



Electronique

Energie Electrique

Automatique

Master 2 3EA, Parcours RoVA



# Systemes Robotiques Hétérogènes et Coopératifs

UPJV, Département EEA

**Fabio MORBIDI**

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail : [fabio.morbidi@u-picardie.fr](mailto:fabio.morbidi@u-picardie.fr)

CM, TD : Mardi 15h30-18h30 et Mercredi 13h30-16h30, salle CURI 304

TP : Mercredi 13h30-16h30, salle TP204

# Plan du cours

1. Introduction aux systèmes multi-agents
2. Théorie des graphes
3. Systèmes dynamiques connectés en réseaux : protocole de consensus
4. Traitement du signal sur graphes

## Domaines d'application :

- *Systèmes robotiques* collaboratifs, modulaires et reconfigurables (en lien avec le Projet Transversal RoVA – EC63)
- *Réseaux de capteurs* : objets connectés (IoT), capteurs embarqués dans le véhicule et le bâtiment (domotique), etc.
- *Systèmes à grande échelle* avec actionneurs et capteurs spatialement répartis : installations industrielles, centrales nucléaires, télescopes géants, infrastructures intelligentes (par ex. réseaux de transport), etc.



# Systemes dynamiques en reseaux : cours M2 3EA

1) “*Systemes Robotiques Heterogenes et Cooperatifs*” (RoVA)

⇒ Modélisation et commande distribuée de systemes en reseaux

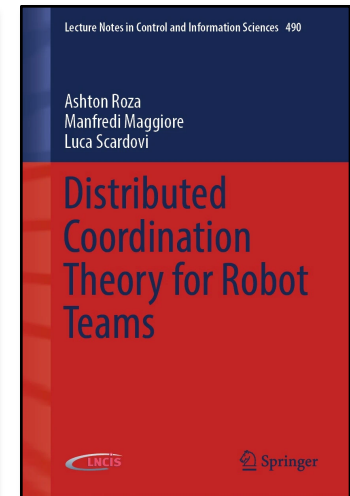
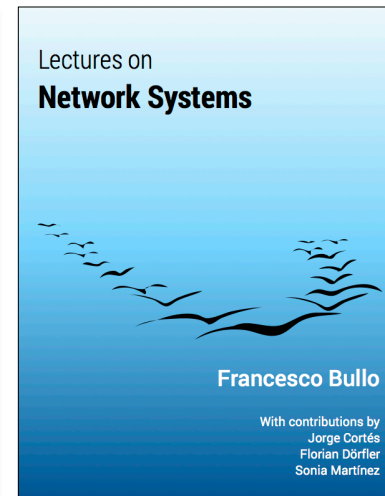
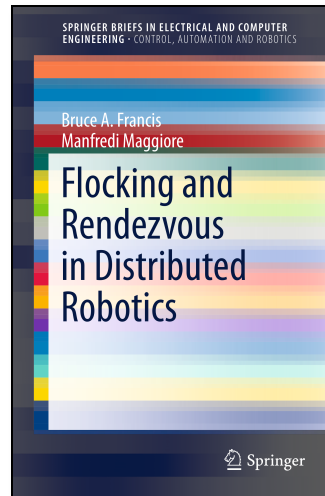
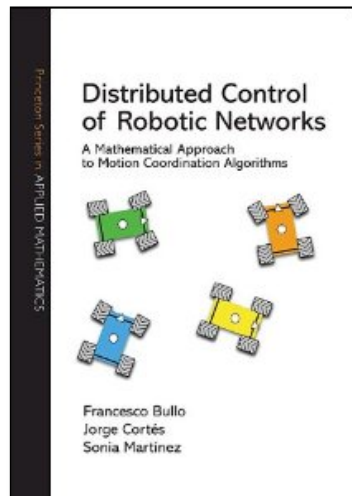
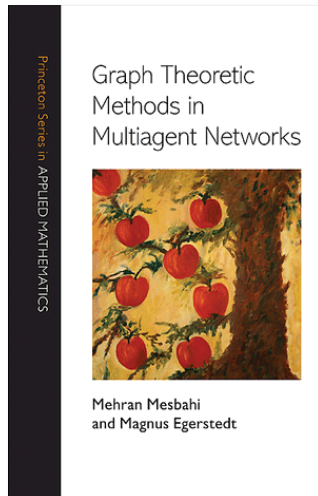
2) “*Surveillance Distribuee de Systemes Multi-Agents*” (D. Kachi, A. Rabhi)

⇒ Traitement de donnees et estimation distribuée dans les systemes en reseaux



# Bibliographie


- *"Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks"*, M. Mesbahi, M. Egerstedt, Princeton University Press, 2010
- *"Distributed Control of Robotic Networks"*, F. Bullo, J. Cortés, S. Martínez, Princeton University Press, 2009 (version électronique disponible sur: <http://coordinationbook.info>)
- *"Flocking and Rendezvous in Distributed Robotics"*, B.A. Francis, M. Maggiore, SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, Springer 2016
- *"Lectures on Network Systems"*, F. Bullo, CreateSpace, édit. 1.6, janvier 2022, (version électronique disponible sur: <http://motion.me.ucsb.edu/book-lns>)
- *"Distributed Coordination Theory for Robot Teams"*, A. Roza, M. Maggiore, L. Scardovi, Springer, 2022




# Bibliographie

## Matériel de cours:

[http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching\\_SRHC23-24.html](http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching_SRHC23-24.html)



Electronique  
Energie Electrique  
Automatique



UNIVERSITÉ  
de Picardie  
Jules Verne

**Master 2 3EA, Parcours RoVA**

# Systemes Robotiques Hétérogènes et Coopératifs


UPJV, Département EEA

**Fabio MORBIDI**

Laboratoire MIS  
Équipe Perception Robotique  
E-mail : [fabio.morbidi@u-picardie.fr](mailto:fabio.morbidi@u-picardie.fr)

CM, TD : Mardi 15h30-18h30 et Mercredi 13h30-16h30, salle CURI 304  
TP : Mercredi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2023-2024





# Connaissances préalables

- Théorie des ensembles
- Algèbre linéaire (opérations de base sur les vecteurs et les matrices)
- Équations différentielles ordinaires, équations aux différences, théorie des systèmes dynamiques
- Programmation (logiciel Matlab pour les TD et TP)

$$\text{Note finale} = \frac{1}{2} \left[ \text{DS} + \left( \frac{\text{TP1} + \text{TP2} + \text{TP3}}{3} \right) \right]$$



# Plan du cours

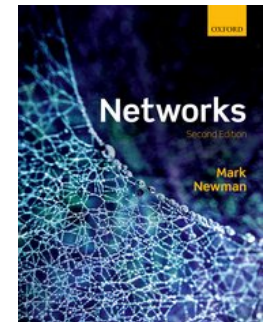
1. Introduction aux systèmes multi-agents
2. Théorie des graphes
3. Systèmes dynamiques connectés en reseaux : protocole de consensus
4. Traitement du signal sur graphes



# Systemes multi-agents

Domaine de recherche **vaste** et **pluridisciplinaire** :

