

Approche individu-centrée appliquée au trafic routier



Author : Jules Bompard

International Master Robotics and Transport

Qu'est-ce que c'est ?



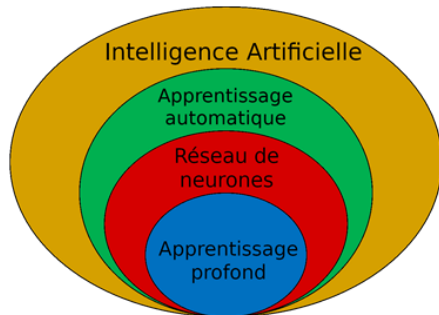
- **Concept difficile à définir !**
- Définition cognitive vs Définition comportementale
- "La tentative nouvelle et passionnante d'amener les ordinateurs à penser... d'en faire des machines dotées d'un esprit au sens le plus littéral." (Haugeland, 1985)
- "L'étude des facultés mentales grâce à des modèles informatiques." (Charniak et McDermott, 1985)
- "L'étude des moyens à mettre en œuvre pour faire en sorte que des ordinateurs accomplissent des choses pour lesquelles il est préférable de recourir à des personnes pour le moment." (Rich et Knight, 1991)
- **Effet IA** : "L'IA, c'est tout ce qui n'a pas encore été fait."

Objectif : Déterminer si une IA est capable de "raisonner" comme un humain.

- Un ensemble de juges humains - Une IA - Un humain
- Les juges interagissent textuellement avec l'humain et l'IA
- Si plus de la moitié des juges ne peuvent différencier les deux, le test est passé



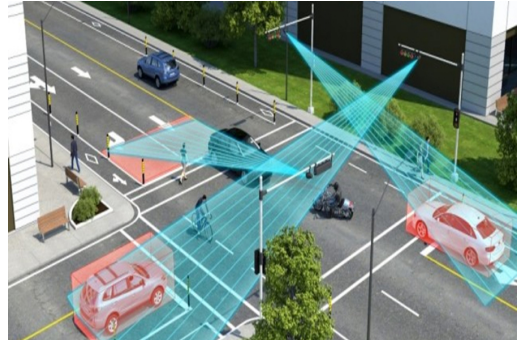
- Programmation génétique
- Apprentissage automatique
- Raisonnement et démonstration automatique
- Data Mining
- Planification
- Agents conversationnels
- Théorie des jeux
- Robotique
- Logique floue
- Programmation par contrainte
- **Systèmes multi-agents**



IA \neq Apprentissage !

Applications dans le transport

- Véhicules autonomes / Aides à la conduite
- Planification de l'usage des voies ferrées
- GPS (Algos de routage)
- Contrôle d'infrastructures routières
- Etc...

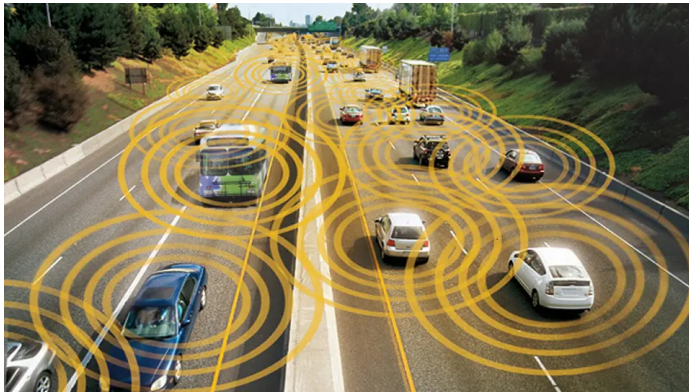


- Algorithmes de recherche
 - ▶ Recherche de chemins (Depth-First search, A*)
 - ▶ Jeux avec adversaires (Min-Max, Alpha-Beta, Minority game)
 - ▶ Problèmes de satisfaction de contraintes (AC4, AC5)
- Algorithmes génétiques (mécanismes évolutionnaires)
- Réseaux de neurones (Reconnaissance de forme, apprentissage)
- Apprentissage par renforcement
- Etc...

L'intelligence collective : Pourquoi ?

- Certains problèmes font cohabiter et interagir des entités "autonomes" (éco-systèmes)
- Certains problèmes s'appuient naturellement sur une distribution logique de la connaissance (simulateurs)
- Certains problèmes sont physiquement répartis et nécessitent de distribuer le savoir (BDD distribuées)

⇒ L'intelligence collective consiste à faire collaborer des entités ayant leur propre savoir-faire et leurs propres connaissances pour simuler ou résoudre un problème complexe.



