

Les drones, une approche Systèmes complexes

Alex Makarovitsch - Groupe Emergence

15 décembre 2025

DEFINITIONS ET HISTOIRE

Un drone est un artefact complexe, mobile et actif, piloté à distance ou programmé, ayant un ou plusieurs objectifs, pouvant se déplacer et/ou agir de manière autonome. Il peut être aérien, terrestre (sur ou sous) ou maritime (en surface ou sous-marin)

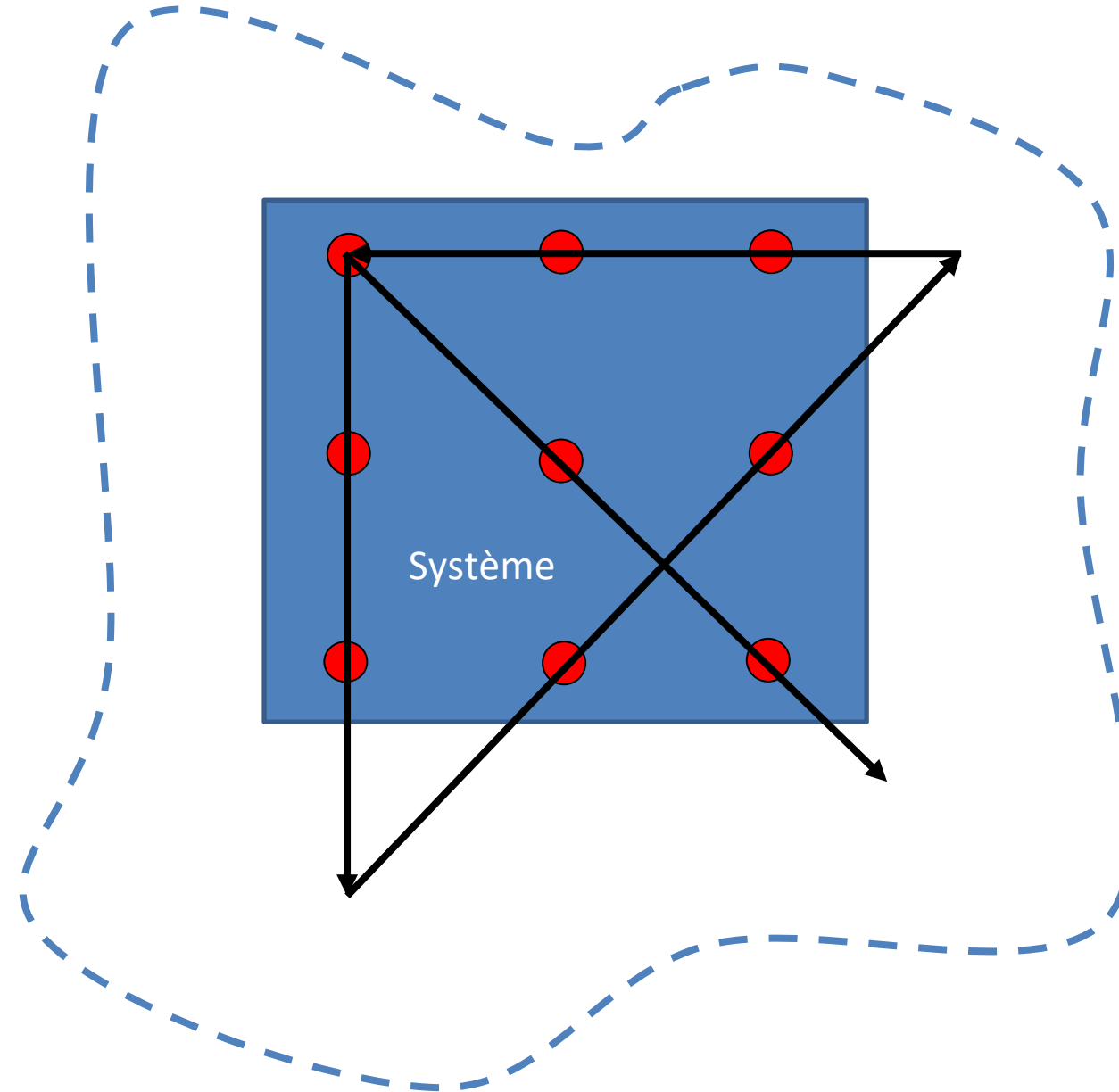
Le terme drone désigne surtout les appareils volants (en anglais: UAV – Unmanned Aerial Vehicle).