- Automatique et théorie des systèmes
- Robotique
- Télécommunications (réseau de téléphonie mobile)
- Informatique (systèmes embarqués)
- Mathématiques (théorie des graphes, algèbre linéaire, équations différentielles)
- Intelligence artificielle (réseau de neurones artificiels)
- Réseaux complexes (voir le livre “*Networks*”, M. Newman, Oxford Univ. Press, 2018)
  - Technologiques (Internet, réseau électrique, routier, de distribution)
  - D’information (World Wide Web, réseau de citations)
  - Sociaux (Facebook, TikTok, Tinder, réseau d’affiliations)
  - Biologiques (réseau biochimique, cérébral, écologique)



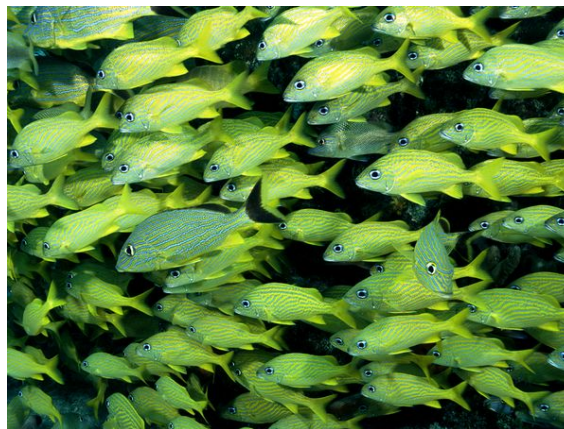


# Qu'est-ce que un système multi-agents ?

## Systèmes naturels ...



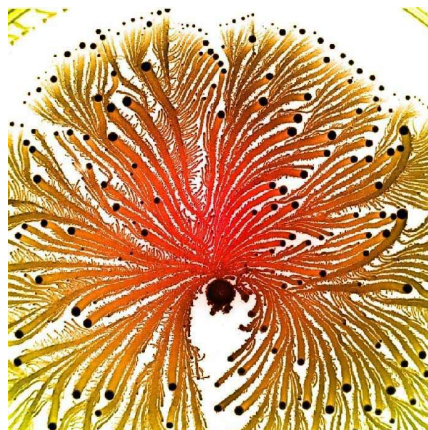
Volée d'oiseaux



Banc de poissons



Colonie de fourmis



Colonie de bactéries



Troupeau de zèbres



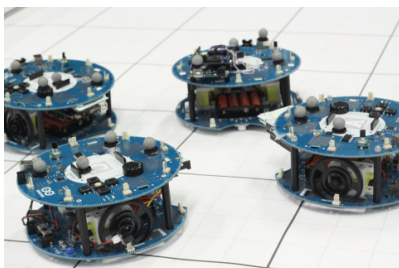
Essaim d'abeilles



# Qu'est-ce que un système multi-agents ?

## Systèmes artificiels ...

Un système multi-agents est constitué d'un ensemble  $n$  d'**unités intelligentes autonomes** qui *communiquent* et *collaborent* entre eux



Cohorte de robots mobiles



Membres d'un réseau social  
(Facebook, Twitter, Snapchat, Tinder)



Réseau d'ordinateurs  
(Internet), objets connectés



Générateurs d'énergie dans un réseau électrique (parc éolien, panneaux photovoltaïques, etc.)



Réseau de téléphonie mobile



# Exemples de systèmes multi-agents



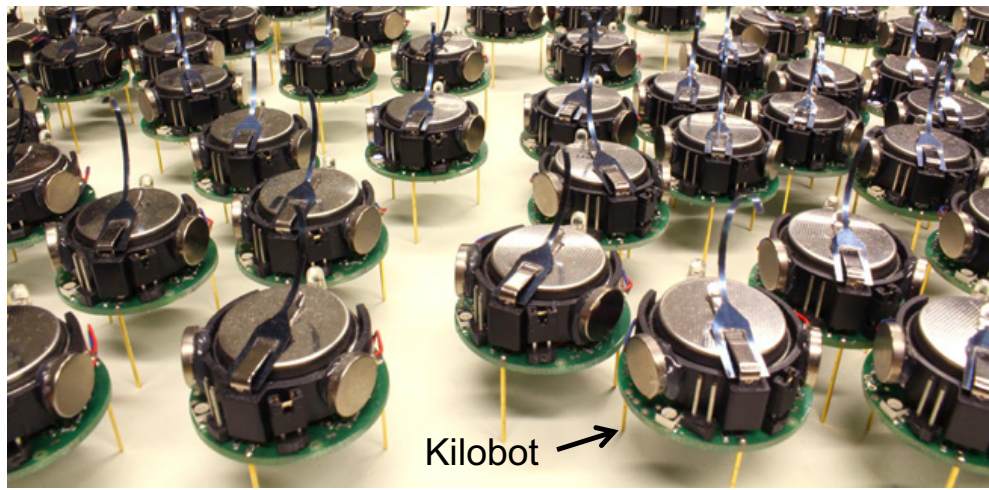
# Cohortes de robots : assemblage programmable



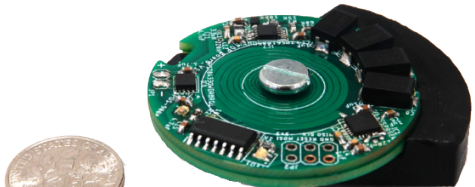
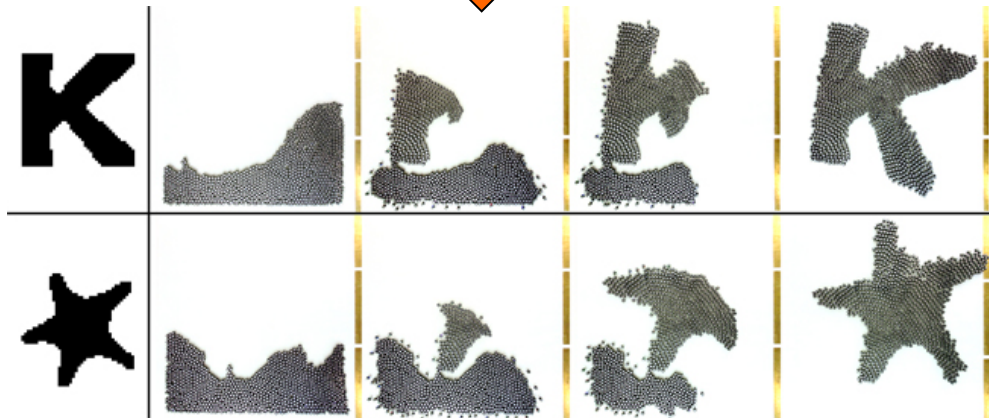
“Essaim d'un millier de robots”  
(Science, 2014)

“Shape Formation in Homogeneous Swarms Using Local Task Swapping”, H. Wang, M. Rubenstein, vol. 36, n. 3, pp. 597-612, IEEE Trans. on Robotics, 2020

“PCBot: a Minimalist Robot Designed for Swarm Applications”, J. Wang, M. Rubenstein, pp. 1463-1470, in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intel. Robots Syst.