Un système complexe est un ensemble constitué d'un **grand nombre d'entités en interaction** dont l'intégration permet d'achever **un but commun**. Les systèmes complexes sont caractérisés par des **propriétés émergentes** qui n'existent qu'au niveau du système et ne peuvent pas être observées au niveau de ses constituants. (Wikipédia)

- Met en oeuvre différents composants (entités)
- Ces composants interagissent avec les autres
- Ils évoluent dans un environnement dynamique
- Présence possible de boucles de rétroaction, de systèmes co-évolutifs
- Certains aspects du système ne peuvent être observés, mesurés ou contrôlés
- Les techniques analytiques permettent difficilement de capter la complexité du système + dépendance forte aux conditions initiales

Problème des N corps

Système soluble analytiquement à 2 corps, **chaotique à 3 corps ou plus.**



Problème des N corps

https://www.youtube.com/watch?v=h4e_3Iwwoe



Exemple du trafic routier

- **Entités** : véhicules (voitures, motos, camions, bus, etc), infrastructures (feux tricolores, limitations de vitesse variables, RSU, etc), piétons
- **Interactions** : Entre véhicules, entre véhicules et infrastructures, entre véhicules et piétons, etc... **Beaucoup trop nombreuses !**
- Le système est d'autant plus illisible si l'on considère le caractère humain de la conduite des véhicules.



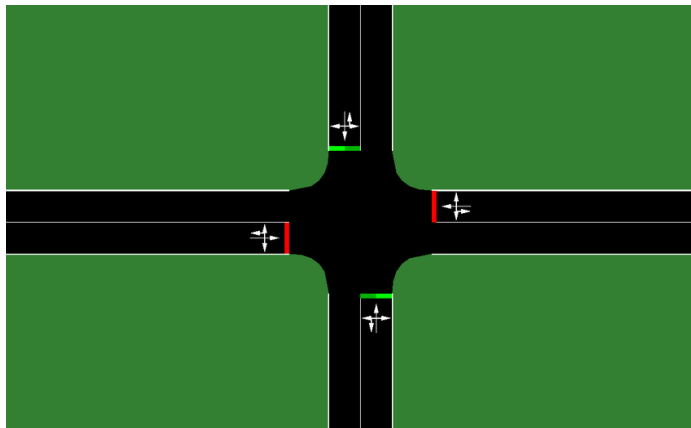
- Approche utilisée historiquement pour la modélisation de systèmes
- Consiste à modéliser un système sous forme de variables et d'équations générales pour l'analyser mathématiquement
- Permet d'établir des preuves mathématiques de concept (plus haut niveau de preuve possible, irréfutable)

Problèmes liés à l'approche mathématique

- Reste au niveau de la population globale avec des lois de masse
- Difficultés à rendre compte des interactions au niveau de l'individu
- Les équations doivent souvent être simplifiées pour être manipulées
- Prédictif... et peu explicatif
- Domaine continu... alors que le monde est discrétisé

Exemple pour une intersection

Quel est le temps moyen de passage de l'intersection ?



- Chaque composant est modélisé individuellement
- Leur comportement est défini précisément
- C'est un système parallèle
- On parle le même langage que celui des spécialistes
- Les ordinateurs et logiciels actuels permettent d'entrer dans le détail

- Se faire comprendre plus facilement par les spécialistes (biologistes, sociologues, géographes, financiers, etc...)
- Simuler des milliers d'individus en interaction
- Analyser énormément de simulations
- Etudier l'apparition de phénomènes émergents
- Modèles explicatifs en plus d'être prédictifs
- Modèles que l'on peut étendre et adapter facilement
- Lien entre niveaux micro et macro

Chaque agent a **trois caractéristiques clés** :

- **Un ensemble d'états internes** qui le distinguent de ses semblables
- **Une mémoire interne** qui lui fournit éventuellement la matrice à "intelligence"
- **Un ensemble d'opérations** qui lui permettent notamment de raisonner et de communiquer, soit directement, soit par stigmergie

On appelle Agent une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents
- qui possède des objectifs ou une fonction de satisfaction
- qui possède des ressources propres
- qui est capable de percevoir de manière limitée son environnement
- qui possède des compétences et offre des services
- qui peut éventuellement se reproduire
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs en fonction de sa perception et des communications qu'elle reçoit

- SMA : Ensemble d'agents qui évoluent et interagissent dans un environnement
- Faire collaborer des entités ayant leur propre savoir-faire et leurs propres connaissances pour étudier (résoudre / simuler) un problème complexe
- Approche Bottom-Up : Modéliser individuellement pour expliquer les phénomènes macro

C'est une approche ! Au même titre que l'approche mathématique.