En tant que système cet artefact est un système complexe.

Cette présentation sera limitée aux appareils volants.



Environnement

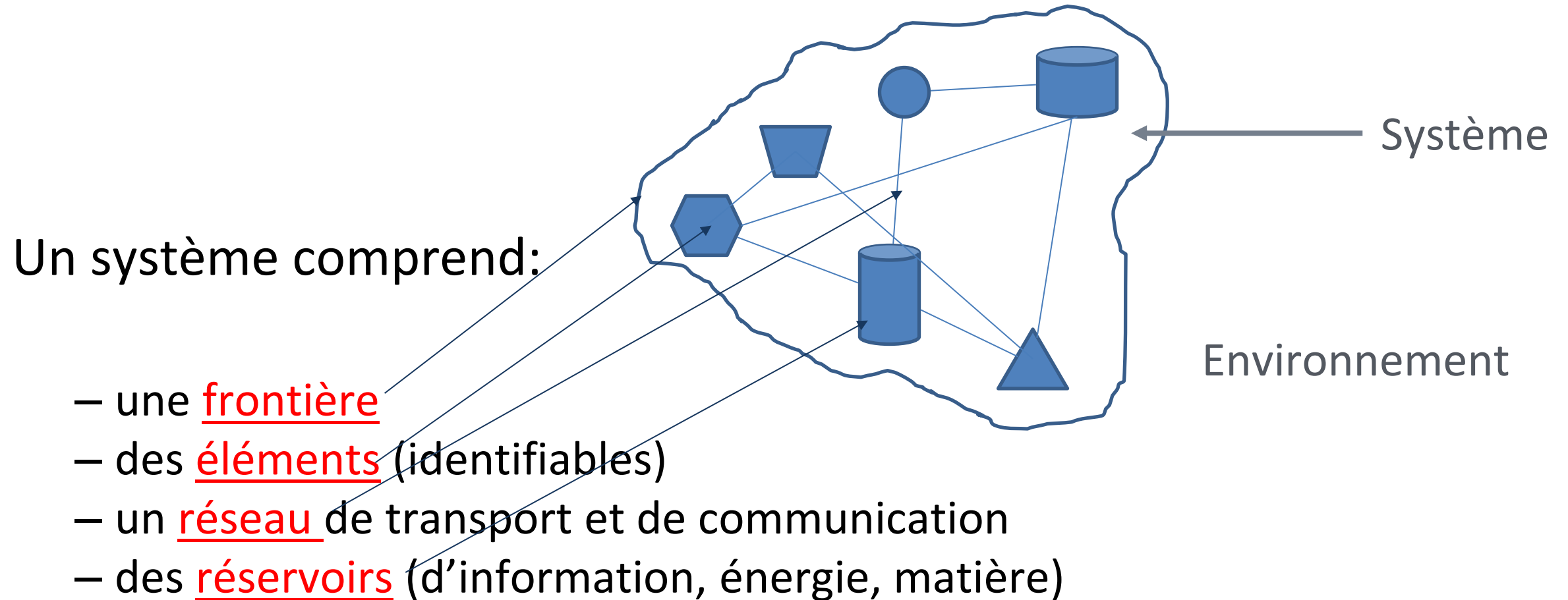


Systeme et systemique

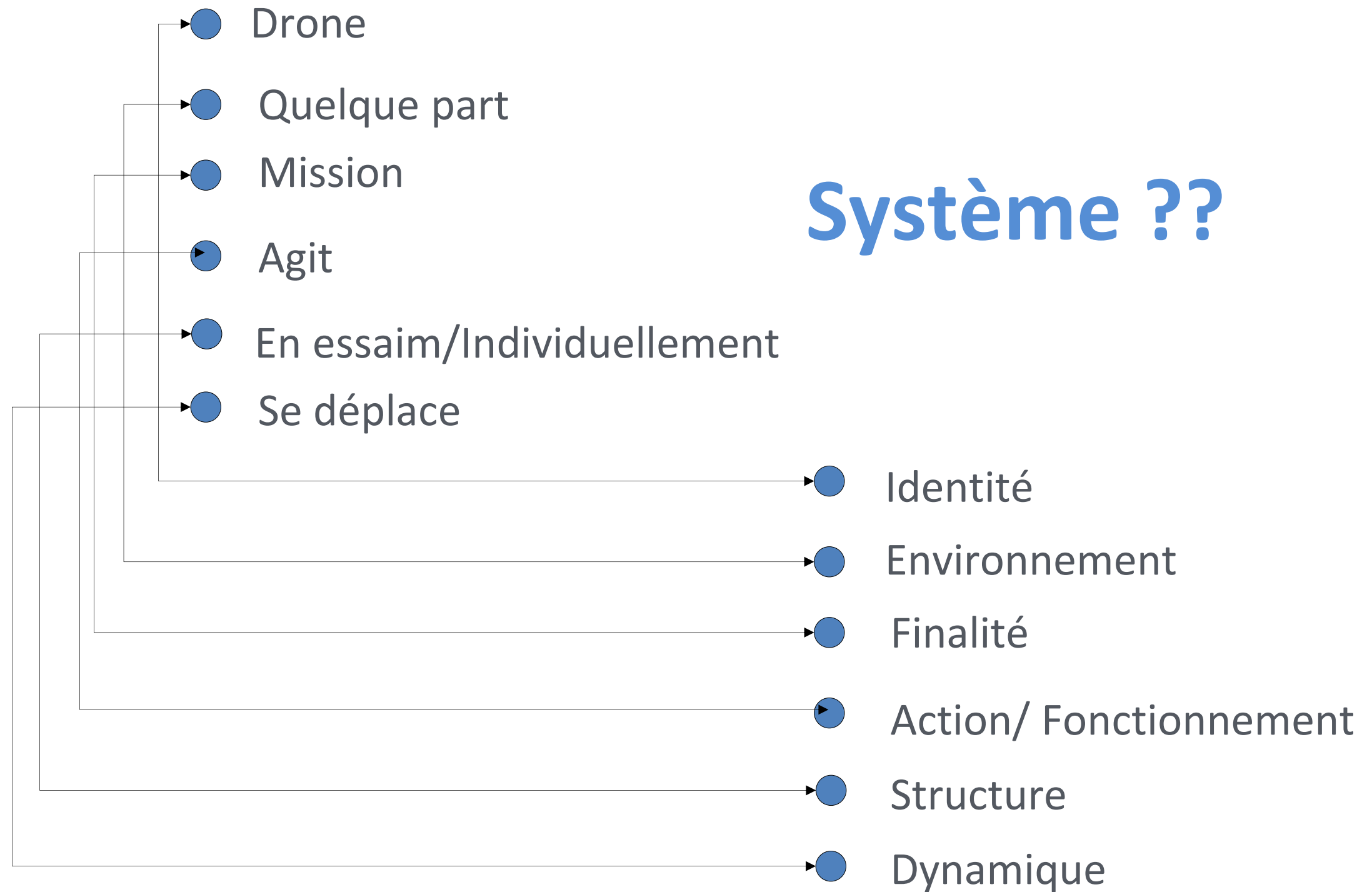
Quel problème s'agit-il de résoudre ?