↓ Vidéo



**PCBot**

- Taille : 48 x 42 x 14 mm
- Poids : 18 g

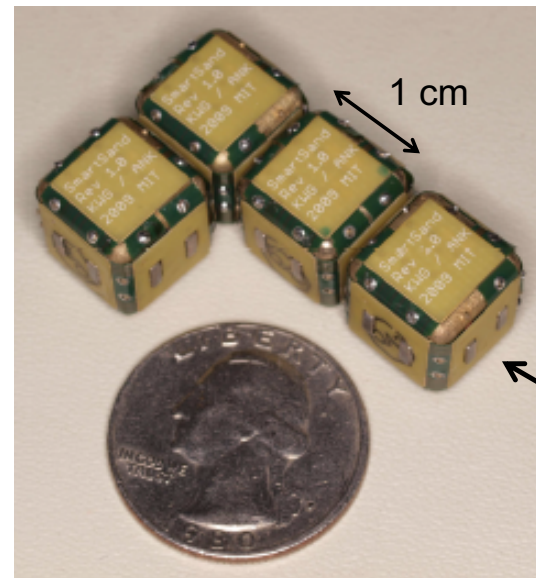


# Cohortes de robots : assemblage programmable

- Matière programmable

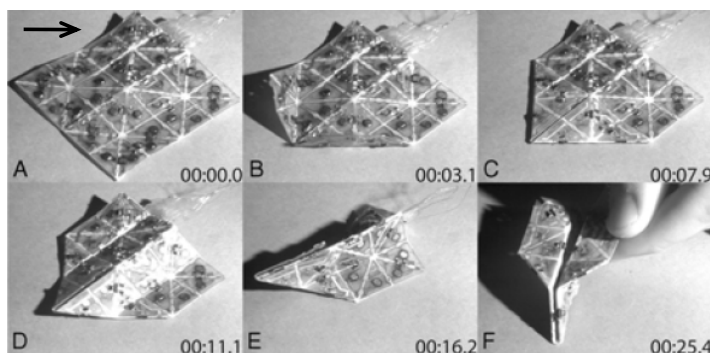


"Robot Pebbles: One Centimeter Modules for Programmable Matter through Self-Disassembly", K. Gilpin, A. Knaian, D. Rus, in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 2485-2492, 2010



- Robots origami

"Robotic origamis: Self-morphing modular robot", J.K. Paik, A. Byoungkwon, D. Rus, R.J. Wood, in Proc. ICMC, 2012.



Avion en papier



Table



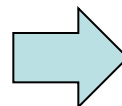
Moulin à vent

# Volées de robots : spectacles de lumière

- **2012**: Voest Alpine Klangwolke, Linz, Autriche, **49 drones** [Vidéo](#)



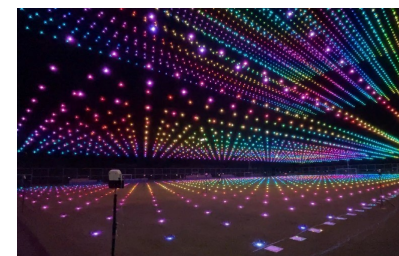
Quadrirotor *Hummingbird*  
de AscTec



- **2015** : Light show d'Intel, **100 drones**
- **2016** : Light show d'Intel, **500 drones**
- **Février 2018** (Jeux Olympiques d'hiver de PyeongChang): Light show d'Intel, **1218 drones**
- **Mai 2018** (Xi'an, Chine): Light show d'Ehang, **1374 drones** (1.6M\$, Interférence GPS sur 496)
- **15 juillet 2018** : Light show d'Intel, **2066 drones** [Vidéo](#)
- **18 mai 2021** : Shenzhen High Great Innovation Technology Development Co., **5164 drones**



"Most Unmanned  
Aerial Vehicles  
airborne simultaneously"

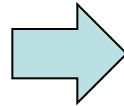


# Volées de robots : écran 3D



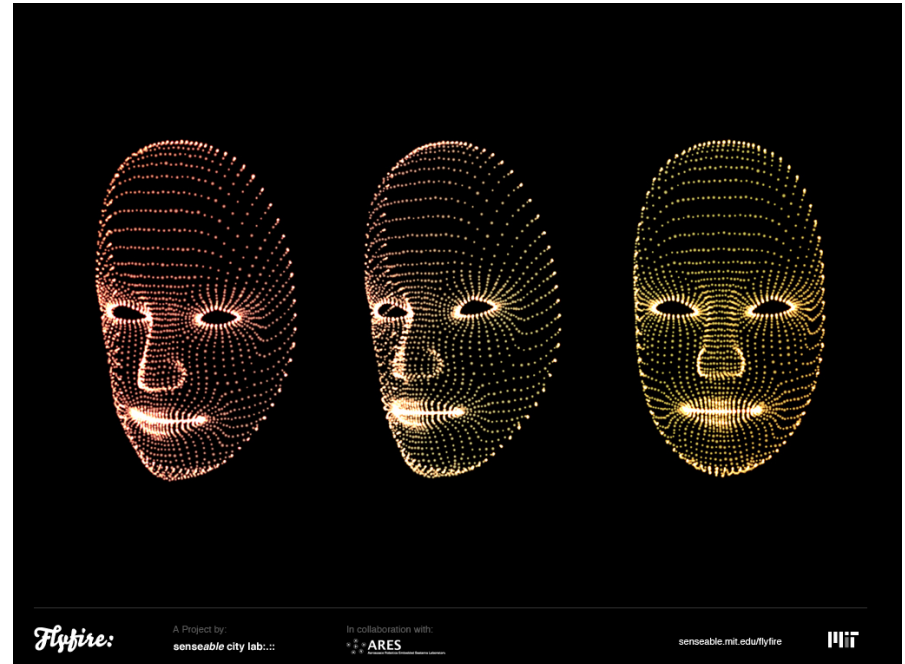
Massachusetts  
Institute of  
Technology

Mini-autogyre équipé  
d'une lampe colorée



Vidéo

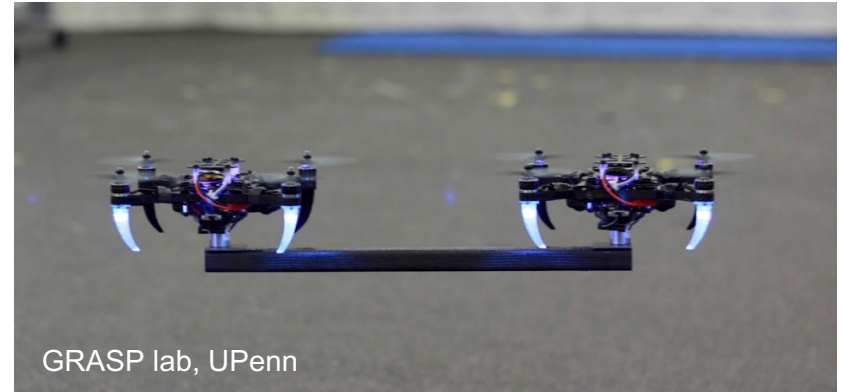
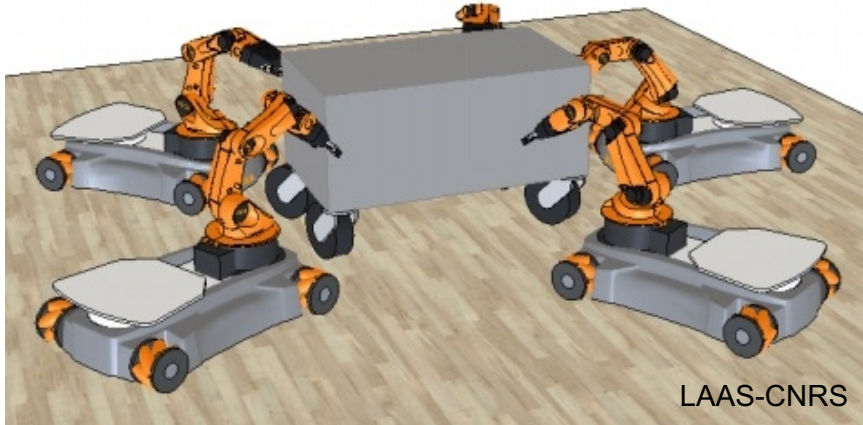
Écran interactif 3D