En résumé, quelles sont les bonnes questions à se poser ?

- **(A)gents** : Quels sont-ils ? Quels comportements ?
- **(E)nvironnement** : Comment est-il construit ?
- **(I)nteractions** : Qui peut faire quoi ?
- **(O)rganisation** : Modèle social ? Modèle de communication ?
- **(U)tilisateur** : Quelle est sa place ?

Après avoir vu ce passage de l'épisode *Hated in the nation* de Black Mirror, essayez d'identifier les éléments qui composent ce SMA avec les voyelles, et d'identifier les différentes caractéristiques des agents (Etats, mémoire, opérations).



- **Adaptativité** : On ajoute autant d'agents que l'on souhaite et ce de manière dynamique. Le système est "scalable".
- **Autonomie** : Aucune prise de décision centralisée. Il n'y pas de "Dieu" qui collecte et décide pour les autres.
- **Emergence** : Apparition de structures globales non codées explicitement dans les individus. Les niveau micro est codé, le niveau macro non.

Deux grandes approches

- **Minimaliste (KISS)** : Etant donné un phénomène, quels sont les modèles et comportements les plus simples permettant d'obtenir le phénomène recherché.
- **Réaliste (KIDS)** : Compléxifier les modèles pour coller au plus près à la réalité.

- **Macroscopique** : Etude du système dans son ensemble
- **Mesoscopique** : Etude des interactions entre groupes d'agents
- **Microscopique** : Etude des interactions d'un agent avec l'environnement

Un peu de technique...

	Prise de parole contrôlée	Prise de parole déléguée
1 seul process	Gestion de tours de parole. Simulation de la simultanéité possible.	On choisit un agent, il agit immédiatement. Aucune simultanéité.
N process	Agent=Thread. Barrière de synchro. Améliore le temps d'exécution des agents.	Agent=Thread. Aucune synchronisation. Raisonnement de type temps réel.

Avec des tours de paroles, il n'y a plus de parallélisme !

- Ca va moins vite.
- Un agent ne peut pas aller deux fois plus vite qu'un autre.
- Deux agents ne peuvent pas agir en même temps.

Les threads, c'est mieux !

- **Résilience** : Trouver les cas de rupture dans le modèle. Montrer que le résultat n'est pas explicitement codé.
- **Équité** : Si un agent a 3 fois plus de moyens qu'un autre, il aura 3 fois plus de performances. Équité en temps, en action, en mémoire.
- **Aléatoire** : Où y en a-t-il ? Peut-on le supprimer ? Le contrôler ?
- **Reproductibilité** : Comment reproduire "exactement" l'expérience ?

- **accessible** si un agent a accès (\neq **partiellement**) à l'état de l'environnement
- **déterministe** si l'état du monde à l'instant suivant est complètement déterminé par l'état courant et par les actions effectuées par les agents (\neq **stochastique**)
- **épisodique** si à chaque étape, le prise de décision de l'agent dépend uniquement de l'étape elle-même et non pas des décisions prises au cours des étapes précédentes (\neq **séquentiel**)
- **dynamique** si l'environnement évolue pendant que l'agent décide quelle action accomplir avec le temps (\neq statique)

- **Chaque agent en a un !**
- Objectif : La prise de décision, la sélection d'action.
 - ▶ Après observation de l'environnement
 - ▶ Après observation de sa situation personnelle
 - ▶ Après observation des actions passées (situations et actions, de moi, des autres, de l'envie)
- Le comportement observé est une conséquence du mécanisme de sélection d'actions

- Les agents **réactifs**

- ▶ Il n'est pas nécessaire que les agents soient intelligents pour avoir un comportement global intelligent. Ils ne réagissent qu'à des stimuli et ne retiennent rien !
- ▶ Analogie avec la biologie (éco-systèmes)

- Les agents **cognitifs**

- ▶ Le SMA est composé d'un petit nombre d'agents "intelligents". Chaque agent dispose d'une mémoire : il planifie !
- ▶ Analogie avec les sciences humaines

- Le comportement est observé, tandis que la stratégie est exécutée : le comportement est issu d'une stratégie.
- Plusieurs stratégies peuvent donner le même comportement. Exemple : dilemme du prisonnier.

