



LGP

LABORATOIRE
GÉNIE DE PRODUCTION



ÉCOLE
NATIONALE

D'INGÉNIEURS
DE TARBES

Partie 4 : Planification temporelle dynamique et flexible

Ajdin SUMIC & Thierry VIDAL, Frédéric Maris, Tiago de Lima, Bruno Zanuttini

Sommaire

- I. Planification temporelle**
- II. Gestion opérationnelle d'un plan sous incertitude (planification + exécution)**
- III. Planification temporelle multi-agent**



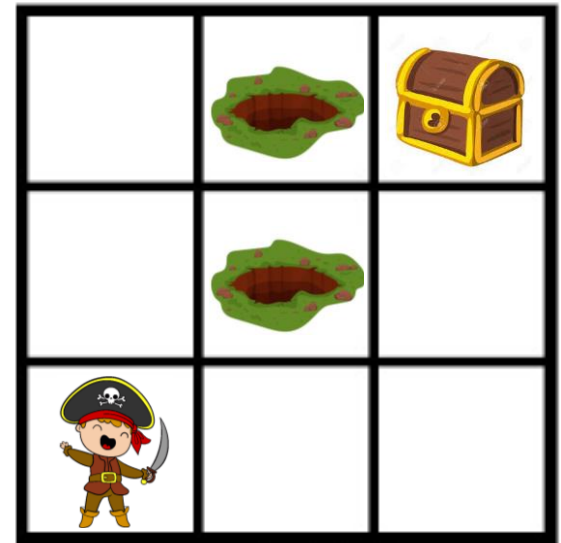
Planification temporelle

Rappel

Planification Classique

➤ Séquence d'actions qui permet de passer d'un état initial à un état final

- Etat initial : case en bas à gauche
- Action : Gauche, Droite, Haut, Bas
- Objectif : atteindre le trésor

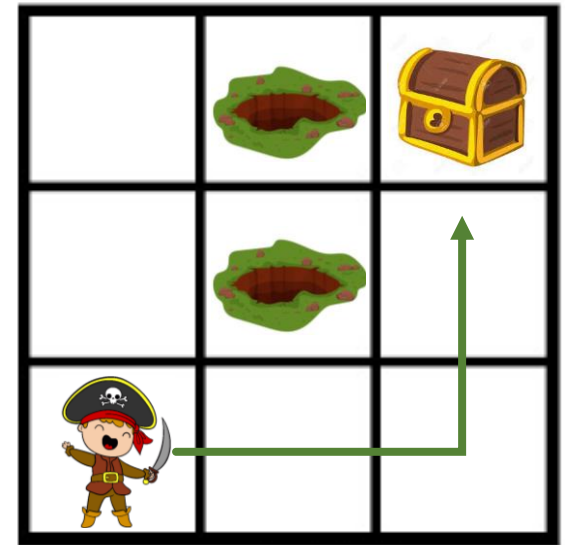


Rappel

Planification Classique

➤ Séquence d'actions qui permet de passer d'un état initial à un état final

- Etat initial : case en bas à gauche
- Action : Gauche, Droite, Haut, Bas
- Objectif : atteindre le trésor



Séquence : Droite → Droite → Haut → Haut

Planification Temporelle

En quoi ça consiste ?

Exprimer :

- des durées sur les actions
- des préconditions vrais au début/fin/pendant les actions
- des effets vrais au début/fin des actions

Planificateur :

- Séquence d'actions qui satisfait un objectif(s)
- Prend en compte les relations temporelles

Planification Temporelle

Un peu d'histoire

STRIPS (Fikes et al, 1970, Artificial Intelligence) :

- Premier planificateur espace d'états
- Représentation **implicite** du temps à travers les états + précedence
- Utilisation d'étiquettes temporelles : temps relatif
 - Spécifie quand une action peut être exécutée

GraphPlan (Blum et al, 1995, IJCAI) :

- Construit un graphe d'états + transition = toutes les actions possibles
- Permet de représenter le parallélisme (+ mutex)

Planification Temporelle

Un peu d'histoire

Planificateurs « temporels » de première intention (planificateur classique) :

- Produit un plan de tâche et **ensuite** affecte des instants temporels au plan
 - Représentation **implicite** du temps
 - Répare de manière gloutonne le plan si non fonctionnel
 - Résout seulement des problèmes temporellement simples
- **MetricFF** officieusement remporte la filière temporelle de l'IPC-2008 (Hoffmann, 2003, Artificial Intelligence Research)
- **YAHSP** (V.Vidal, 2011 & 2014, IPC) remporte l'IPC-2011 et 2014

Planification Temporelle

Un peu d'histoire

Une représentation **explicite** du temps

DEVISER (S. Vere, 1983, IEEE) :

- Premier planificateur temporel à expliciter les informations temporelles
- Planificateur parallèle avec des contraintes temporelles et des durées
- Durée déterministe
- Représentation ad-hoc = ne s'appuie sur aucun modèle théorique connu

Planification Temporelle

Un peu d'histoire

O-Plan (Currie et al., 1991, Artificial Intelligence) :

- Premier planificateur à utiliser les notions de points temporels et contraintes métriques entre les points temporel
- Etend la formulation littérale de DEVISER

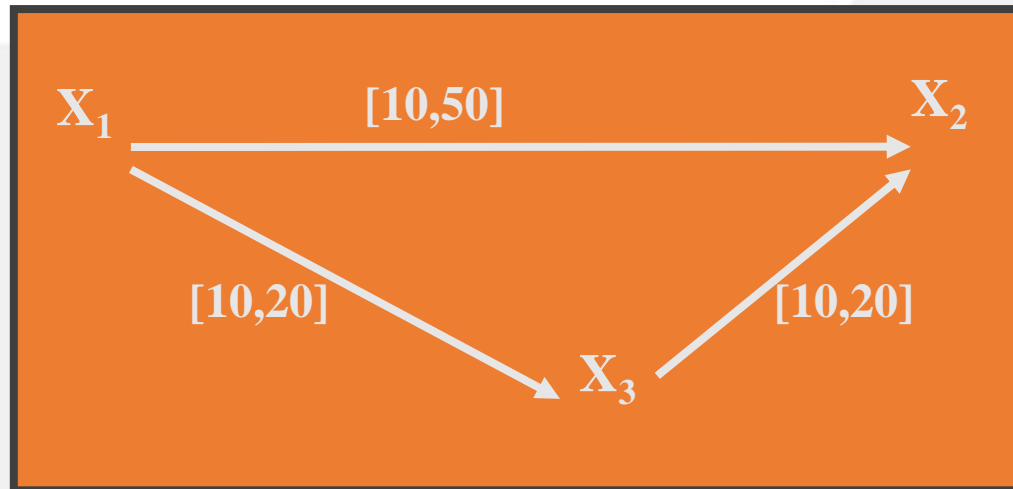
1991 : *Temporal constraint networks* (Dechter et al., Artificial Intelligence)

- Premier modèle théorique de contraintes temporelles (TCSP)
- S'appuie sur une représentation par graphe temporel (STN, DTN)
- Premiers algorithmes de filtrage et vérification temporelle (AC, PC, ...)

Planification Temporelle

Simple Temporal Network (STN)

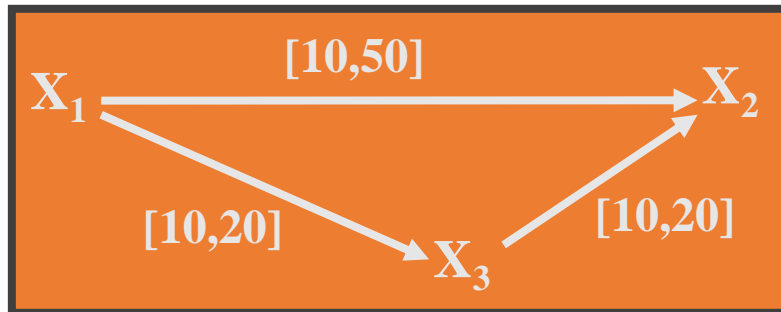
- Noeuds = Points temporel; Arcs = Durée



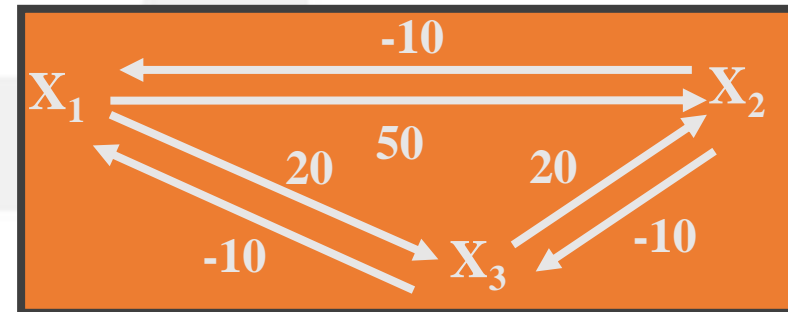
Planification Temporelle

STN est consistant s'il existe une assignation de valeurs aux instants satisfaisant toutes les contraintes temporelles

STN



Graphe de distance



Algorithme de propagation polynomial $O(n^3)$:

- Cohérence des chemins (Path consistency)
- Floyd-Warshall

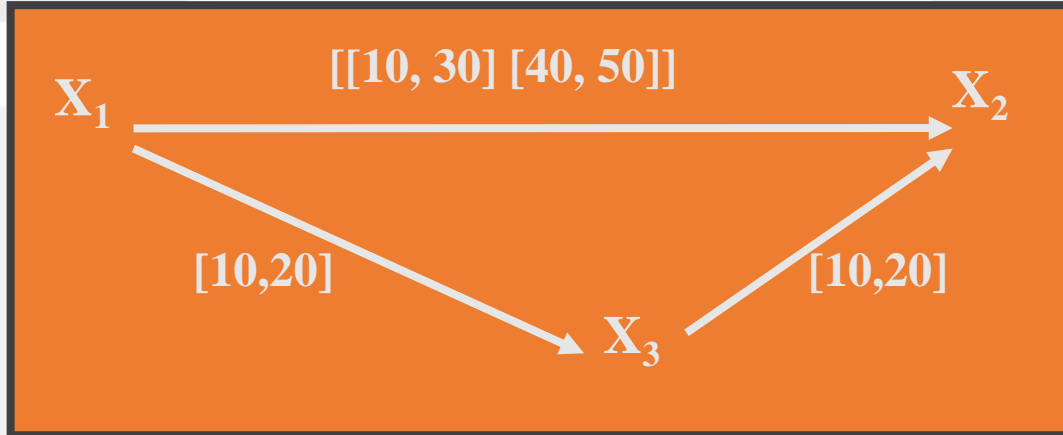


Cycle négatif = inconsistance

Planification Temporelle

Disjunctive Simple Temporal Network(DTN)

- Noeuds = Points temporel; Arcs = liste de durées



Consistence : NP-hard

Planification Temporelle : prise en compte des incertitudes dès la phase de planification

Simple Temporal Network with Uncertainty (STNU)

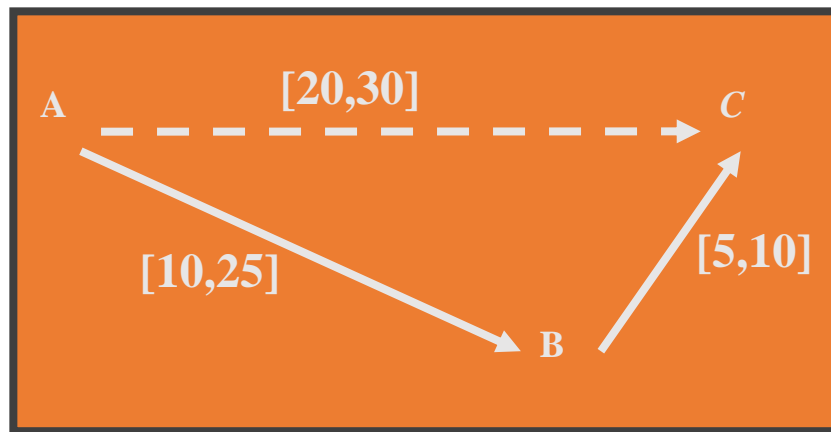
[Vidal et al., 1999, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*]

➤ Noeuds = Points temporels; Arcs = durée : **contrôlable** et **incontrôlable**

3 niveaux de contrôlabilité :

- Contrôlabilité forte (SC) : Polynomiale
- Contrôlabilité dynamique (DC) : Polynomiale
- Contrôlabilité faible (WC) : coNP-complet ?