**Projet Flyfire** (laboratoire SENSEable City) en collaboration  
avec le laboratoire ARES du MIT (2010)



# Manipulation et transport d'objets



Robots terrestres

Robots aériens



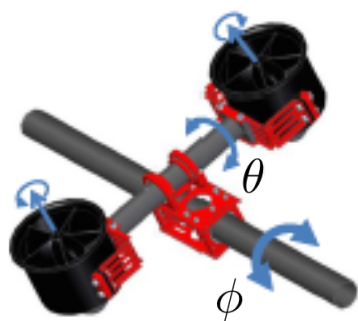
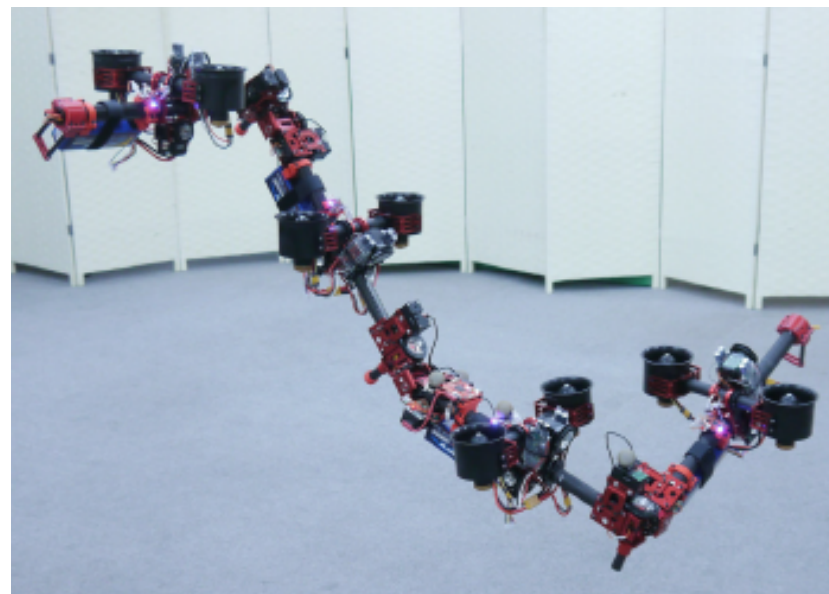


# Robots aériens modulaires et reconfigurables

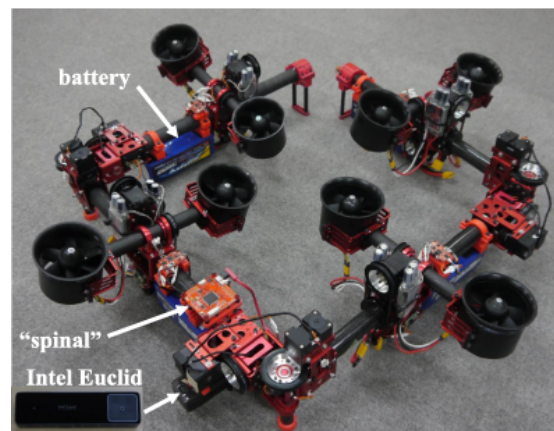


“Versatile articulated aerial robot **DRAGON**:  
Aerial manipulation and grasping by  
vectorable thrust control”

M. Zhao, K. Okada, M. Inaba,  
The International Journal of Robotics Research,  
vol. 42, n. 4-5, pp. 214-248, 2023



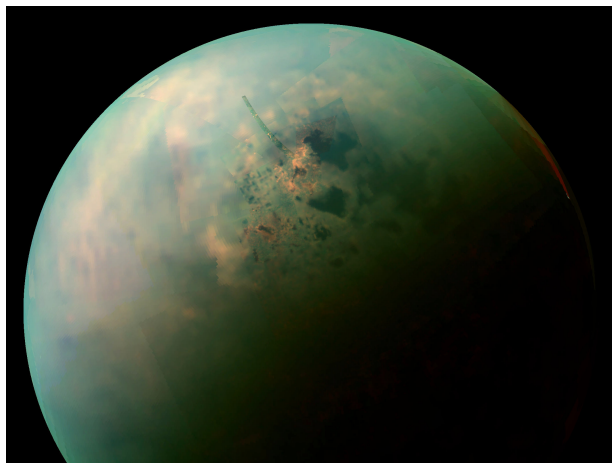
Rotors duaux : 1 des 4  
modules du drone



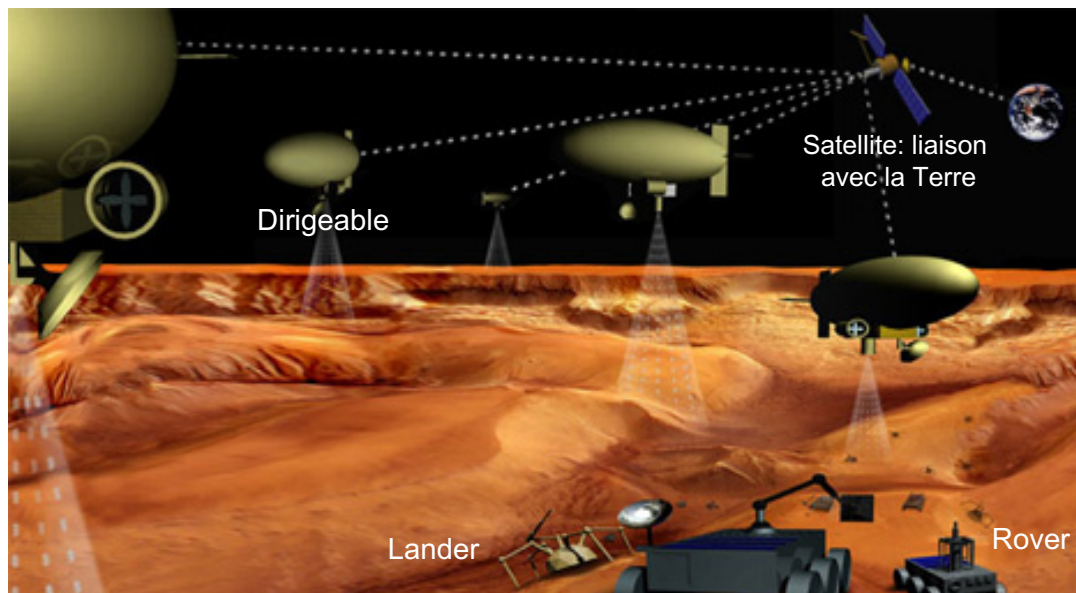
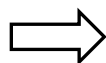
[Vidéo](#)