Selon le matrice de récompense suivante, essayez de trouver une stratégie qui domine celle de vos camarades après 10 itérations, c'est à dire qui maximise le gain total reçu par partie.

A / B	Coopérer	Trahir
Coopérer	3 / 3	0 / 5
Trahir	5 / 0	1 / 1

Quelques exemples

	Cognitif	Réactif
Simulation	Jeux vidéos (Football Manager, Les Sims)	Automates (Jeu de la vie, fourmis, etc)
Applis distribuées	Enchères avec stratégies. Secrétaire virtuelle (à l'ancienne).	Calcul distribué (BDD) et Optimisation du trafic routier

Et dans le trafic routier ?

Plusieurs types d'agents !

- Véhicules (voitures, deux-roues, camion, bus, etc)
- Infrastructures (feux tricolores, limites de vitesse variables, etc)
- Piétons

Et chacun a son propre comportement !

Un exemple : Modèle IDM

- Intelligent Driver Model
- Modèle de circulation des véhicules sur un réseau routier simulé développé par Treiber et al. (2000).
- Plusieurs paramètres internes pour chaque agent α
 - ▶ Position x_α , vitesse v_α
 - ▶ Distance à la voiture précédente s_α
 - ▶ Différence de vitesse par rapport à la voiture précédente Δv_α
 - ▶ Vitesse souhaitée v_0
 - ▶ Distance minimale au véhicule précédent s_0
 - ▶ Temps minimal pour atteindre le véhicule précédent T
 - ▶ Accélération maximale a
 - ▶ Freinage maximum agréable b

Un exemple : Modèle IDM

- Un système de calcul de la position et de la vitesse au pas de simulation suivant.

$$\dot{x}_\alpha = \frac{dx_\alpha}{dt} = v_\alpha$$

$$\dot{v}_\alpha = \frac{dv_\alpha}{dt} = a \left(1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right)$$

$$\text{with } s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha) = s_0 + v_\alpha T + \frac{v_\alpha \Delta v_\alpha}{2 \sqrt{a b}}$$

Autre exemple : Agents intersections

- Une intersection peut être considérée comme un agent capable d'interagir sur l'environnement avec les feux tricolores dont elle est équipée.
- Il peut percevoir l'environnement grâce à un ensemble de capteurs.
- De nombreuses stratégies existent...

Quelques exemples...

- Stratégie à temps fixe
 - ▶ Pas besoin de capteurs
 - ▶ Chaque phase de l'intersection possède un temps fixe
 - ▶ Pas d'adaptation
- Stratégie Self Organizing Traffic Lights (SOTL) (Cools et al., 2013)
 - ▶ Besoin de capteurs de détection de véhicule à proximité de l'intersection, sur chaque voie
 - ▶ Chaque phase a un temps minimal, et un temps maximal
 - ▶ Lorsqu'une phase a passé son temps d'exécution minimal, et qu'aucun véhicule n'est détecté, alors on passe à la phase suivante
 - ▶ Si la somme des temps d'attente des véhicules sur les autres voies dépasse un certain seuil, alors le changement de phase est forcé

- Stratégie Max-Pressure (Varaiya, 2013)
 - ▶ Besoin de capteurs pour détecter si des véhicules sont proche de l'intersection, et compter le nombre de véhicules sur la voie
 - ▶ A chaque période t , la pression de chaque phase est calculée.
 - ▶ La phase qui a la plus haute pression est choisie pour la prochaine période
 - ▶ De nombreuses variantes !
- Apprentissage par renforcement
 - ▶ On apprend la stratégie !
 - ▶ Basé sur des matrices d'états (stratégie explicable) ou des réseaux de neurones (stratégie non-explicable)
 - ▶ L'apprentissage peut être long !
 - ▶ Besoin d'énormément de capteurs
 - ▶ N'a pas fait ses preuves dans le monde réel

Définition de J. Ferber :

- Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Les interactions s'expriment à partir d'une série d'actions dont les conséquences exercent en retour une influence sur le comportement futur des agents. Les agents interagissent le long d'une suite d'évènements pendant lesquels les agents sont d'une certaine manière en contact les uns avec les autres, que ce contact soit direct ou qu'il s'effectue par l'intermédiaire d'un autre agent ou par l'environnement.