SC ⇒ DC ⇒ WC



STNU

Planification Temporelle : prise en compte des incertitudes dès la phase de planification

3 niveaux de contrôlabilité

Contrôlabilité forte (SC): $(\exists \delta / \forall \gamma, \text{STNU}_\gamma \text{ cohérent})$

Un STNU est fortement contrôlable s'il existe une seule affectation des points temporels contrôlables δ qui rend le STNU cohérent quelles que soient les valeurs des contraintes incontrôlables γ

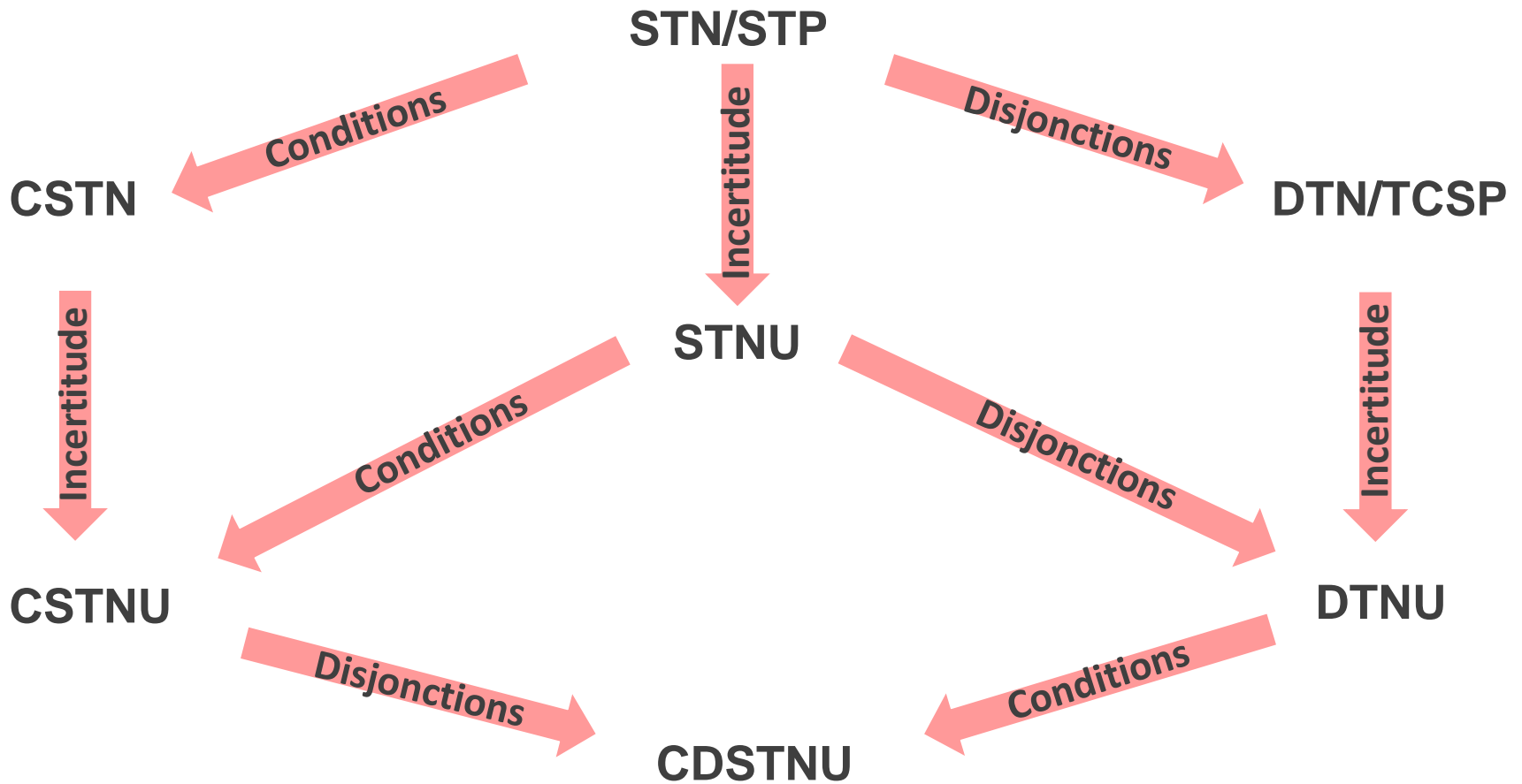
Contrôlabilité dynamique (DC): $(\forall t, \exists \delta_t / \forall \gamma_{>t}, \text{STNU}_{\gamma_{<t} \cup \gamma_{>t}} \text{ cohérent})$

Un STNU est dynamiquement contrôlable si, à tout instant t , il existe une assignation de valeurs au prochain point temporel contrôlable δ_t qui rend le STNU cohérent, quelles que soient les valeurs des contraintes non-contrôlables restantes $\gamma_{>t}$

Contrôlabilité faible (WC): $(\forall \gamma, \exists \delta / \text{STNU}_\gamma \text{ cohérent})$

Un STNU est faiblement contrôlable si, pour chaque combinaison de valeurs des contraintes contingents γ , il existe au moins une assignation de valeurs aux points temporels contrôlables δ qui rend le STNU cohérent

Planification Temporelle



Planification Temporelle

Un peu d'histoire

IxTeT (Laborie et al., 1995, IEEE) :

- Premier planificateur temporel incorporant la génération de plan et un solveur de contraintes temporelles (et de ressources)
- Utilise les STNs pour la consistance

IxTeT-eXec (Lemai et al., 2004, ICAPS) :

- Met régulièrement à jour le plan en cours d'exécution
- Répare le plan de manière réactive en cas de défaillance
- replanification incrémentale à l'arrivée de nouveaux objectifs
- Considère les DTNs et les STNUs avec la contrôlabilité dynamique

Planification Temporelle

Un peu d'histoire

Approche par recherche d'état + raisonnement temporel

PDDL2.1 (Fox & Long, 2003, Artificial Intelligence Research) :

- Extension de PDDL (Planning Domain Description Language) en PDDL2.1

CRIKEY (Hashley et al., 2004, *European Conference on Artificial Intelligence*) :

- Capable de raisonner avec des actions coordonnées
- Divise les actions durables en action de début et de fin
- Utilise les STNs
- **CRIKEY3** (Coles et al., 2008, AAI) problèmes de coordination temporelle tels que les échéances

TLP-GP (Maris et al., 2008, TIME) & LPGP (Long et al., 2003, ICAPS) :

- Basée GraphPlan avec solveur SAT ou DTN

Planification Temporelle

D'autres approches

Approche par probabilité:

- Représente les durées et les effets par des probabilités (MDP, réseau bayésien)
- Utilise PDDL2.1 ou PPDDL

Prottle (Little et al., 2005, AAI) :

- Etend PDDL2.1 pour considérer les effets probabilistes
- Utilise un graphe ET/OU pour la recherche d'état

Tempastic (Younes et al., 2004, ICAPS) :

- Limité aux problèmes déterministiques car utilise les STNs
- Génération, débogage et réparation de politiques pour la planification continue avec concurrence

Planification Temporelle

D'autres approches

Beudry et al., 2010, ICAPS :

- Approche Bayésienne qui étend l'approche forward
- Représente l'incertitude de manière continue et aléatoire (valeur numérique)
- Gère la concurrence sous incertitude temporelle

Plus récemment

ITSAT (Rankooh et al., 2015, JAIR):

- Un planificateur basé sur la satisfiabilité utilisant un solveur SAT

FAPE (Bit-Monnot et al., 2022, arXiv) :

- Considère la planification hiérarchique et la planification temporelle

Bernardini et al., 2017, Autonomous Robots :

- Planification temporelle + raisonnement probabiliste pour les véhicules autonomes lors de missions de surveillance.

1. Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. (1971). STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3-4), 189-208.
2. Blum, Avrim and Merrick L. Furst. "Fast Planning Through Planning Graph Analysis." *International Joint Conference on Artificial Intelligence* (1995).
3. J. Hoffmann. "The Metric-FF Planning System: Translating "Ignoring Delete Lists" to Numeric State Variables". In: *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)* 20 (2003)
4. V. Vidal. "YAHSP2: Keep It Simple, Stupid". In: *International Planning Competition (IPC)*. 2011
5. V. Vidal. "YAHSP3 and YAHSP3-MT in the 8th International Planning Competition". In: *International Planning Competition (IPC)*. 2014
6. Vere, S. A. (1983). Planning in time: Windows and durations for activities and goals. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (3), 246-267.
7. K. Currie and A. Tate. O-plan: the open planning architecture. *Artificial Intelligence*, 52:49{86, 1991
8. Dechter, R., Meiri, I., & Pearl, J. (1991). Temporal constraint networks. *Artificial intelligence*, 49(1-3), 61-95.
9. Vidal, T. (1999). Handling contingency in temporal constraint networks: from consistency to controllabilities. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 11(1), 23-45.
10. Lemai, S., & Ingrand, F. (2003, March). Interleaving temporal planning and execution: IxTeT-eXeC. In *Proceedings of the ICAPS Workshop on Plan Execution* (Vol. 40).

- 11.** Fox, M., & Long, D. (2003). PDDL2. 1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of artificial intelligence research*, 20, 61-124.
- 12.** Halsey, K., Long, D., & Fox, M. (2004). Multiple relaxations in temporal planning. In *16th European Conference on Artificial Intelligence*
- 13.** Coles, A., Fox, M., Long, D., & Smith, A. (2008, July). Planning with Problems Requiring Temporal Coordination. In *AAAI* (pp. 892-897).
- 14.** F. Maris and P. Régnier. “TLP-GP: Solving Temporally-expressive Planning Problems”. In: *International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME)*. 2008.
- 15.** D. Long and M. Fox. “Exploiting a Graphplan Framework in Temporal Planning”. In: *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*. 2003.
- 16.** I. Little, D. Aberdeen, S. Thiébaux, Prottle: a probabilistic temporal planner, in: *AAAI*, 2005, pp.1181–1186.
- 17.** H.L.S. Younes, R. Simmons, Policy generation for continuous-time stochastic domains with concurrency, in: *ICAPS*, 2004, pp.325–333.
- 18.** E. Beaudry, F. Kabanza, F. Michaud, Planning for concurrent action executions under action duration uncertainty using dynamically generated bayesian networks, in: *ICAPS*, 2010, pp.10–17.
- 19.** Bit-Monnot, A., Ghallab, M., Ingrand, F., & Smith, D. E. (2020). FAPE: a constraint-based planner for generative and hierarchical temporal planning. *arXiv preprint arXiv:2010.13121*.
- 20.** Bernardini, S., Fox, M., & Long, D. (2017). Combining temporal planning with probabilistic reasoning for autonomous surveillance missions. *Autonomous Robots*, 41, 181-203.



Gestion opérationnelle d'un plan sous incertitude (planification + exécution)

Planif / Ordo / Alloc

Planification de tâches

- **choisir** et placer dans le temps les actions qui vont permettre à l'agent d'atteindre un **but** donné

Ordonnancement

- **placer** dans le temps un ensemble d'opérations **connues** que doit exécuter l'agent

Allocation de ressources

- **affecter** une ressource à chaque opération, nécessaire à son exécution (ex: machine, opérateur, outil, etc)

La limite entre la planif et l'ordo

Caractéristiques communes entre les approches de planif & d'ordo

- activités / ressources
- contraintes temporels
- vérification de la consistance : temps et ressources
- le "résultat" de la résolution du problème
- les types d'incertitudes, que nous allons voir

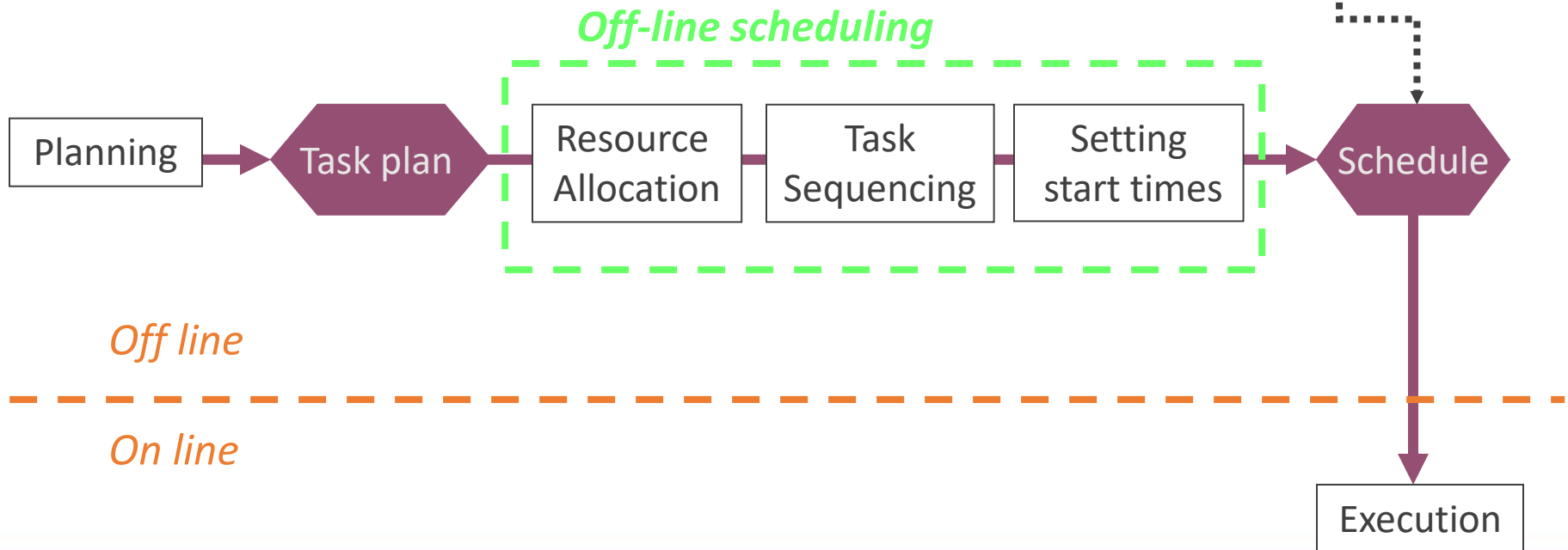
Planif/ordo sans incertitudes

Approche classique (planification et execution)

Environnement *statique*

- Planif/ordo *prédictive* (hors ligne)

Consistency ?
All time and resource constraints are satisfied



Raisonnement hors-ligne/en ligne

Raisonnement hors-ligne = ordonnancement prédictif

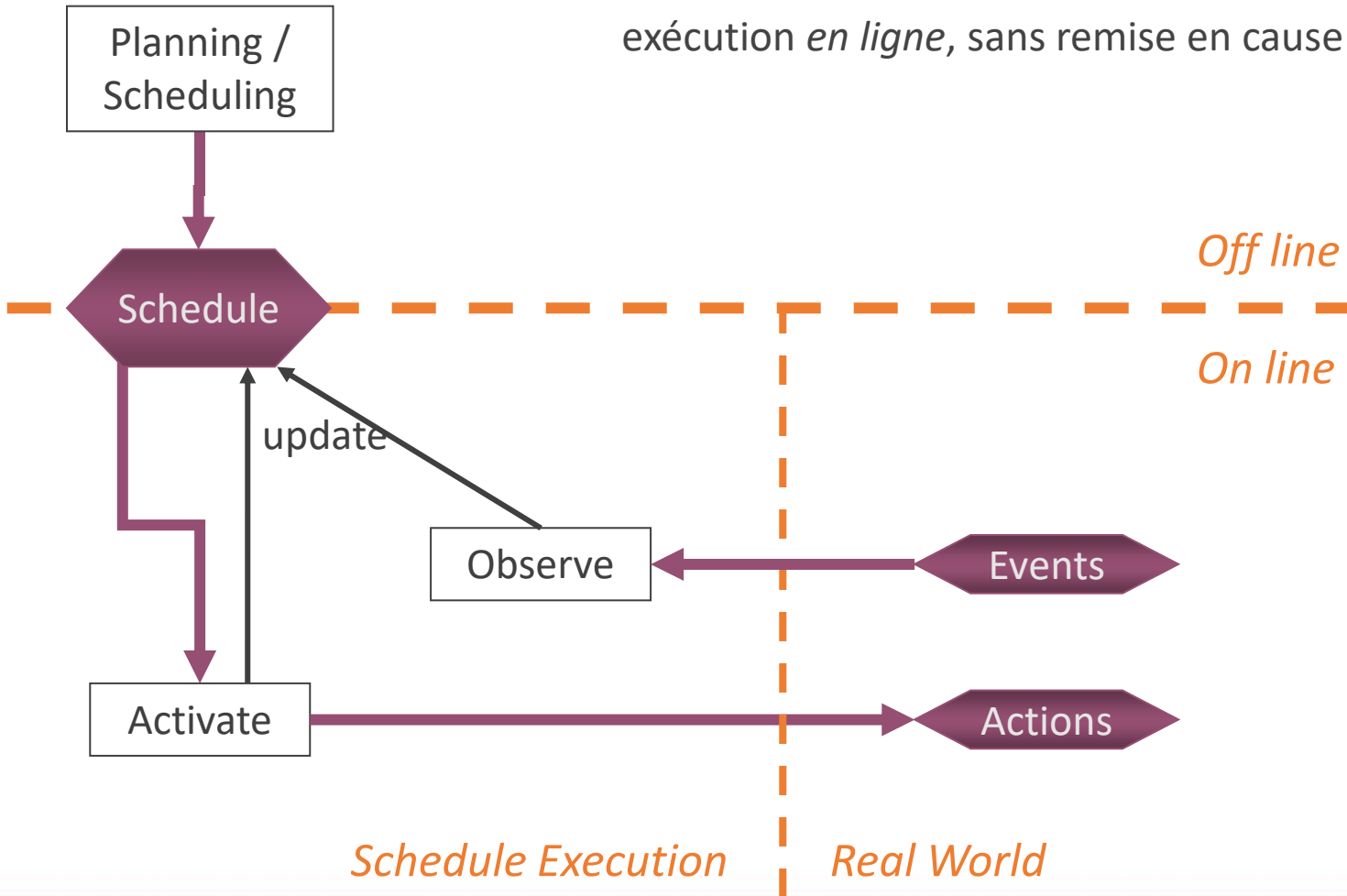
- Généralement statique
- Exécuter par le manager d'exécution

Raisonnement en ligne = simultané à l'exécution

- De nature dynamique
- Réactive aux observations
- répond à des besoins en temps réel

Exec sans incertitudes

exécution *en ligne*, sans remise en cause du plan



Exécution sous incertitude ?