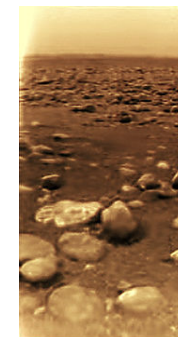
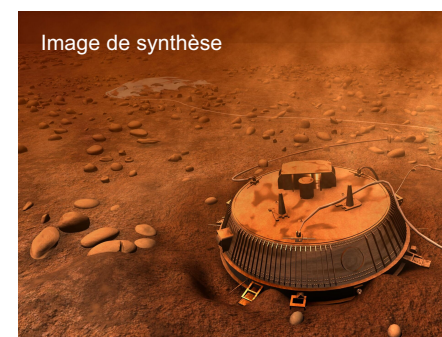
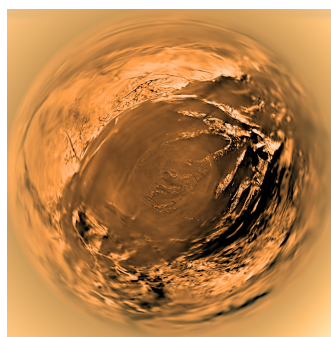
# Exploration spatiale robotisée



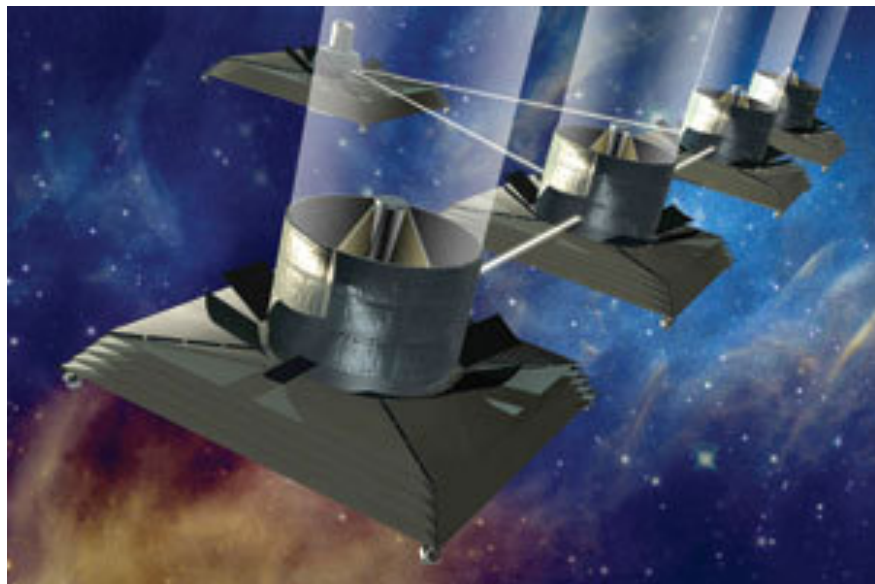
- Titan est le plus grand satellite naturel de Saturne
- Certains chercheurs suggèrent qu'un possible océan souterrain pourrait servir d'environnement favorable à la vie
- Atterrissage de la sonde *Huygens* (orbiteur *Cassini*): 14 janvier 2005



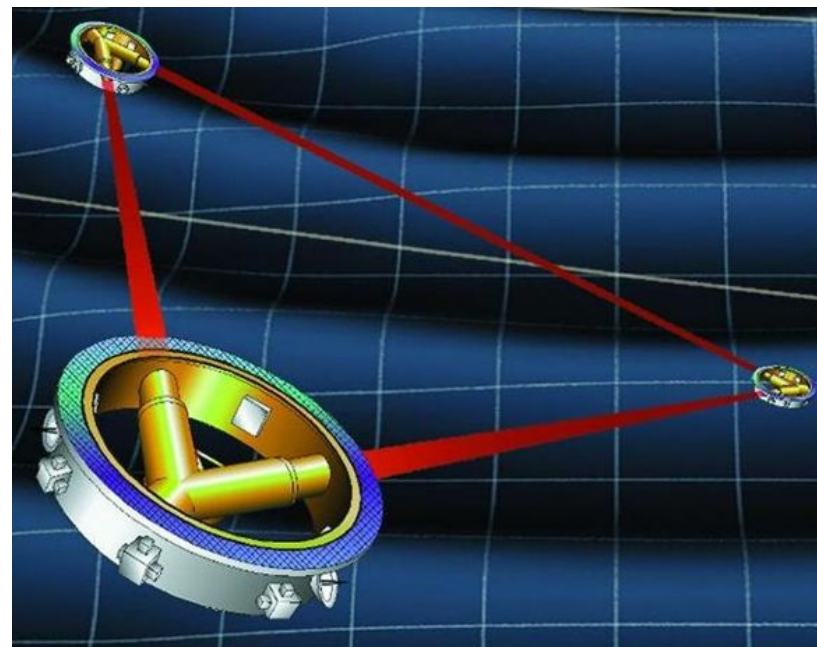
Groupe de rovers, landers et dirigeables au-dessus de Titan (W. Fink, Caltech, USA) pour l'exploration et la cartographie



# Réseaux de satellites et sondes spatiales



*Terrestrial Planet Finder (TPF) – JPL/NASA*



*Laser Interferometer Space Antenna (LISA)*  
Mesure des ondes gravitationnelles:  
Trois satellites à une distance de  
5 millions de kilomètres

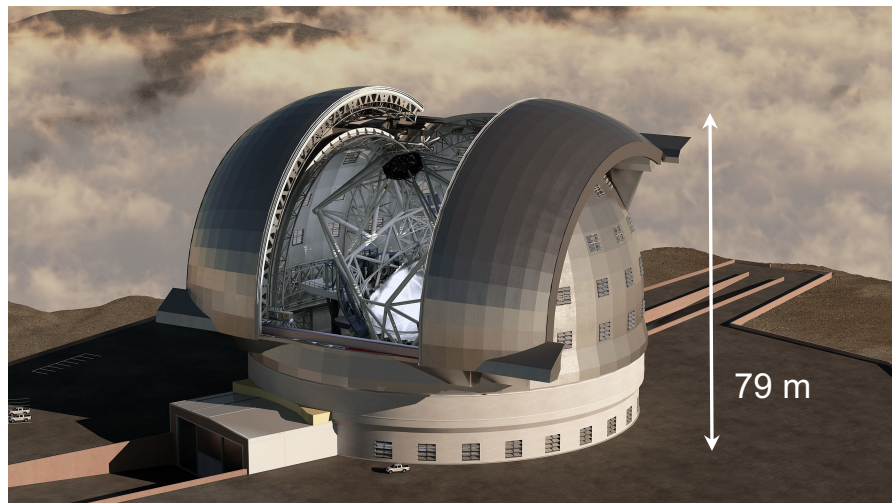


*Réseau de satellites GPS (numéro minimum de satellites pour  
une constellation complète: 24, opérationnels 95% du temps)*



