.
- [BHP16] Pierre-Luc Bacon, Jean Harb et Doina Precup. « The Option-Critic Architecture ». In : *CoRR abs/1609.05140* (2016). arXiv : 1609.05140.
- [BN06] Drew Bagnell et Andrew Y Ng. « On local rewards and scaling distributed reinforcement learning ». In : *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2006, p. 91-98.
- [Cza+18] Wojciech Marian Czarnecki et al. « Mix&Match - Agent Curricula for Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1806.01780* (2018). arXiv : 1806.01780.
- [DH93] Peter Dayan et Geoffrey E Hinton. « Feudal reinforcement learning ». In : *Advances in neural information processing systems*. 1993, p. 271-278.
- [DSB16] Laurent Dinh, Jascha Sohl-Dickstein et Samy Bengio. « Density estimation using Real NVP ». In : *CoRR abs/1605.08803* (2016). arXiv : 1605.08803.
- [Dua+16] Yan Duan et al. « RL\$^2\$ : Fast Reinforcement Learning via Slow Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1611.02779* (2016). arXiv : 1611.02779.

# References II

- [Eys+18] Benjamin Eysenbach et al. « Diversity is All You Need : Learning Skills without a Reward Function ». In : *CoRR abs/1802.06070* (2018). arXiv : 1802.06070.
- [FAL17] Chelsea Finn, Pieter Abbeel et Sergey Levine. « Model-Agnostic Meta-Learning for Fast Adaptation of Deep Networks ». In : *CoRR abs/1703.03400* (2017). arXiv : 1703.03400.
- [Flo+17a] Carlos Florensa et al. « Automatic Goal Generation for Reinforcement Learning Agents ». In : *CoRR abs/1705.06366* (2017). arXiv : 1705.06366.
- [Flo+17b] Carlos Florensa et al. « Reverse curriculum generation for reinforcement learning ». In : *arXiv preprint arXiv :1707.05300* (2017).
- [Foe+17] Jakob Foerster et al. « Counterfactual Multi-Agent Policy Gradients ». en. In : *arXiv :1705.08926 [cs]* (mai 2017). arXiv : 1705.08926.
- [Fra+17] Kevin Frans et al. « Meta Learning Shared Hierarchies ». In : *CoRR abs/1710.09767* (2017). arXiv : 1710.09767.
- [GEK17] Jayesh K Gupta, Maxim Egorov et Mykel Kochenderfer. « Cooperative multi-agent control using deep reinforcement learning ». In : *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Springer. 2017, p. 66-83.
- [Hug+18] Edward Hughes et al. « Inequity aversion resolves intertemporal social dilemmas ». In : *CoRR abs/1803.08884* (2018). arXiv : 1803.08884.

# References III

- [Hum+19] Jan Humplík et al. « Meta reinforcement learning as task inference ». In : *arXiv preprint arXiv :1905.06424* (2019).
- [Jab+19] Allan Jabri et al. « Unsupervised Curricula for Visual Meta-Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1912.04226* (2019). arXiv : 1912.04226.
- [Jad+17] Max Jaderberg et al. « Population Based Training of Neural Networks ». In : *CoRR abs/1711.09846* (2017). arXiv : 1711.09846.
- [JL19] Jiechuan Jiang et Zongqing Lu. « Learning Fairness in Multi-Agent Systems ». In : *Thirty-Third Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2019.
- [Kam+20] Pierre-Alexandre Kamienny et al. « Learning Adaptive Exploration Strategies in Dynamic Environments Through Informed Policy Regularization ». In : *CoRR abs/2005.02934* (2020). arXiv : 2005.02934.
- [KB16] Landon Kraemer et Bikramjit Banerjee. « Multi-agent reinforcement learning as a rehearsal for decentralized planning ». In : *Neurocomputing* 190 (2016), p. 82 -94.
- [Kön03] Ville Könönen. « Asymmetric Multiagent Reinforcement Learning ». In : *IAT*. 2003.
- [Low+17] Ryan Lowe et al. « Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments ». In : *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017, p. 6379-6390.