L'ordonnancement prévu n'est pas toujours adapté à la situation actuelle

- Adapter l'ordonnancement en ligne ?
- Rendre l'ordonnancement plus robuste ?
- Faire un compromis entre les deux options ?

Quelques propriétés

Plan/Ordo Flexible = des alternatives sont laissées, l'arbitrage se faisant en ligne

- **Flexibilité sur les temps**
- Flexibilité sur les ordres
- Flexibilité sur les affectations
- Flexibilité sur les actions/séquences d'actions

Plan/Ordo Stable = le plan/ordo prédit hors ligne s'exécutera en ligne avec un minimum de modifications

Plan/Ordo Robuste = quoiqu'il arrive, on garantit la "qualité" de la solution qui sera effectivement exécutée

Incertitude dans la planification

Objectifs

- nouveaux besoins

Evènements

- imprévu ou délai d'occurrence variable
- l'observabilité : partiel ou non observable

Actions

- durée variable
- effet indésirables / précondition négligé :
 - ex : pour se déplacer, la batterie ne doit pas être vide !

Incertitude dans l'ordonnancement

Les durées peuvent ne pas être connues

- durées probabilistes ?

La capacité des ressources

- panne de machine
- les matières premières n'arrivent pas

L'ajout de nouvelles tâches

- tâche échouée
- nouvelle commande

Architectures intégrant planif/exec en présence d'incertitudes

Environnement *dynamique* !

Les incertitudes peuvent être

- *temporelles*, sur les *ressources*, sur *l'état du monde*

Les événements incertains (*aleas*) peuvent être

- *synchrones* (fin d'une tâche de durée incertaine, événements attendus à une date incertaine) ou *asynchrones* (peuvent survenir à tout instant...)

La génération du plan/ordo peut être

- *monotone* (pas de remise en cause du plan courant) ou *non-monotone* (révisions, destructives ou opportunistes)

Représentation de l'incertitude

Représentation par des variables !

Simple & basique : liste de valeurs possible

Probabilités : méthode bayésienne, MDP

Possibilités : des ensembles flous

Trois grandes familles d'approches

1. Approche *Réactive*

- Plan prédit hors ligne, mais remis en cause en ligne → non-monotone

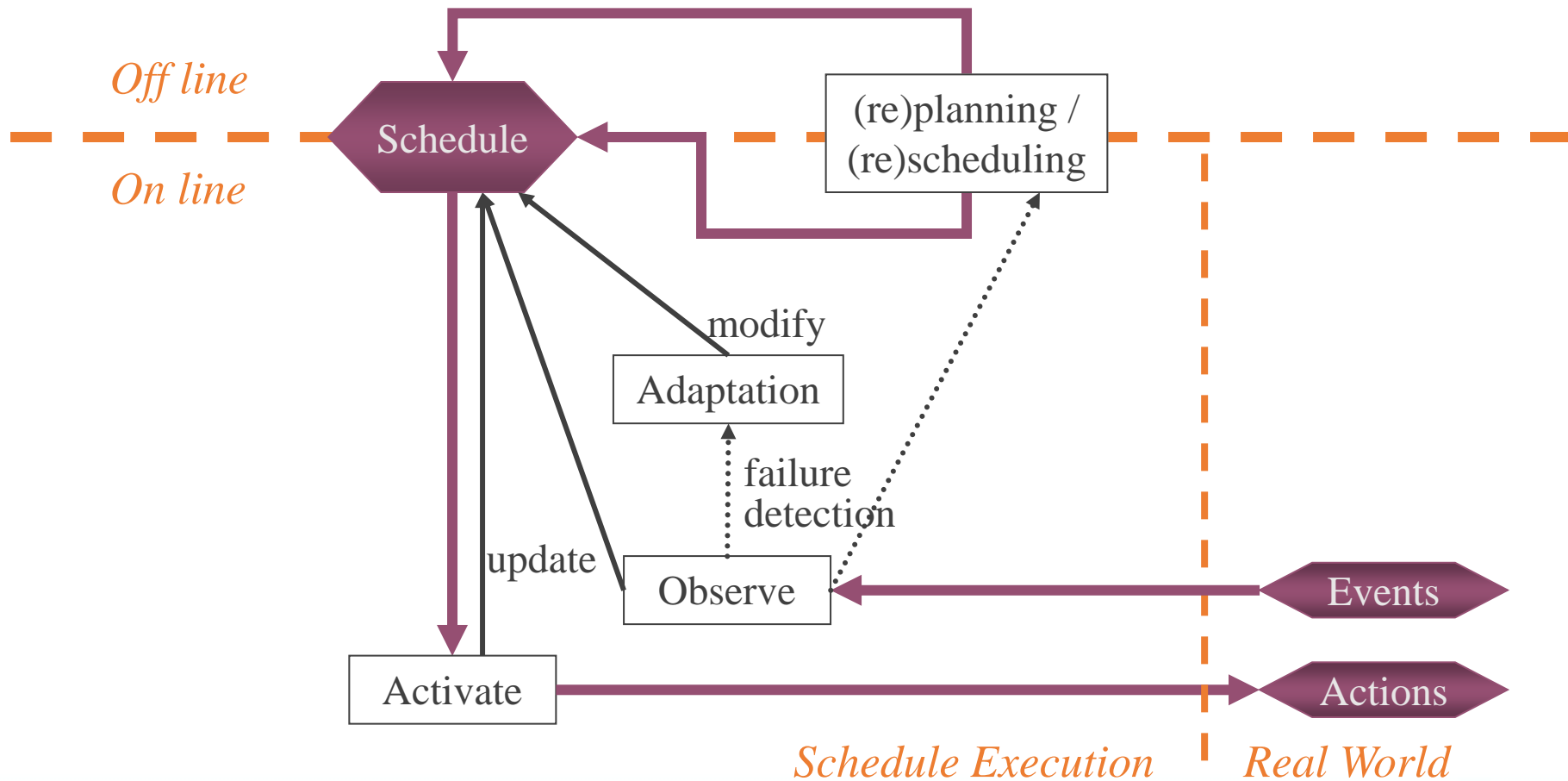
2. Approche *Progressive* : Prédiction/Exécution *en horizon glissant*

- Planif en ligne à court terme, reprise au fur et à mesure que l'exéc lève les incertitudes → monotone

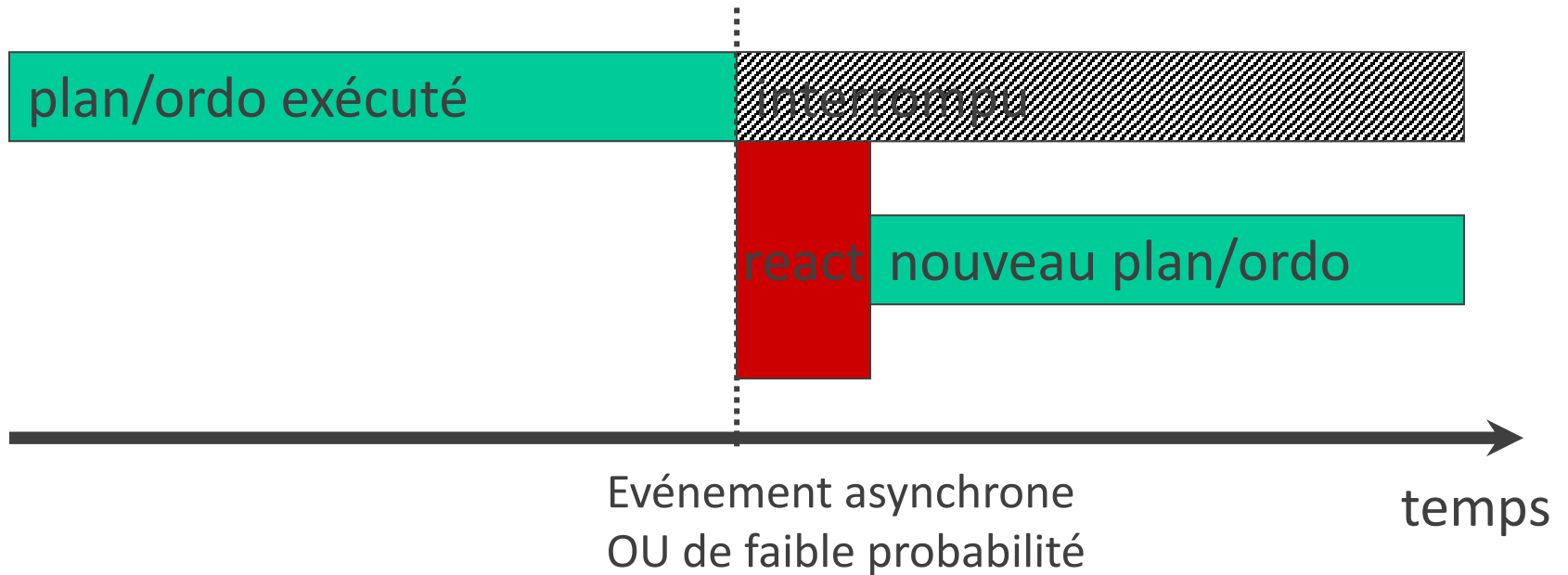
3. Approche *Proactive*

- Plan construit hors ligne en intégrant les connaissances sur les incertitudes → bien adapté aux évts synchrones...