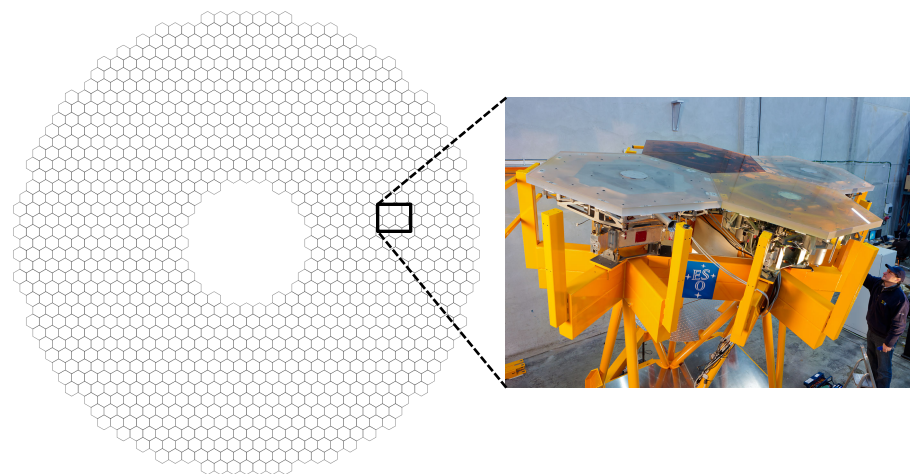
# Télescopes optiques géants

**Extremely Large Telescope** (désert d'Atacama, Chili : Inauguration en 2027)



Le plus grand télescope géant en cours de construction au monde (lumière visible/proche IR)

- 256 fois la surface photosensible du télescope spatial Hubble et 41 fois la surface du télescope Webb
- Il capturera 100 millions fois plus de lumière que l'œil humain



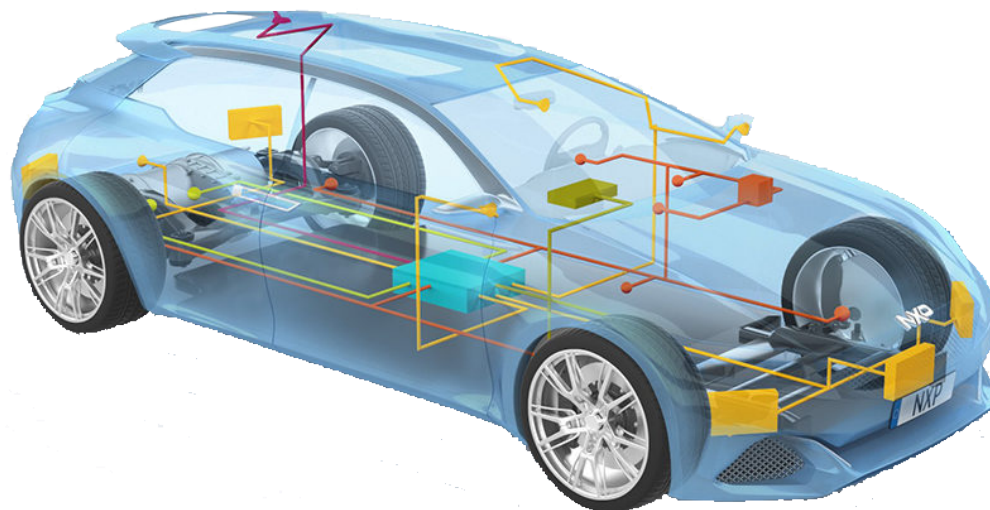
**Miroir primaire segmenté** (nid d'abeille)

- Miroir concave asphérique (fabricant: Safran): diamètre 39.3 m, poids 150 tonnes
- 798 segments hexagonaux (diamètre: 1.45 m)
- *Optique adaptative*: le miroir est soutenu par 30000 supports qui corrigent en temps réel les distortions atmosphériques

*"Control limitations from distributed sensing: Theory and Extremely Large Telescope application", A. Sarlette, R.J. Sepulchre, Automatica, vol. 50, n. 2, pp. 421-430, 2014*



# Systemes embarqués dans le véhicule

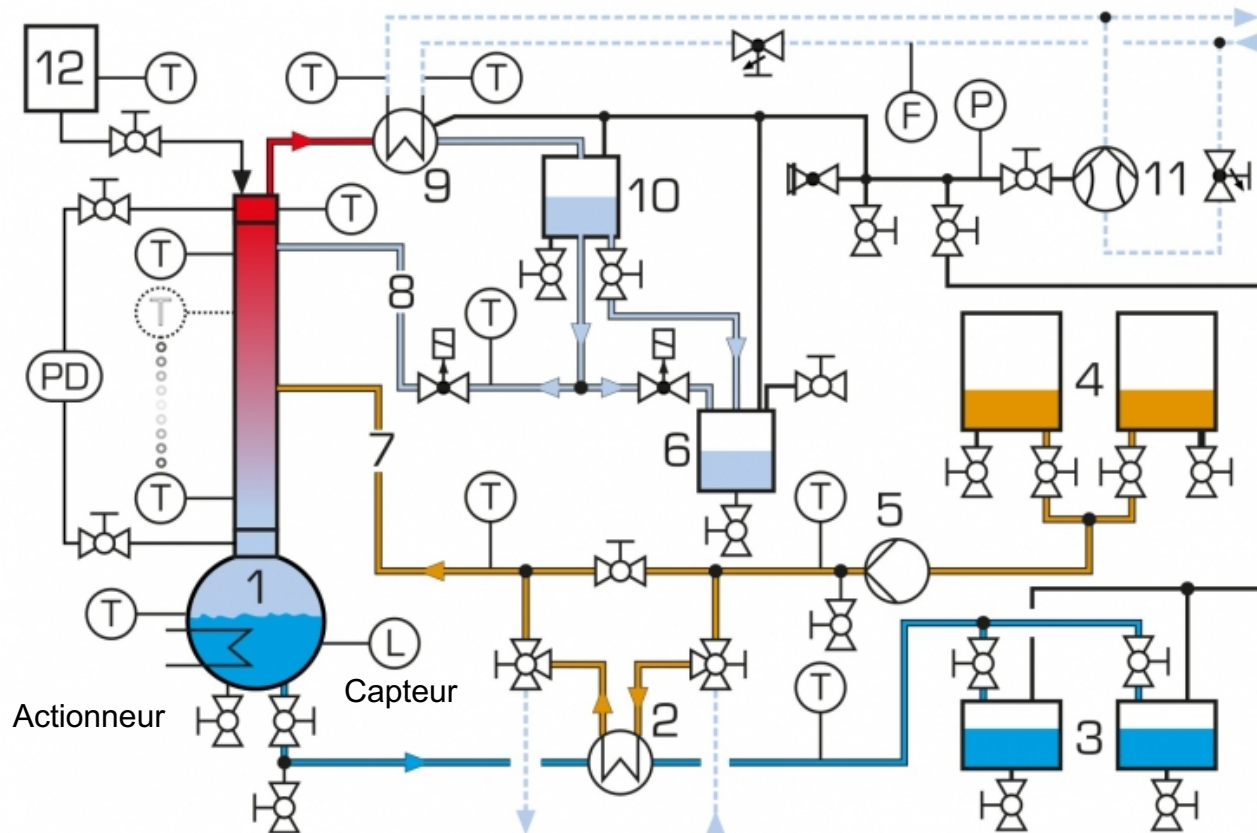


Plusieurs ordinateurs de bord connectés. Ils gèrent différentes fonctions du véhicule :

- Injection
- Contrôle de vitesse
- Systèmes d'aide à la conduite: ABS, ESP (correcteur électronique de trajectoire)
- Boîte de vitesses automatique
- Affichage des informations de base (distance parcourue, vitesse moyenne, consommation moyenne et instantanée de carburant, etc.)