- On distingue les interactions :
 - ▶ directes, via des échanges de message d'un expéditeur à un ou plusieurs destinataires
 - ▶ indirectes (stigmergie), via des signaux, marqueurs chimiques, forces d'attraction/répulsion, etc.
- La communication :
 - ▶ est associé à un langage muni d'une sémantique afin d'énoncer et d'interpréter ces messages
 - ▶ est scénarisée par des protocoles
 - ▶ permet de prendre une décision collective en votant, enchérissant, marchandant, argumentant
 - ▶ permet aux agents de coopérer, i.e. en collaboration ou en compétition

Définition de J. Ferber :

- On appellera situation d'interaction un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leur compétences individuelles.
- Les situations d'interactions sont caractérisées par 3 critères :
 - ▶ Compatibilité des buts entre agents : Est-ce qu'un agent qui atteint son objectif signifie que d'autres n'atteignent pas le leur ?
 - ▶ Relation aux ressources : Est-ce qu'il y a suffisamment de ressources pour satisfaire tous les agents ?
 - ▶ Capacités des agents par rapport aux tâches : Est-ce que la coopération est nécessaire pour qu'un agent accomplisse la tâche qu'il souhaite ?

Différentes situations d'interaction

Compatibilité des buts	Ressources suffisantes	Compétences suffisantes	Situation d'interaction
Oui	Oui	Oui	Indépendance
Oui	Oui	Non	Collaboration simple
Oui	Non	Oui	Encombrement
Oui	Non	Non	Collaboration coordonnée
Non	Oui	Oui	Compétition individuelle pure
Non	Oui	Non	Compétition collective pure
Non	Non	Oui	Conflit individuel pour les ressources
Non	Non	Non	Conflit collectifs pour des ressources

- Trouvez un exemple concret de système multi-agents pour chaque situation d'interaction différente.

Autre concept essentiel : la coopération

Définition de J.Ferber :

- On dit que plusieurs agents coopèrent, ou encore qu'ils sont dans une situation de coopération, si l'une des deux conditions est vérifiée :
 - ▶ L'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître différentiellement les performances du groupe
 - ▶ L'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels

- Intérêts
 - ▶ Amélioration de la survie
 - ▶ Accroissement des performances (quantitativement et qualitativement)
 - ▶ Résolution de conflits
- Méthodes de coopération
 - ▶ Le regroupement et la multiplication
 - ▶ La communication
 - ▶ La spécialisation
 - ▶ Collaboration par partage des tâches et des ressources
 - ▶ La coordination d'actions
 - ▶ La résolution de conflits par arbitrage et négociation

Définition de J.Ferber :

- Une organisation peut être définie comme un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou évènements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. Elle assure solidarité et solidité relative, donc assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires.

- La fonction **représentationnelle** comprend l'ensemble des fonctions de modélisation de l'environnement et des autres organisations ainsi que la mémorisation des événements qui ont pu affecter l'organisation. (ex : département d'intelligence économique dans une entreprise, archives, etc)
- La fonction **organisationnelle** se rapporte à tout ce qui a trait à la gestion de l'activité d'une organisation et, en particulier, à la planification, l'allocation et le suivi de tâches, la coordination des actions ainsi que celles des engagements. (ex : managers, chefs de projets dans une entreprise)

- La fonction **conative** se rapporte aux sources, aux limites et à la sélection des activités des organisations. (ex : actionnaire dans une entreprise)
- La fonction **interactionnelle** sert à faire le lien entre une organisation et ce qui l'entoure. C'est elle qui gère les activités d'interactions avec son environnement ainsi que l'ensemble des communications avec les autres organisations. (ex : services presse, communication, commerciaux)

- La fonction **productive** ou **opérateur** concerne l'ensemble des activités primitives qui doivent être mises en œuvre pour résoudre un problème ou effectuer un travail. (ex : ouvriers, développeurs)
- La fonction **végétative** traite de la conservation de la structure et des agents, de l'acquisition et de l'entretien des ressources et des tâches employées pour maintenir et reproduire l'organisation. (ex : services RH, services de maintenance)

L'organisation comme phénomène emergent

- Une organisation n'a pas à être décrite explicitement !
- Dans le cas de l'emergence d'une organisation, on parle d'auto-organisation
- Exemple : SOTL pour le trafic routier