1. Reactive: system architecture



1. Réaction

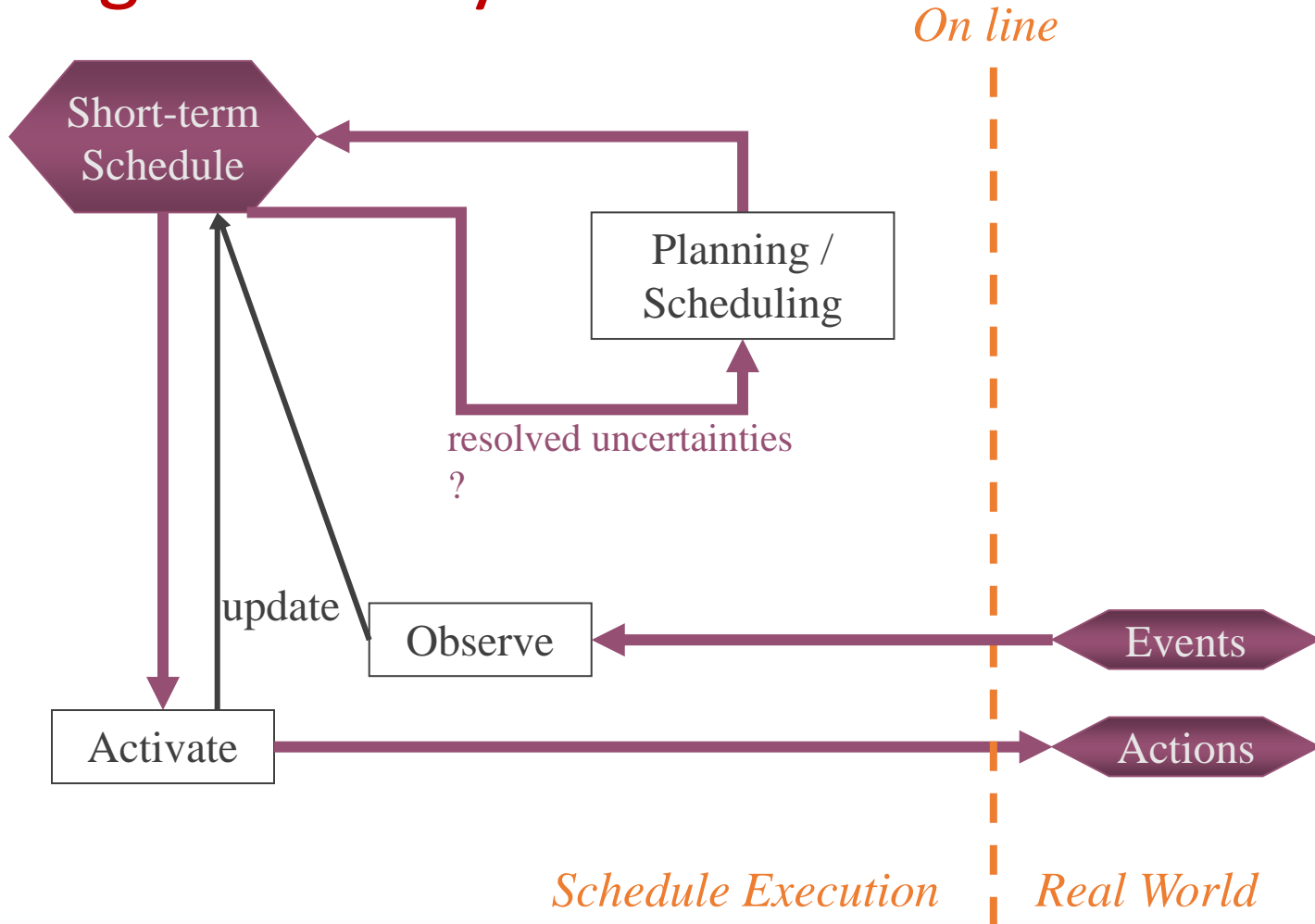


Besoin de **décision** *très rapide* \Rightarrow en général *sous-optimal*

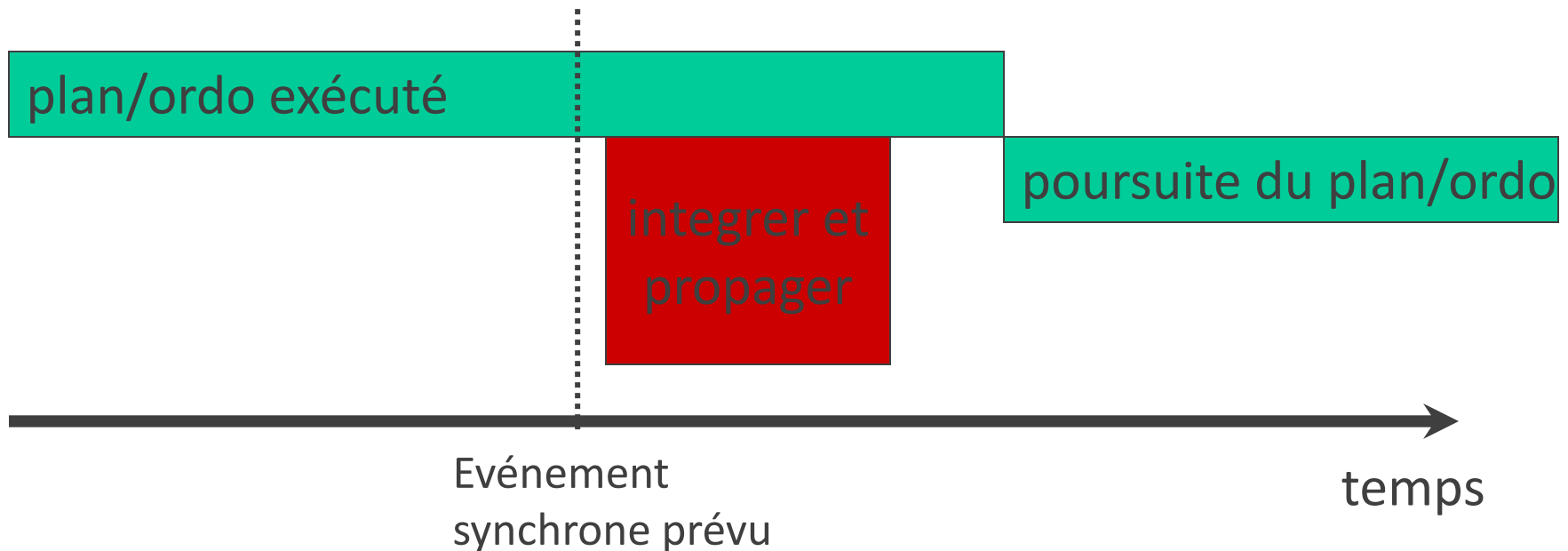
➤ ne doit pas être trop fréquent...

Besoin en **mémoire** *faible*

2. Progressive: system architecture



2. Progressif en ligne (horizon glissant)



*Plus de temps pour **décider** \Rightarrow peut être *optimal**

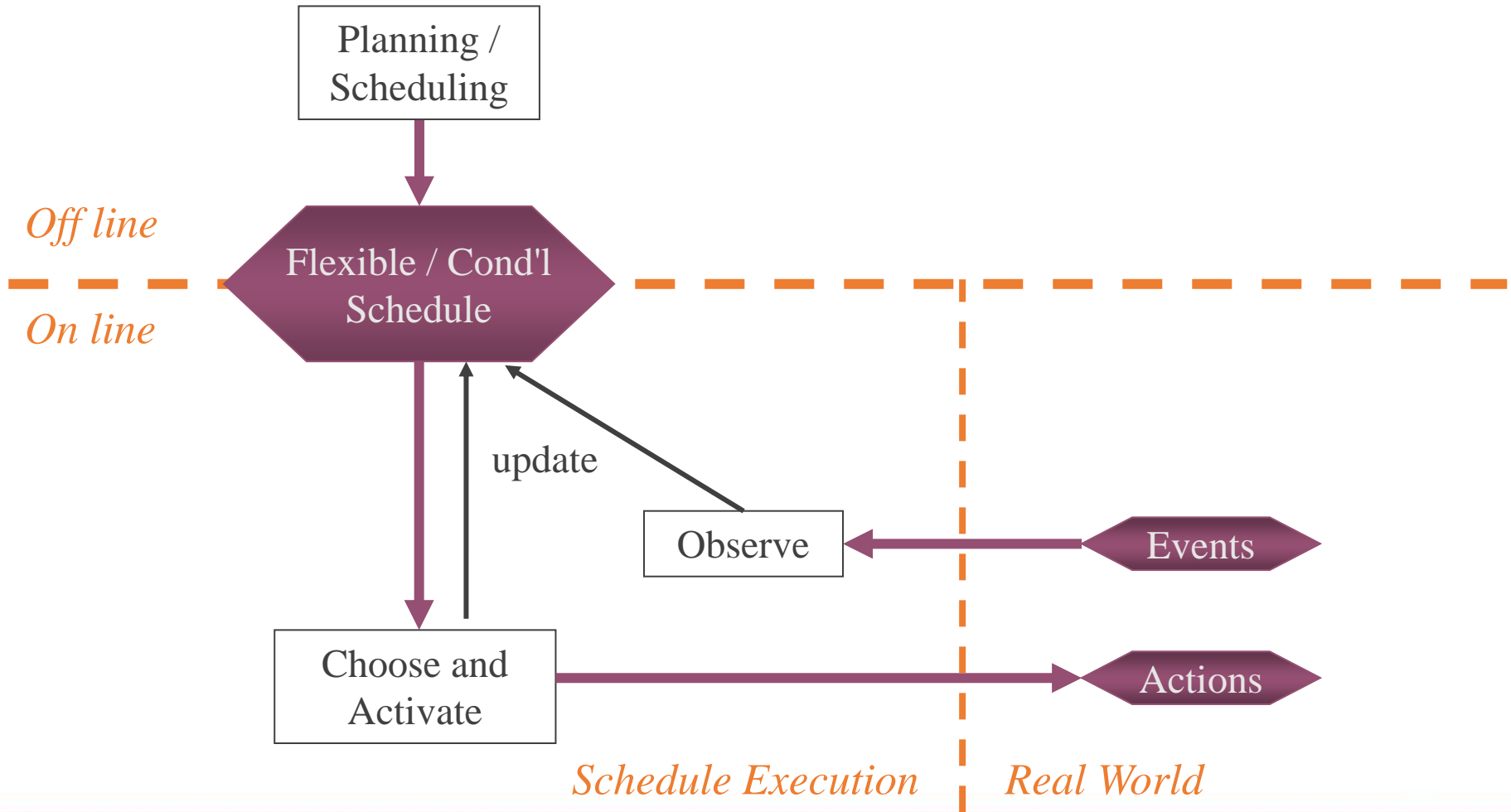
➤ ne doit pas être trop fréquent...

Besoin en **mémoire faible**

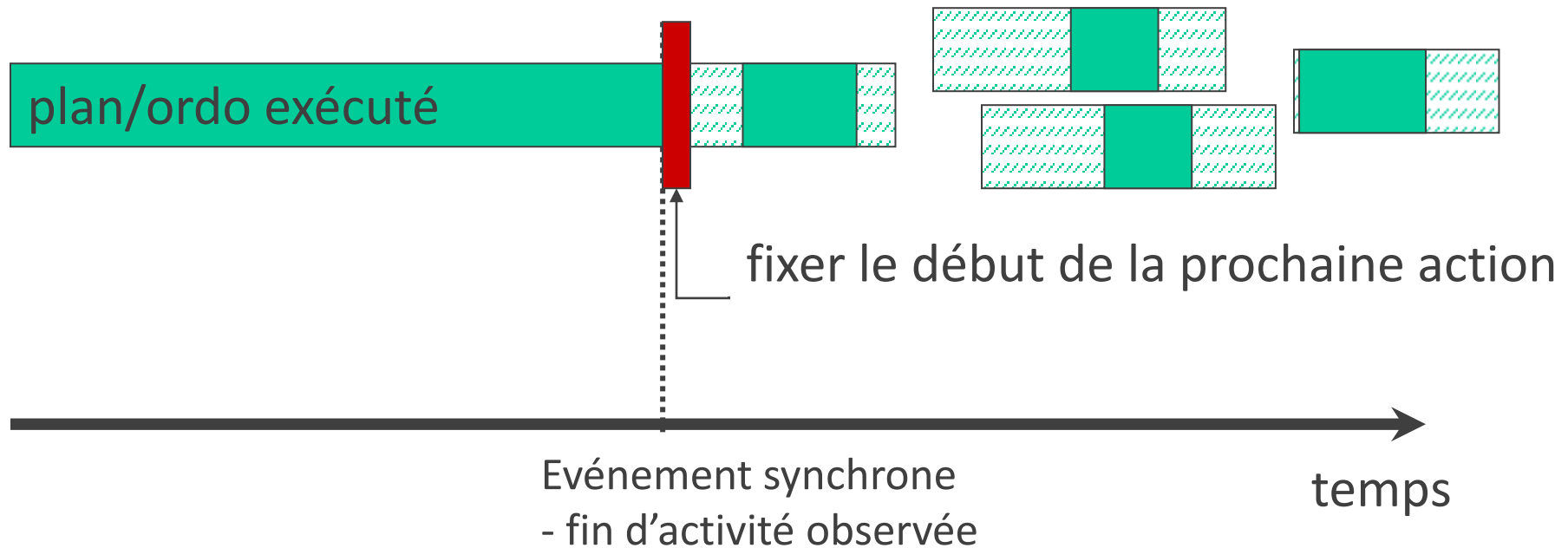
Proactivité: trois sous-familles...

- 1. Approche complète** : calcul d'un plan/*ordo rigide prédictif* couvrant le plus grand nombre de cas
 - objectif de stabilité + modélisation proba ou floue
- 2. Approche flexible** : ajout de *flexibilité sur les temps, les ordres, et/ou les affectations*
 - plans/ordos contenant des *indéterminations*
- 3. Approche conditionnelle** : ajout de *flexibilité sur les actions/séquences d'actions possibles*
 - plans/ordos contenant des *branches conditionnelles*

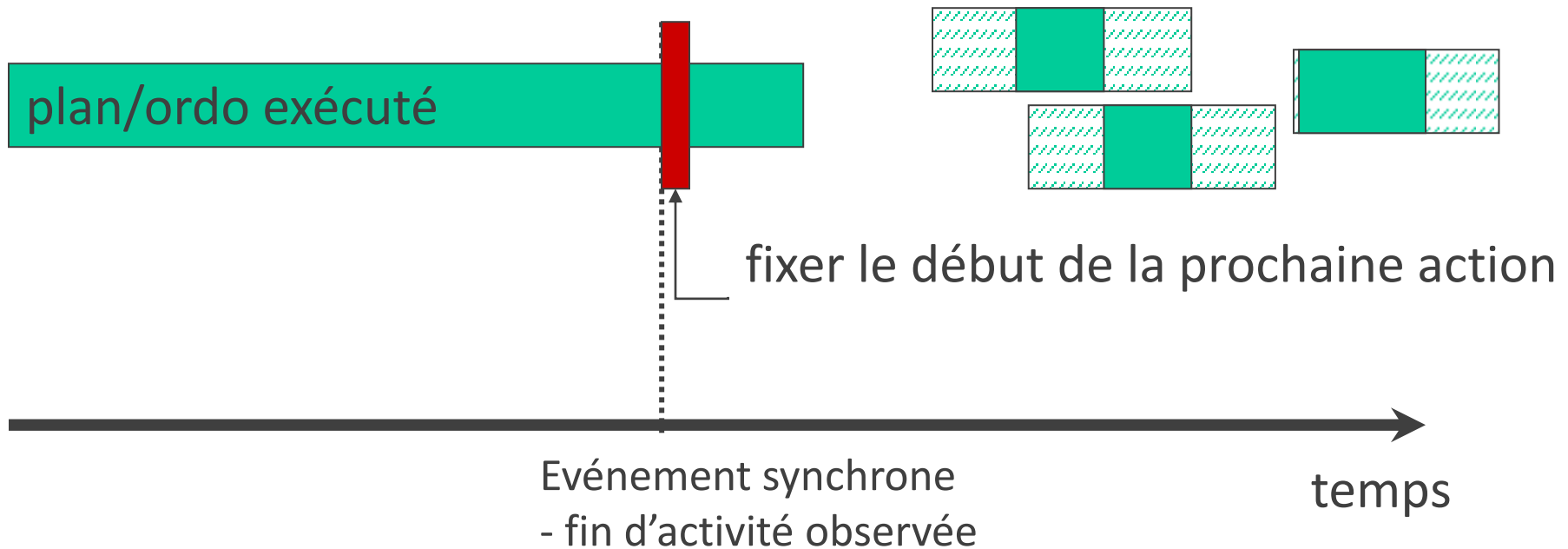
Proactive: system architecture



3b. Proactive (flexibilité sur les temps)



3b. Proactive (flexibilité sur les temps)