# Grandes installations industrielles



- Systèmes à grande échelle (par ex. usine pétrochimique, centrale nucléaire)
- **Actionneurs** (pompes, valves hydrauliques, etc.) et **capteurs** (mesure de pression, niveau, température, etc.) connectés en réseaux et physiquement séparés



# Autoroutes intelligentes



Boucle inductive



Capteur magnétique

- **Actionneurs** : panneaux de signalisation (limitation de vitesse, selection du nombre de voies, accès aux rampes, etc.)
- **Capteurs** : boucles inductives, capteurs magnétiques ou radars (mesure des données de circulation: débit, vitesse, taux d'occupation, etc.)

# Systemes multi-agents : généralités





# Localité dans la communication et la perception

## Localité dans la communication

Les agents partagent les informations avec leurs voisins sur un **canal de communication**

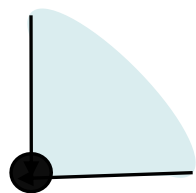
- **Contraintes sur l'énergie:** les agents peuvent communiquer directement seulement avec ceux qui sont situés à *une courte distance* (les voisins)
- **Contraintes sur la bande passante:** si la masse de données échangées simultanément par les agents est importante, le canal de communication peut **saturer** rapidement

## Localité dans la perception

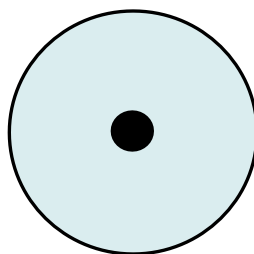
Les agents peuvent extrapoler des informations sur leurs compagnons et sur le milieu environnant grâce aux **capteurs embarqués**

- Cependant, tout capteur a une **plage de mesure** et une **résolution** limitées

Exemples:



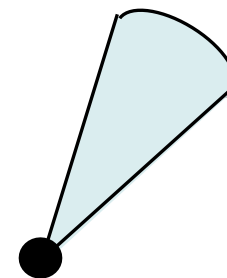
Capteur de vision



Anneau de sonars  
ou de capteurs IR



Capteur tactile



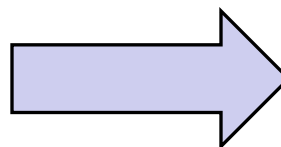
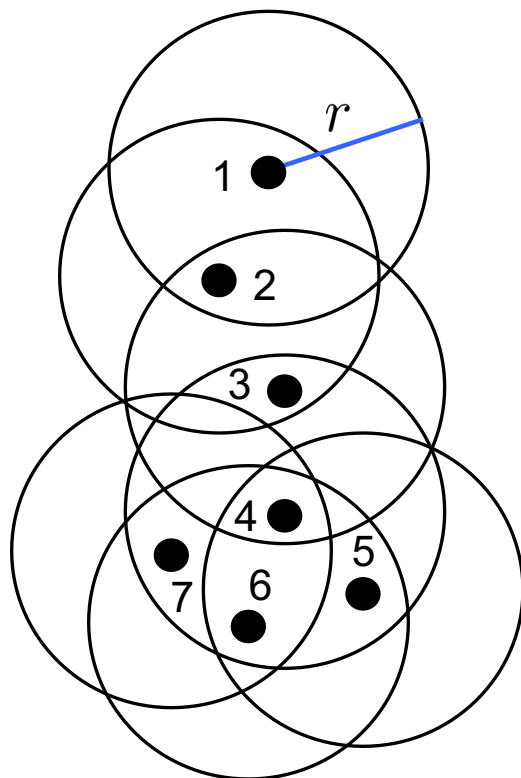
Télémètre laser



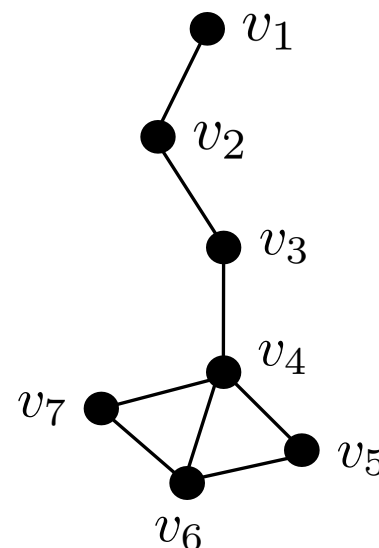
# Représentation des interactions : les graphes

## Graphe de proximité

L'existence d'une arête dans le graphe indique que deux *sommets voisins* (c'est-à-dire, deux agents) sont dans les plages respectives de détection



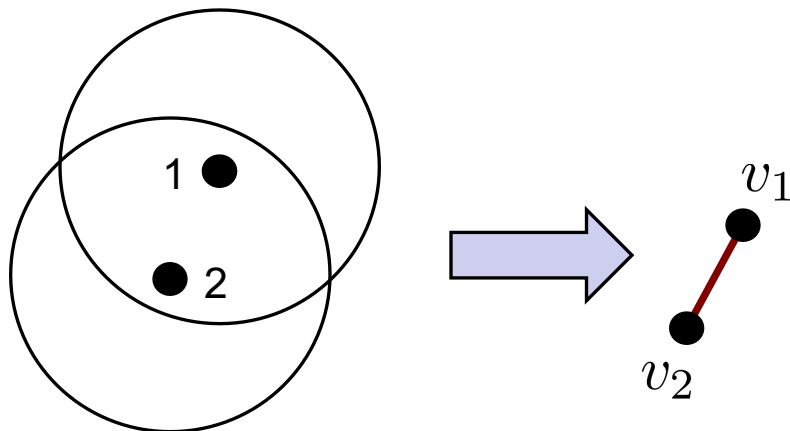
## Graphe de proximité



# Représentation des interactions : les graphes

## Graphe non orientée

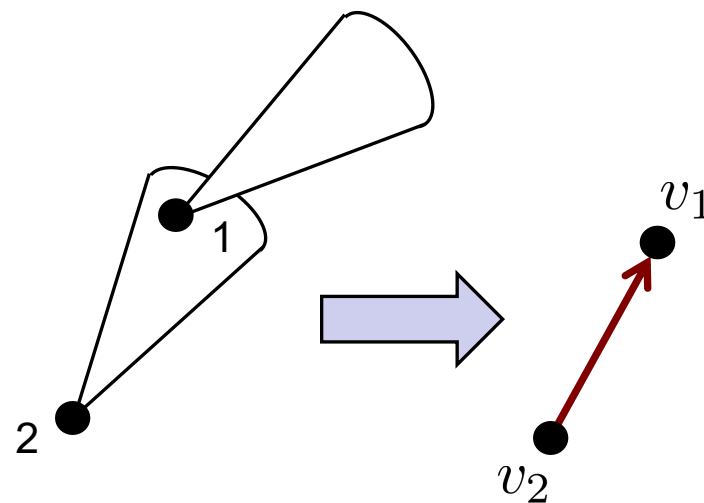
L'interaction entre les agents est *bilatérale* (à savoir, dans les deux sens)



“L'agent 1 détecte l'agent 2 et l'agent 2 détecte l'agent 1”

## Graphe orientée

L'interaction entre les agents est *unilatérale* (à savoir, dans un seul sens)