# References IV

- [Mat+17] Tambet Matiisen et al. « Teacher-Student Curriculum Learning ». In : *CoRR abs/1707.00183* (2017). arXiv : 1707.00183.
- [Nac+18] Ofir Nachum et al. « Data-Efficient Hierarchical Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1805.08296* (2018). arXiv : 1805.08296.
- [Nai+18] Ashvin Nair et al. « Visual Reinforcement Learning with Imagined Goals ». In : *CoRR abs/1807.04742* (2018). arXiv : 1807.04742.
- [Nar+16] Sanmit Narvekar et al. « Source Task Creation for Curriculum Learning ». In : *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*. AAMAS '16. Singapore, Singapore : International Foundation for Autonomous Agents et Multiagent Systems, 2016, p. 566-574.
- [NHR99] Andrew Y. Ng, Daishi Harada et Stuart J. Russell. « Policy Invariance Under Reward Transformations : Theory and Application to Reward Shaping ». In : *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning*. ICML '99. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999, p. 278-287.
- [NNN18] Thanh Thi Nguyen, Ngoc Duy Nguyen et Saeid Nahavandi. « Deep reinforcement learning for multi-agent systems : a review of challenges, solutions and applications ». In : *arXiv preprint arXiv :1812.11794* (2018).

- [Osb+19] Ian Osband et al. « Deep Exploration via Randomized Value Functions ». In : *Journal of Machine Learning Research* 20.124 (2019), p. 1-62.
- [Pas+18] Alexander Pashevich et al. « Modulated Policy Hierarchies ». In : *CoRR* abs/1812.00025 (2018). arXiv : 1812.00025.
- [Pat+17] Deepak Pathak et al. « Curiosity-driven exploration by self-supervised prediction ». In : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2017, p. 16-17.
- [Por+19] Rémy Portelas et al. « Teacher algorithms for curriculum learning of Deep RL in continuously parameterized environments ». In : *CoRR* abs/1910.07224 (2019). arXiv : 1910.07224.
- [Por+20] Rémy Portelas et al. « Automatic Curriculum Learning For Deep RL : A Short Survey ». In : *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 2020*. Sous la dir. de Christian Bessiere. ijcai.org, 2020, p. 4819-4825.
- [Rac+19] Sébastien Racanière et al. « Automated curricula through setter-solver interactions ». In : *CoRR* abs/1909.12892 (2019). arXiv : 1909.12892.
- [Ras+18] Tabish Rashid et al. « QMIX : Monotonic Value Function Factorisation for Deep Multi-Agent Reinforcement Learning ». In : *CoRR* abs/1803.11485 (2018). arXiv : 1803.11485.

# References VI

- [SPS99] Richard S Sutton, Doina Precup et Satinder Singh. « Between MDPs and semi-MDPs : A framework for temporal abstraction in reinforcement learning ». In : *Artificial intelligence* 112.1-2 (1999), p. 181-211.
- [Suk+17] Sainbayar Sukhbaatar et al. « Intrinsic Motivation and Automatic Curricula via Asymmetric Self-Play ». In : *CoRR abs/1703.05407* (2017). arXiv : 1703.05407.
- [Suk+18] Sainbayar Sukhbaatar et al. « Learning Goal Embeddings via Self-Play for Hierarchical Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1811.09083* (2018). arXiv : 1811.09083.
- [Sun+17] Peter Sunehag et al. « Value-Decomposition Networks For Cooperative Multi-Agent Learning ». In : *CoRR abs/1706.05296* (2017). arXiv : 1706.05296.
- [Sve+17] Maxwell Svetlik et al. « Automatic curriculum graph generation for reinforcement learning agents ». In : *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017.
- [Tam+17] Ardi Tampuu et al. « Multiagent cooperation and competition with deep reinforcement learning ». In : *PLoS one* 12.4 (2017), e0172395.
- [Vez+17] Alexander Sasha Vezhnevets et al. « FeUDal Networks for Hierarchical Reinforcement Learning ». In : *CoRR abs/1703.01161* (2017). arXiv : 1703.01161.

# References VII

- [Wan+19] Rui Wang et al. « Paired Open-Ended Trailblazer (POET) : Endlessly Generating Increasingly Complex and Diverse Learning Environments and Their Solutions ». In : *CoRR abs/1901.01753* (2019). arXiv : [1901.01753](https://arxiv.org/abs/1901.01753).
- [WCE03] Eric Wiewiora, Garrison W Cottrell et Charles Elkan. « Principled methods for advising reinforcement learning agents ». In : *Proceedings of the 20th International Conference on Machine Learning (ICML-03)*. 2003, p. 792-799.
- [Wen20] Lilian Weng. « Curriculum for Reinforcement Learning ». In : [lilianweng.github.io/lil-log](http://lilianweng.github.io/lil-log) (2020).
- [WT02] David H Wolpert et Kagan Tumer. « Optimal payoff functions for members of collectives ». In : *Modeling complexity in economic and social systems*. World Scientific, 2002, p. 355-369.
- [XBK07] Lin Xiao, Stephen Boyd et Seung-Jean Kim. « Distributed average consensus with least-mean-square deviation ». In : *Journal of parallel and distributed computing* 67.1 (2007), p. 33-46.