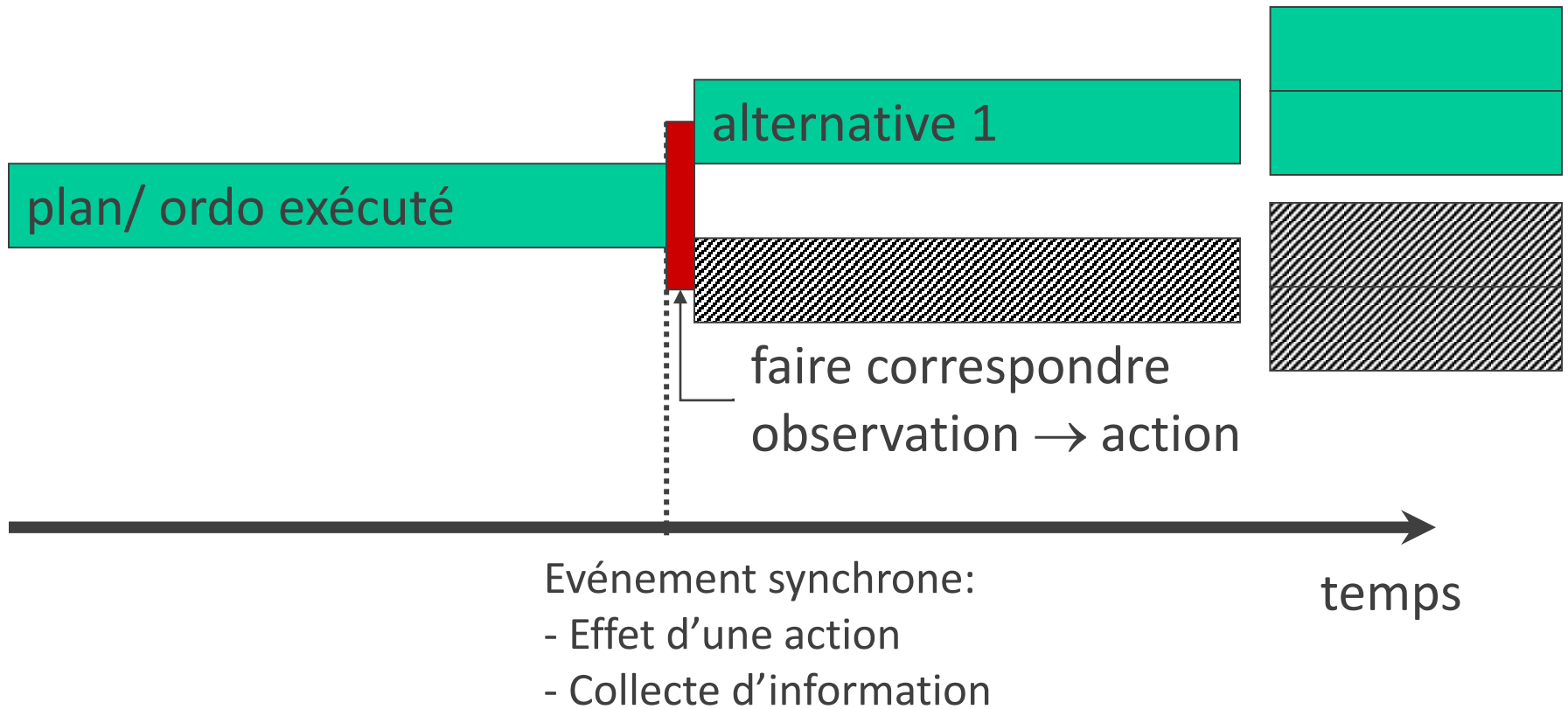


Décision *rapide* + à des instants prédéterminés

Ajouter de la flexibilité peut *restreindre* l'**optimalité**...

Besoin en **mémoire** *faible*

3c. Proactive (branches conditionnelles)



Décision *rapide* + à des instants prédéterminés

Optimal

Besoin en **mémoire élevée**

1. Bidot, J., Vidal, T., Laborie, P., & Beck, J. C. (2009). A theoretic and practical framework for scheduling in a stochastic environment. *Journal of Scheduling*, 12, 315-344.

ICAPS Tutorial, Trento, Italy, June 10, 2003 : Practical Approaches to Handling Uncertainty in Planning & Scheduling de T. Vidal et J.C Beck

2. Troesch, M., Chien, S., Chao, Y., Farrara, J., Girton, J., & Dunlap, J. (2018). Autonomous control of marine floats in the presence of dynamic, uncertain ocean currents. *Robotics and Autonomous Systems*, 108, 100-114. c → Une approche **proactive** et une approche **progressive**

3. Chi, W., Chien, S., & Agrawal, J. (2020, June). Scheduling with complex consumptive resources for a planetary rover. In *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling* (Vol. 30, pp. 348-356). → Une approche **proactive**

4. Li, G., Xing, L., & Chen, Y. (2017). A hybrid online scheduling mechanism with revision and progressive techniques for autonomous Earth observation satellite. *Acta astronautica*, [140](#), [308-321](#). → Une approche **réactive** + **progressive**

5. P. Lou, Q. Liu, Z. Zhou, H. Wang and S.X. Sun, Multi-agent-based **proactive–reactive** scheduling for a job shop, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*

6. Heydari, M., & Soudi, A. (2016). **Predictive/reactive** planning and scheduling of a surgical suite with emergency patient arrival. *Journal of medical systems*, 40, 1-9.

7. Patel, R., Rudnick-Cohen, E., Azarm, S., Otte, M., Xu, H., & Herrmann, J. W. (2020, May). Decentralized task allocation in multi-agent systems using a decentralized genetic algorithm. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 3770-3776). IEEE.



Planification temporelle multi-agent

Planification temporelle multi-agent

C'est quoi ?

Systeme :

- Plusieurs agent
- Agents homogène ou hétérogène (action, capacité)
- Agents peuvent avoir des autorités différentes