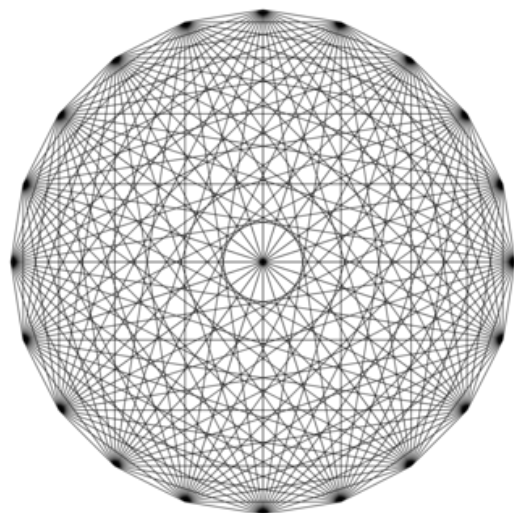


“L'agent 2 détecte l'agent 1 mais l'agent 1 **ne détecte pas** l'agent 2”

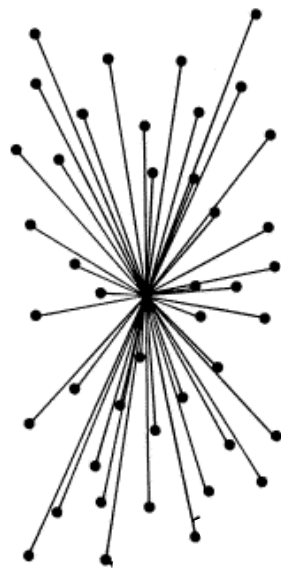


# Classification des systèmes multi-agents

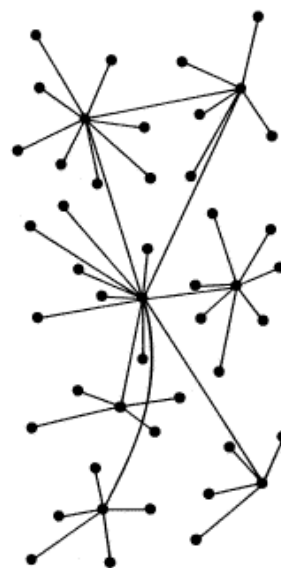
- Système **centralisé** vs système **décentralisé**
  - Différents types de réseau possibles (réseau matériel ou immatériel)



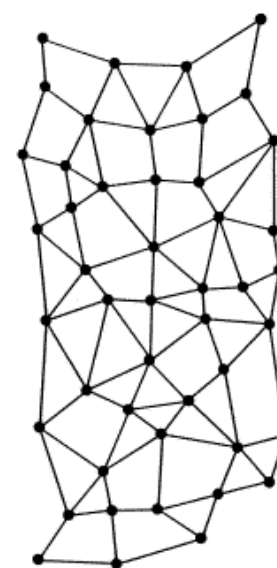
Communication "all-to-all"  
(graphe complet)



Centralisé



Décentralisé



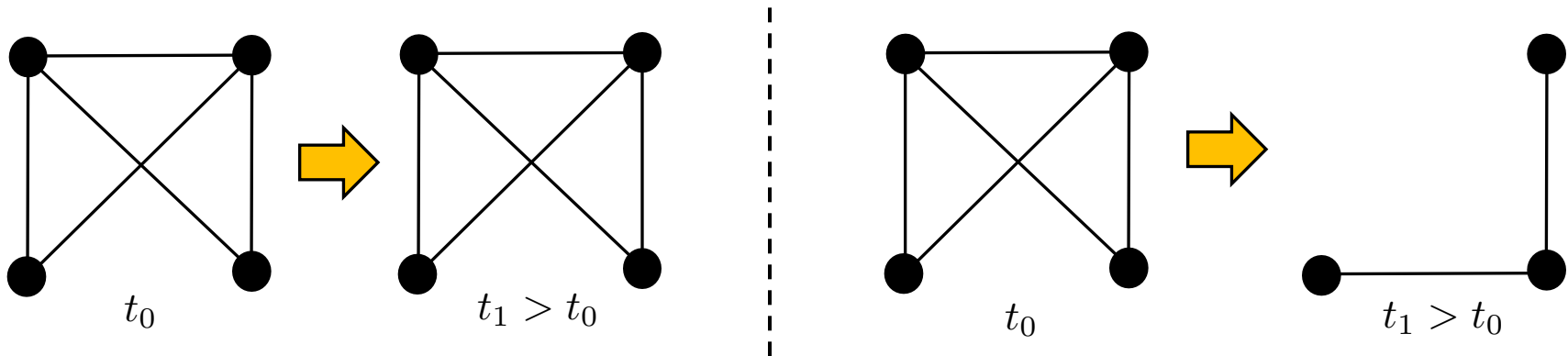
Distribué

"On distributed communications networks", P. Baran,  
IEEE Trans. Comm. Syst., vol. 12, n. 1, 1964

- Système **homogène** vs système **hétérogène**
  - Les agents sont tous du même "type" (espèce) ou ils ont des caractéristiques différentes

# Classification des systèmes multi-agents

- Système avec une **structure fixe** vs **variable dans le temps**
  - Le nombre de sommets et/ou d'arêtes est fixe ou varie dans le temps



- Si le nombre de sommets varie de façon aléatoire, on parle aussi de système **ouvert**
- Dans les réseaux *peer-to-peer* (P2P), où un grand nombre de participants peuvent rejoindre et quitter le système dans un intervalle de temps très court, on a un processus qui s'appelle "**churn**"

"Temporal networks", P. Holme, J. Saramäki, Phys. Rep., vol. 519, n. 3, pp. 97-125, 2012

"Time-varying graphs and dynamic networks", A. Casteigts, P. Flocchini, W. Quattrociocchi, N. Santoro, Int. J. Parallel Emergent Distrib. Syst., vol. 27, n. 5, pp. 387-408, 2012

# Classification des systèmes multi-agents

Soient:

- $m$  = nombre de tâches
- $n$  = nombre d'agents

Selon le Prof. V. Kumar (GRASP lab, University of Pennsylvania) :

## Coordination

- Fonction de coût commune
- Interchangeabilité
- Tâches identiques ( $m = 1$ )
- Efficacité augmente linéairement avec  $n$

## Coopération

- Agents peuvent avoir des fonctions de coûts/tâches différentes
- Récompense de la "mission" = "somme" des récompenses de chaque tâche
- Efficacité des tâches individuelles diminue avec  $n$
- Efficacité de la "mission" augmente avec  $n$

## Collaboration

- Une équipe homogène ne peut pas être capable de compléter une tâche : Hétérogénéité ( $m$  espèces)
- Efficacité de la "mission" augmente (potentiellement de façon superlinéaire) avec  $m$  et  $n$

# Systemes multi-agents : algorithmes

- Nous sommes intéressés à des algorithmes de coordination pour des systèmes dynamiques en réseaux, qui sont :
  - *Distribués*
  - *Scalables*
  - *Synchrones*
- Nous étudierons les propriétés d'un algorithme très important qui possède toutes ces caractéristiques : le **protocole de consensus** ("Redécouvert" en 2003, après la thèse de doctorat "*Problems in Decentralized Decision making and Computation*" de John Tsitsiklis au MIT en 1984)
  - **Attention** : en informatique distribuée, **Paxos** est une famille de protocoles permettant de résoudre le *consensus* dans un réseau de sommets faillibles, c'est-à-dire susceptible d'avoir des pannes
    - **Approche de la machine à état** (L. Lamport) : technique pour convertir un algorithme en un algorithme résistant aux pannes et distribué