2 problématiques

1ère: Architecture centralisé

- Un objectif commun à résoudre
- Un seul plan global

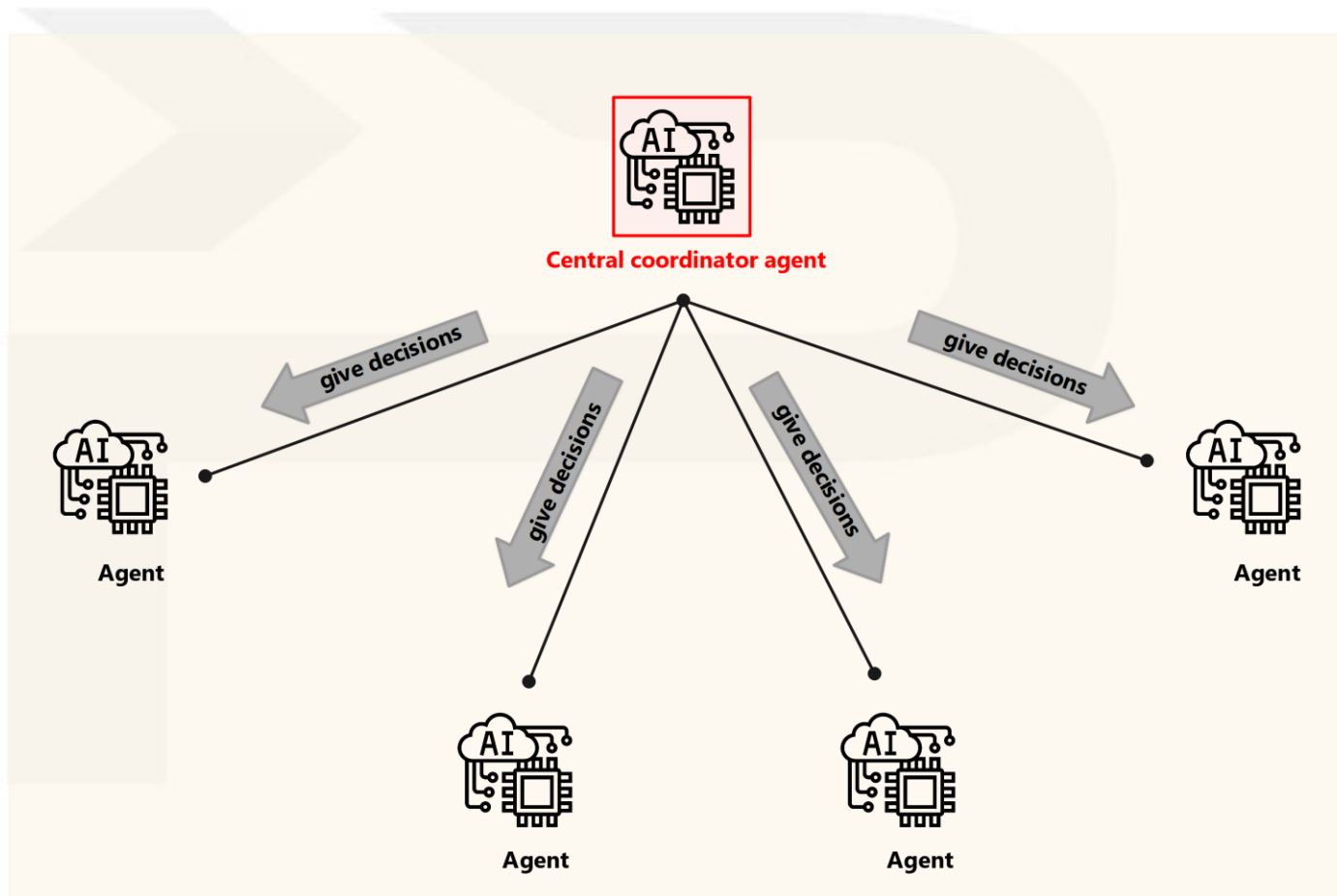
2ème: Architecture décentralisé

- Des objectifs privés et globaux à résoudre
- Chaque agent à son plan

Communication : globale ou partielle

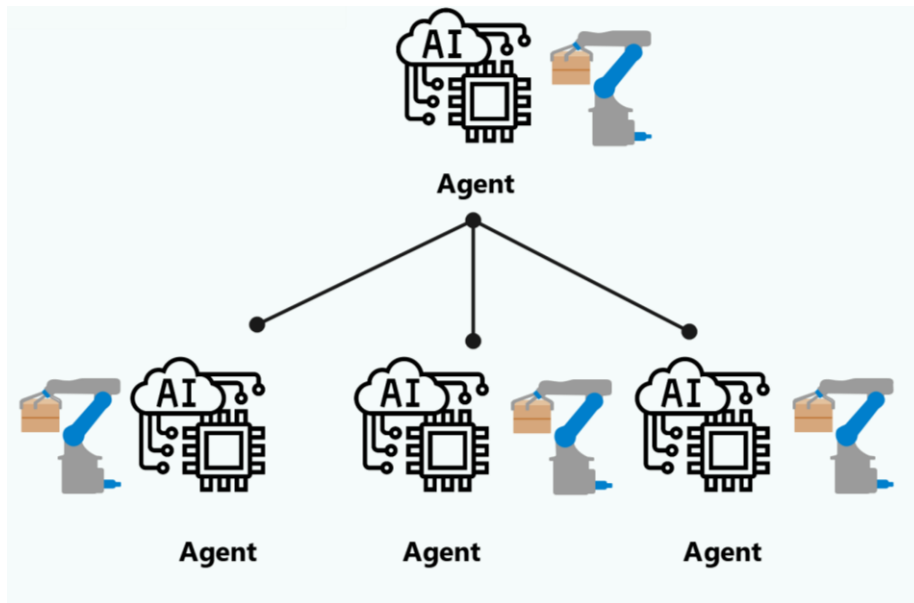
Planification temporelle multi-agent

Architecture centralisée

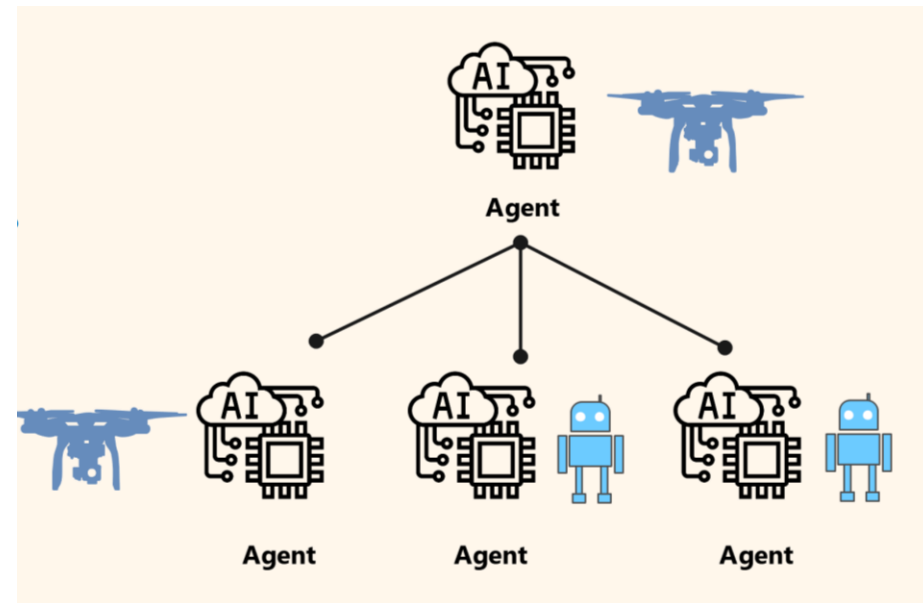


Planification temporelle multi-agent

Architecture centralisée



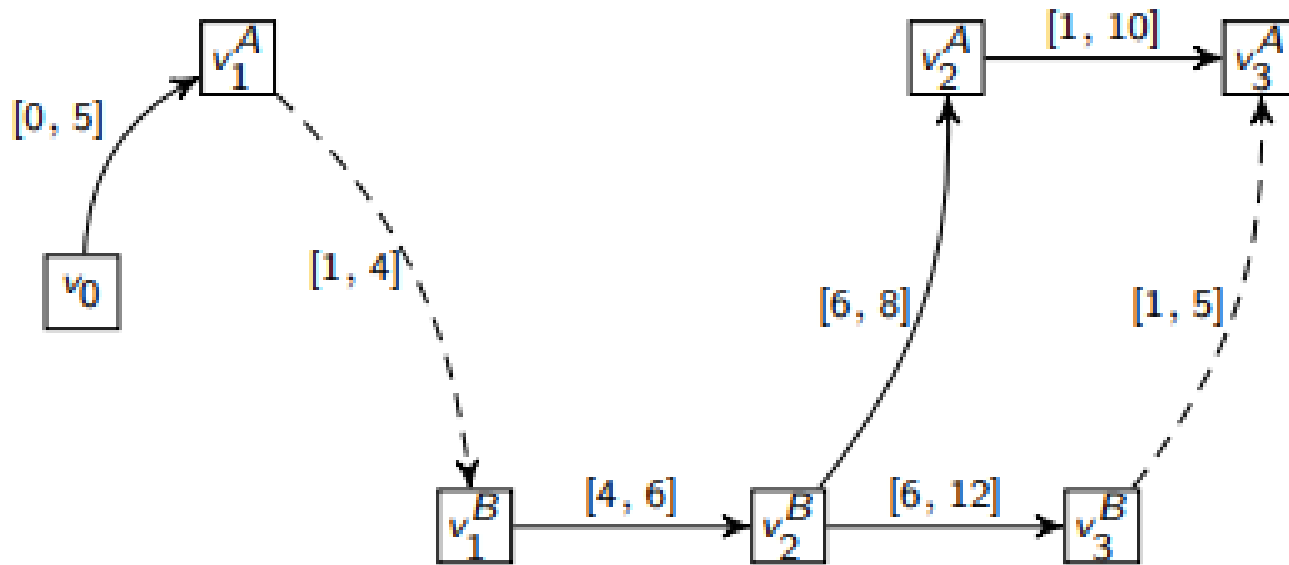
homogène



hétérogène

Planification temporelle multi-agent

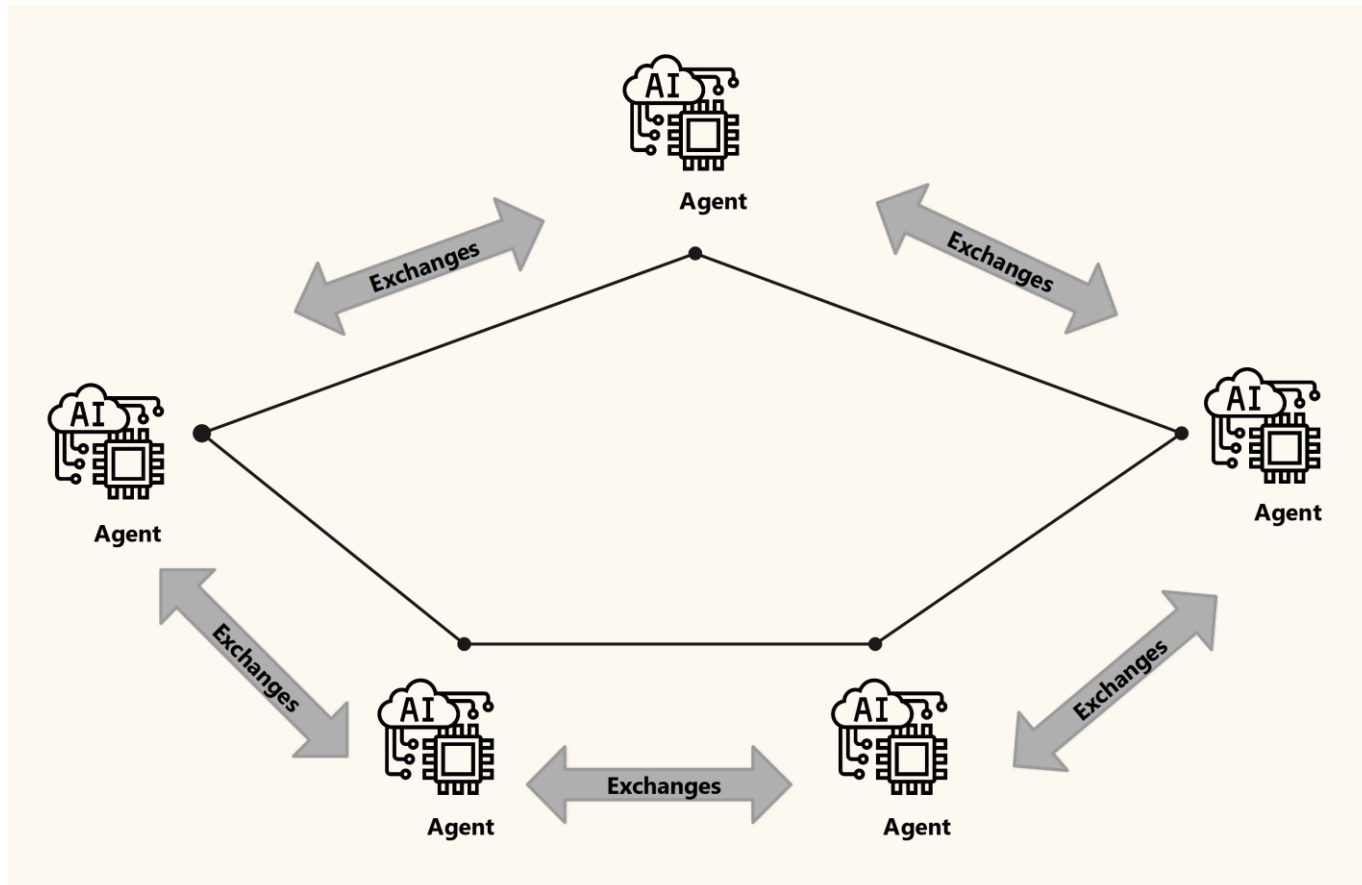
Exemple : MaSTNU (Casanova et al., 2016, ECAI)



- Points temporels partagés
- Exécution centralisé (V_0)

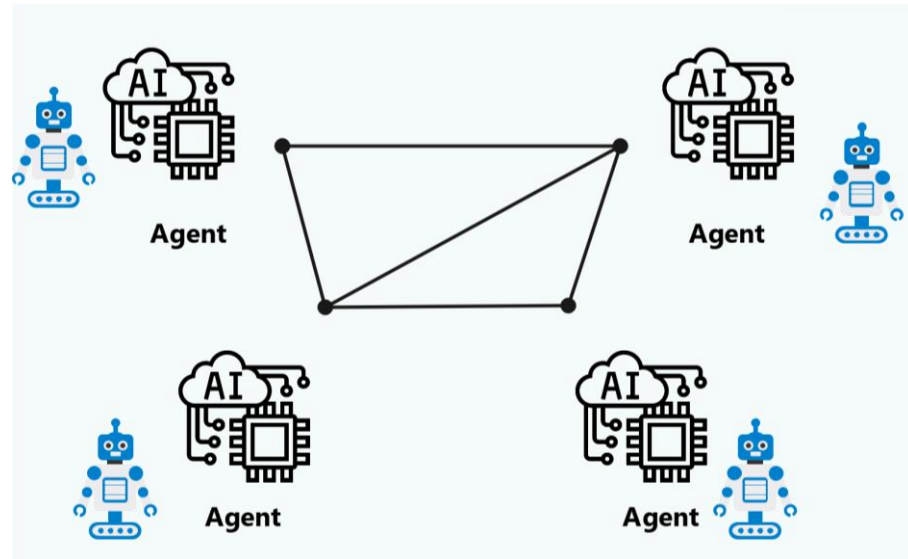
Planification temporelle multi-agent

Architecture décentralisée

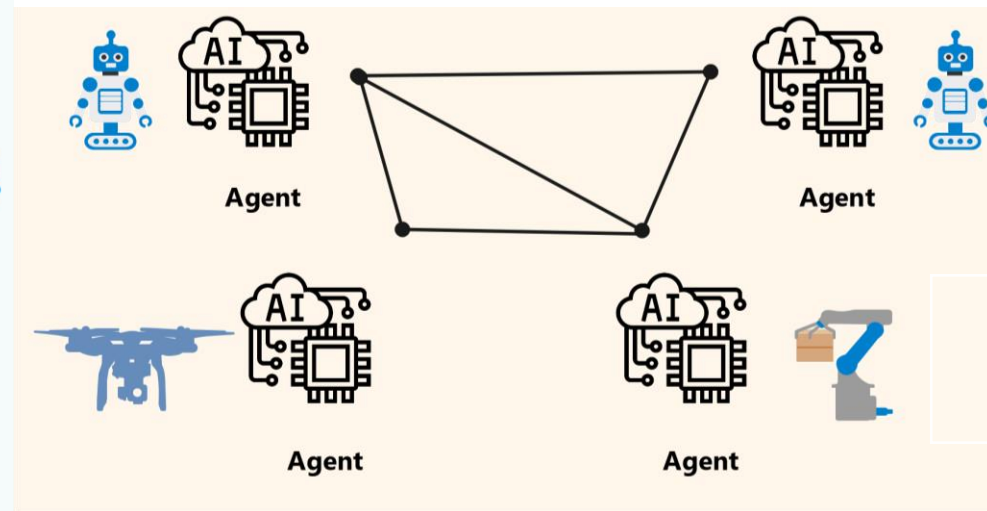


Planification temporelle multi-agent

Architecture décentralisée



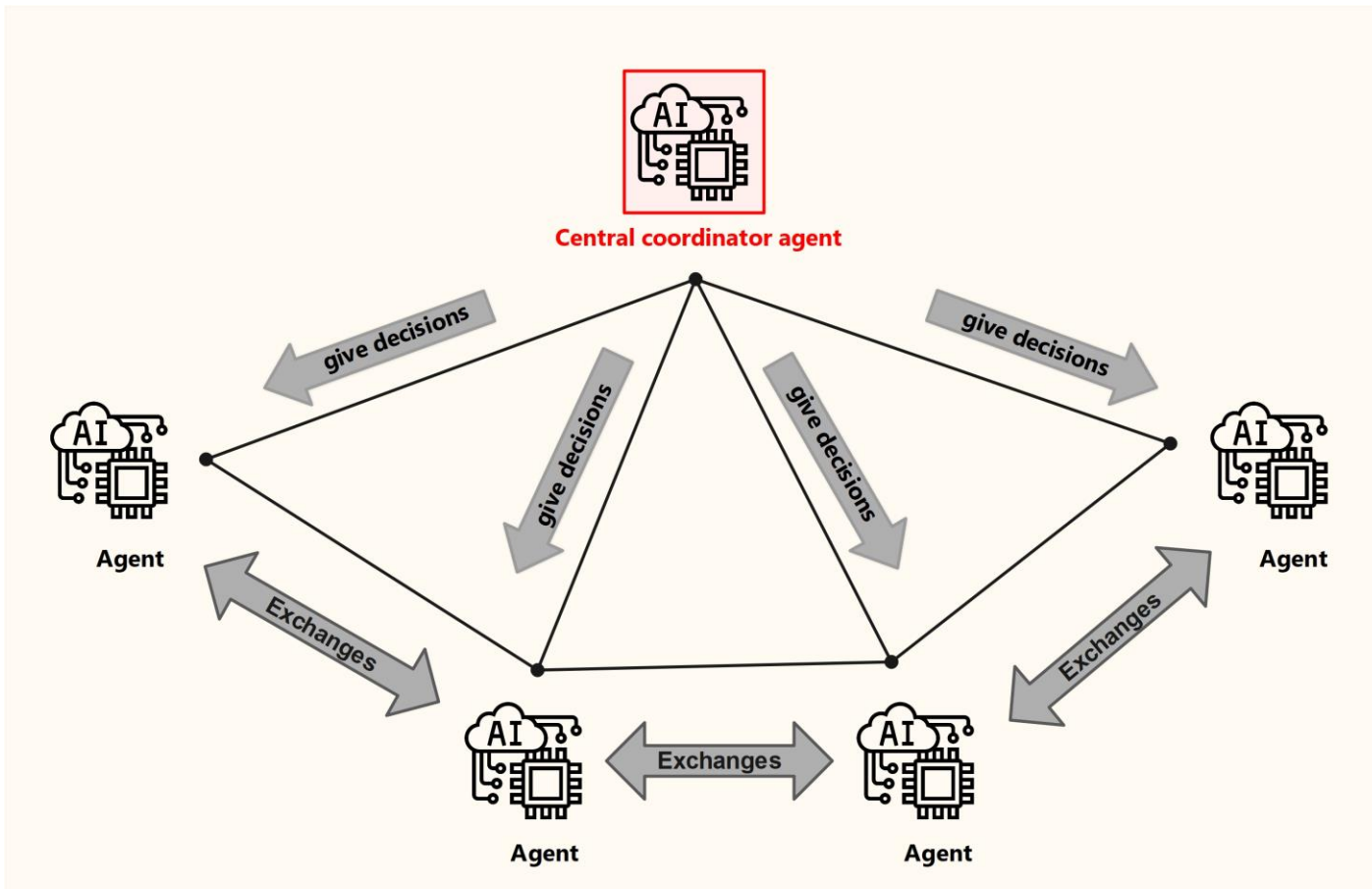
homogène



hétérogène

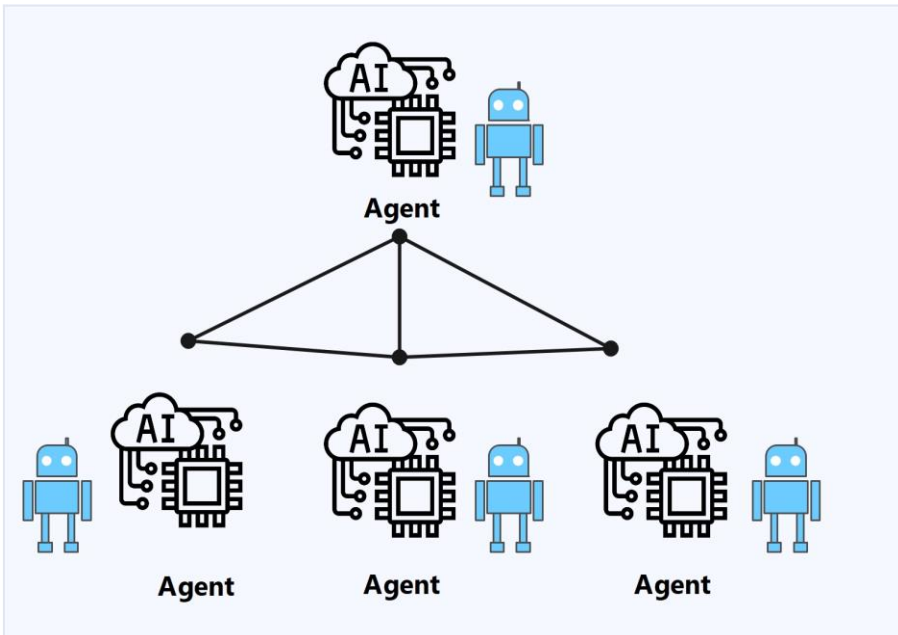
Planification temporelle multi-agent

Architecture semi-centralisée

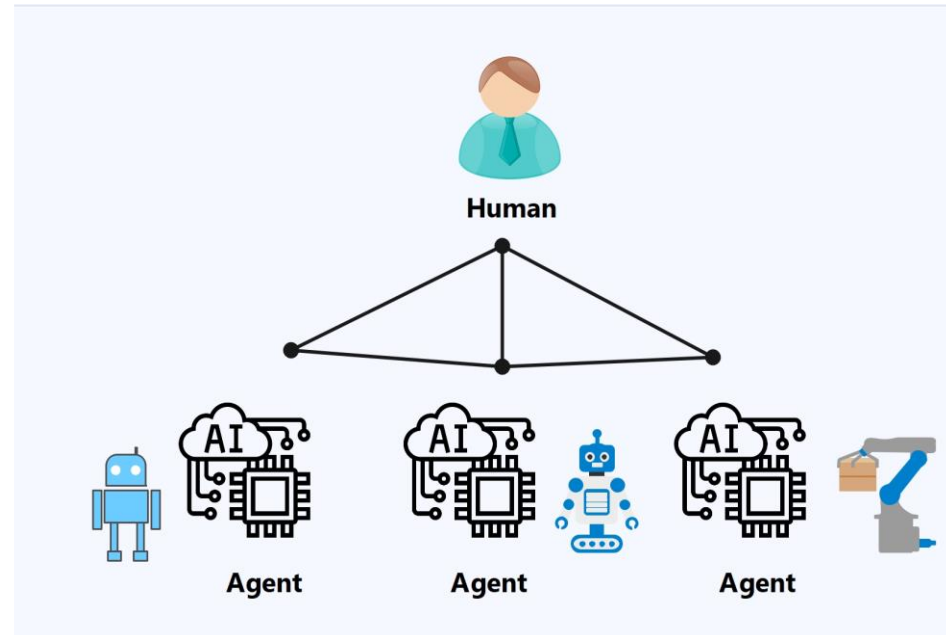


Planification temporelle multi-agent

Architecture semi-centralisée



homogène



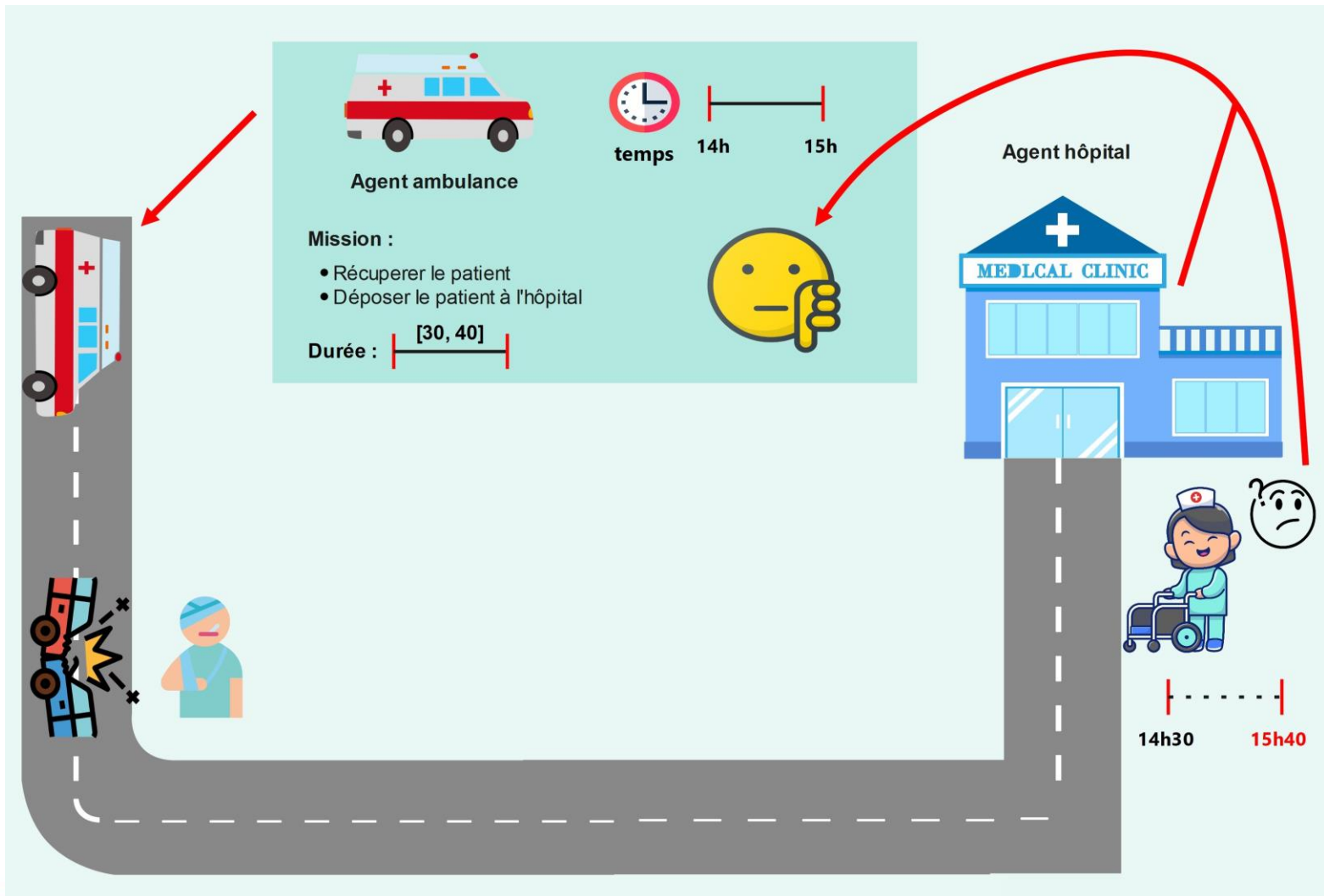
hétérogène

Planification temporelle multi-agent

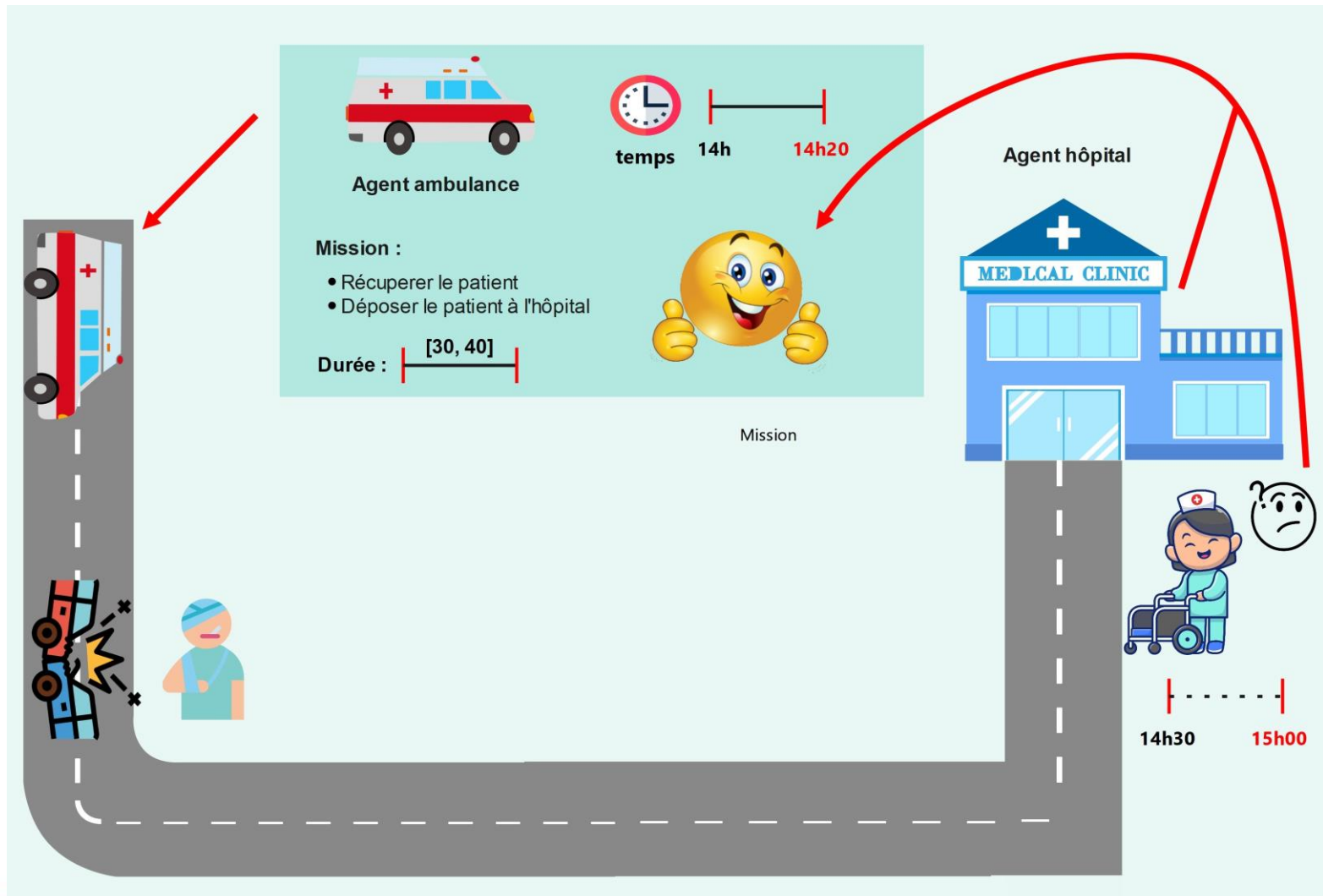
Incertitudes système **decentralisée**

- Incertitudes Temporelles
- Incertitudes sur les ressources
- Incertitudes sur l'état du monde
- **Incertitudes des agents**

Planification temporelle multi-agent : Exemple

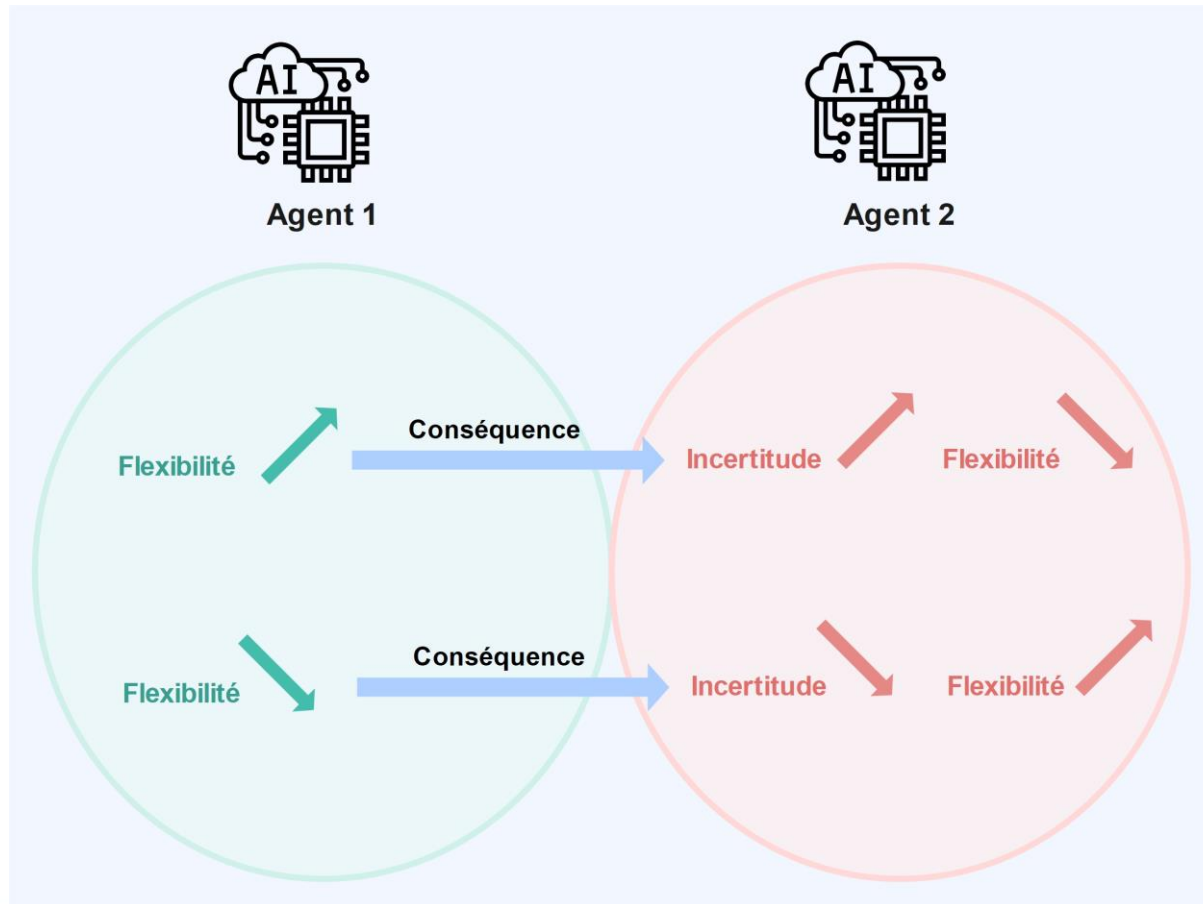


Planification temporelle multi-agent : Exemple



Planification temporelle multi-agent

Flexibilité Temporelle MAS



Planification temporelle multi-agent

Flexibilité temporelle d'un plan

Permet de connaître la capacité d'un plan à être facilement remaniable en cas d'incertitudes

Pertinent :

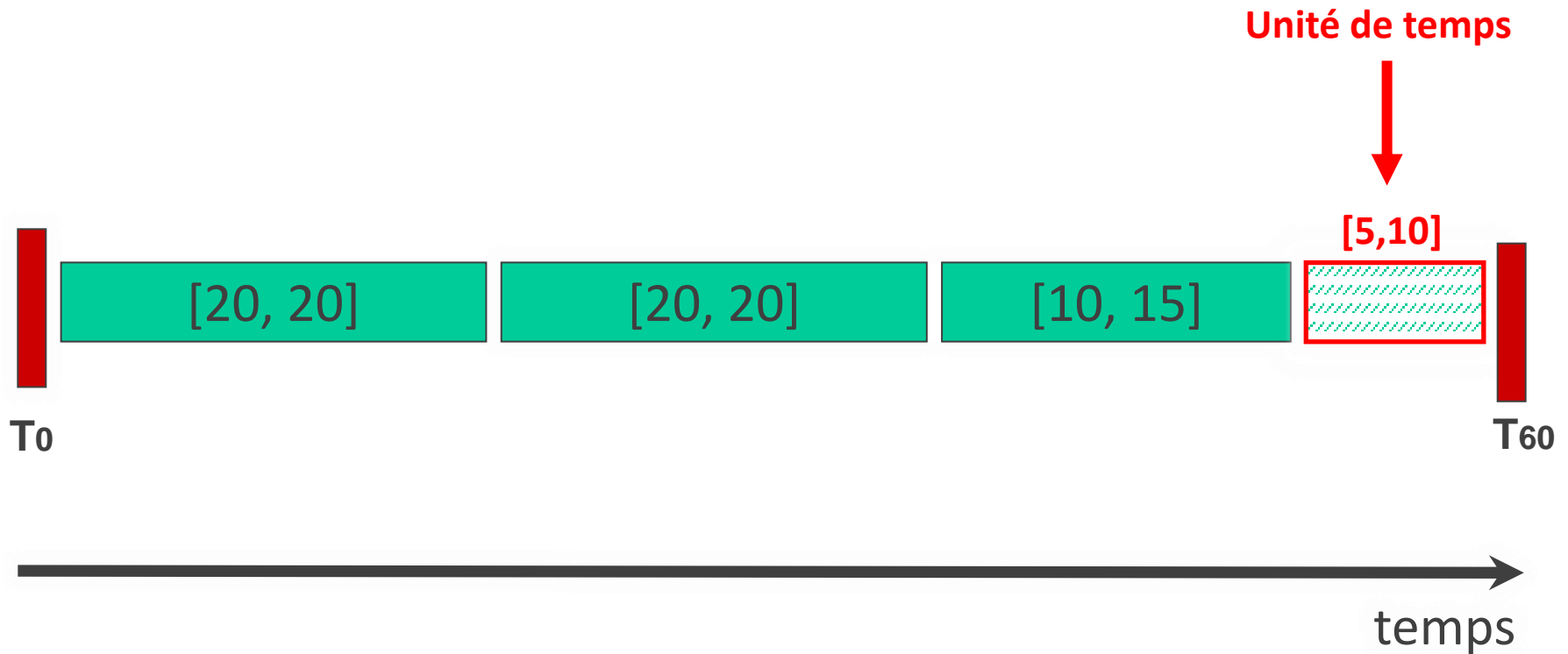
- Incertitudes temporelles
- Contexte multi-agent

2 types de flexibilité temporelle :

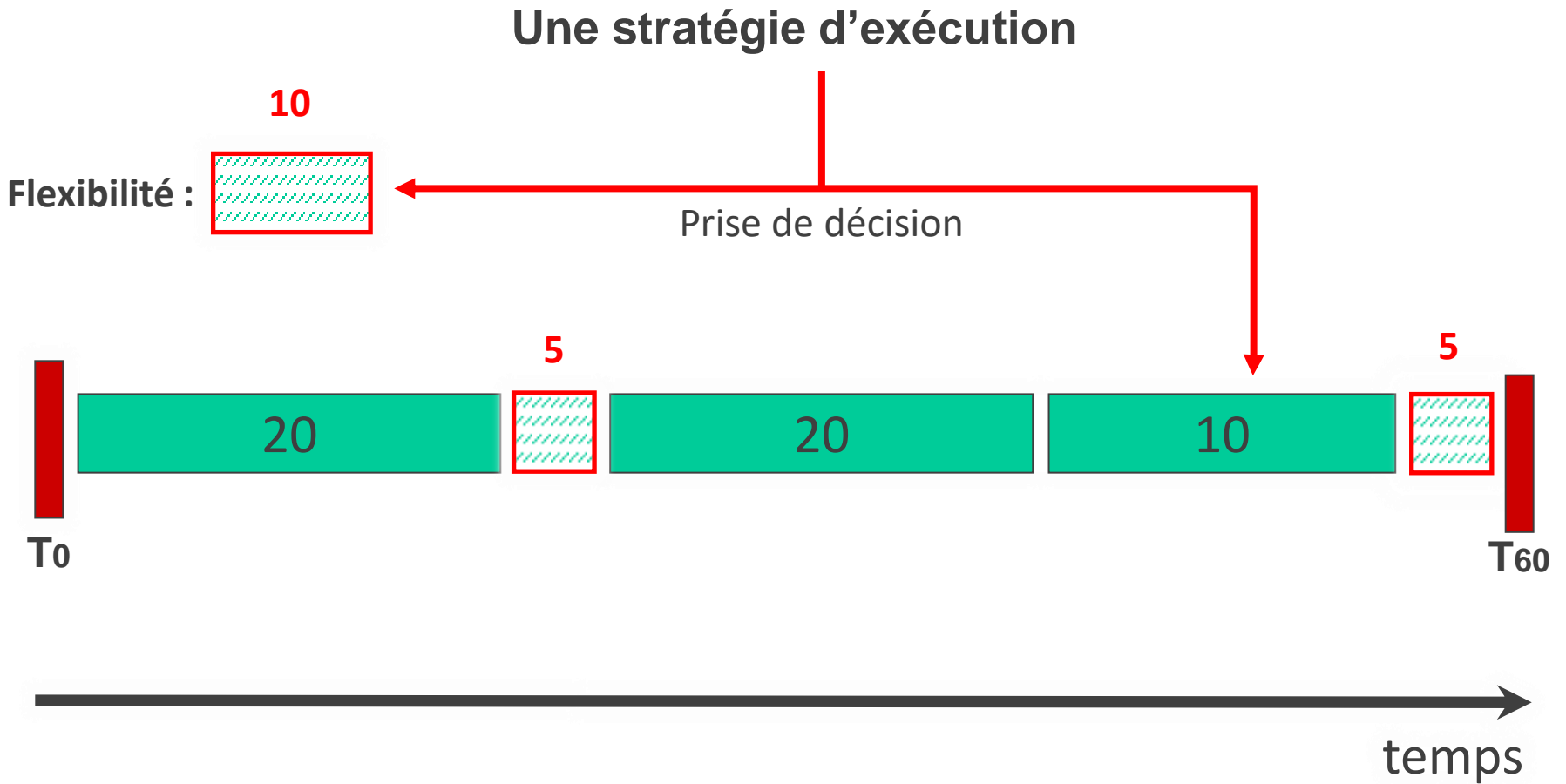
- La flexibilité locale
 - La flexibilité globale
- Indépendant**

Planification temporelle multi-agent

Flexibilité d'un agent avant exécution



Planification temporelle multi-agent



Planification temporelle multi-agent

Partage de flexibilité (temporelle)

Dans quel cas :

- Actions/Événements **partagés**
- Instants temporels **partagés**

Pourquoi :

- Pour **recupérer** ou **donner** de la flexibilité

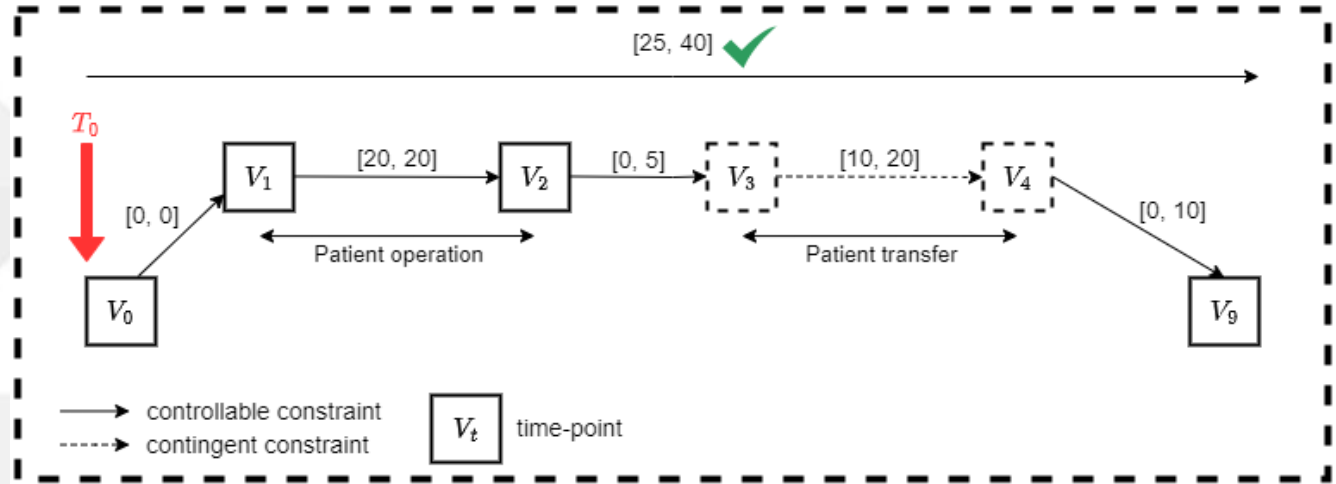
Comment :

- **Négociation** entre agent

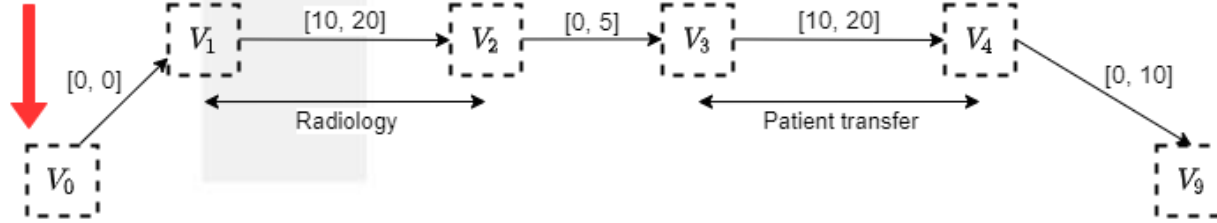
Planification temporelle multi-agent



Hôpital A



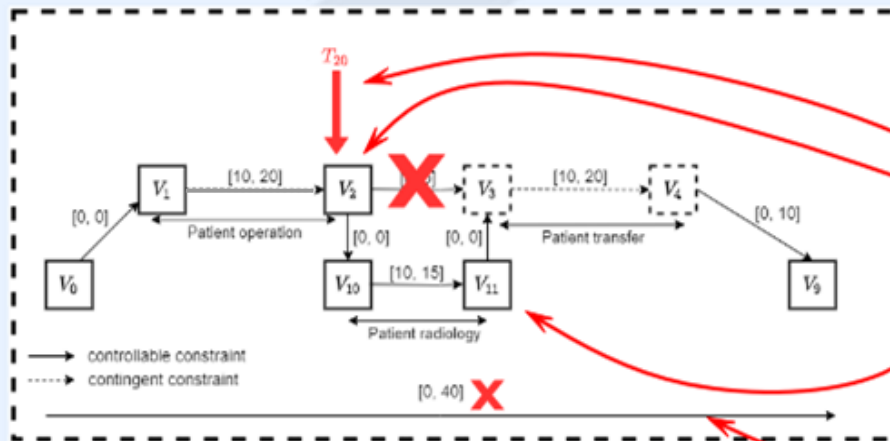
T_{20}



Hôpital B

Planification temporelle multi-agent

Step 1: Uncontrollable event plan A



current situation

- $T = 20$ time unit
- Operation failed **V2**
- **Adding radiology**
- **Unsatisfied constraint**

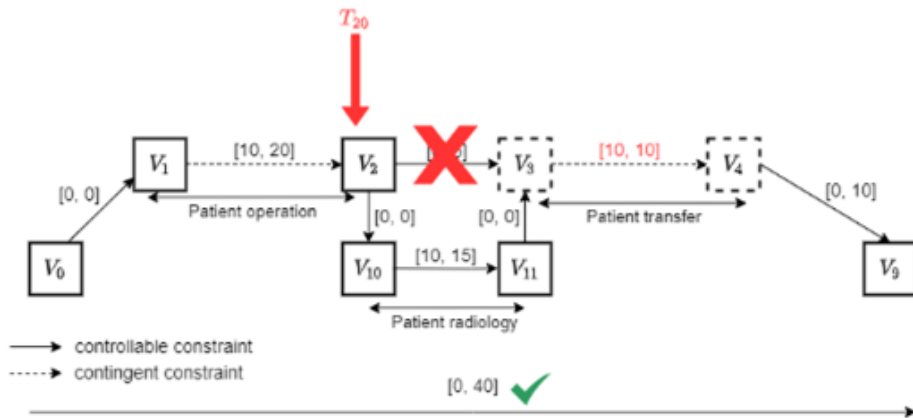
Solution

- Reduce **V3 V4**
- start communication with **hospital B**

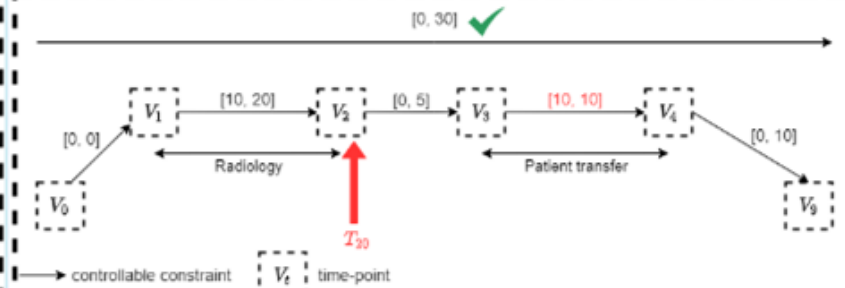


Planification temporelle multi-agent

Step 3: Replanning both plan



plan A



plan B

Planification temporelle multi-agent

Partage de flexibilité (temporelle)

Attention:

- Replanification partielle
- Pas toujours suffisant
- Besoin de replanification totale du plan



Approches de négociation :

- Approches basées sur les économies/auction (CNP, CBBA)
- Approches basées théorie des jeux (équilibre de Nash)

1. Briand, C., Ourari, S., & Bouzouiai, B. (2008, June). A Cooperative Approach for Job Shop Scheduling under Uncertainties. In *CDM* (pp. 5-15).
2. Agnetis, A., Briand, C., Billaut, J. C., & Šůcha, P. (2015). Nash equilibria for the multi-agent project scheduling problem with controllable processing times. *Journal of Scheduling*, 18, 15-27.
3. Posenato, R., & Combi, C. (2022). Adding flexibility to uncertainty: Flexible simple temporal networks with uncertainty (FTNU). *Information Sciences*, 584, 784-807.
4. Torreno, A., Onaindia, E., & Sapena, O. (2014). FMAP: Distributed cooperative multi-agent planning. *Applied Intelligence*, 41, 606-626.
5. Shah, J., Conrad, P., & Williams, B. (2009, October). Fast distributed multi-agent plan execution with dynamic task assignment and scheduling. In *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling* (Vol. 19, pp. 289-296).
6. Collins, J., Ketter, W., & Gini, M. (2002). A multi-agent negotiation testbed for contracting tasks with temporal and precedence constraints. *International Journal of Electronic Commerce*, 7(1), 35-57
7. Ennigrou, M., & Ghédira, K. (2008). New local diversification techniques for flexible job shop scheduling problem with a multi-agent approach. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 17, 270-287.



Merci de votre attention