- Créer des objets ou ensembles d'objets
- Comprendre leurs buts, objectifs, fonctionnement
- Résoudre les problèmes qu'ils posent
- Conduire ces objets et ensembles dans leurs environnements

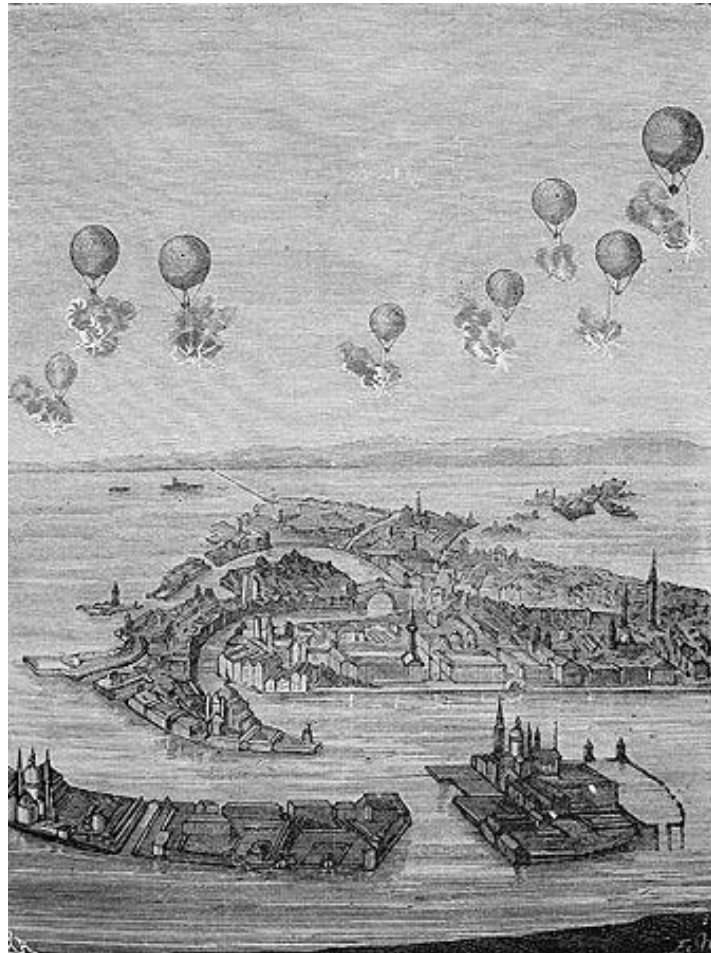
Description d'un système



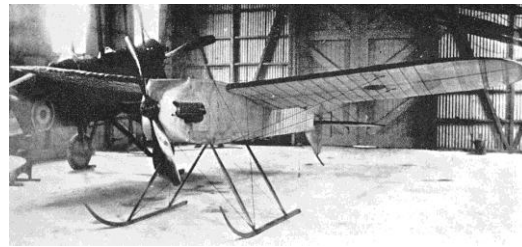
Systeme ??



Histoire



1840 Siège de Venise



1910



DH82B Queen Bee



Premier drone produit en série 1939
Radioplane OQ-2



Histoire



Premiers drones à réaction

1951 Ryann Firebee

Les drones modernes

Composants, caractéristiques, fonctionnement

Composants d'un drone

1. Structure et châssis

- Le cadre qui supporte tous les éléments du drone.
- Peut être en plastique, aluminium, fibre de carbone...

2 Hélices

- Génèrent la poussée pour faire voler le drone.

3 Moteurs

- Généralement 4 moteurs pour un quadricoptère
- Permettent de faire tourner les hélices
- ~~Alimentent l'ensemble du drone~~

4. Batterie

- Source d'énergie principale (souvent Li-Po ou Li-Ion)
- Fournit la puissance aux moteurs et aux autres systèmes
- Puissance et vitesse de décharge

5. Carte de vol (Flight Controller)

- Contrôleur du drone
- Analyse des capteurs et stabilisation du vol

6. Récepteur radio / Module de communication

- Radiocommande ou module optique fibre
- Transmet la vidéo et assure la télémétrie

7. Capteurs

- Accéléromètre
- Gyroscope
- Baromètre
- GPS (sur certains modèles)
- Capteurs d'obstacle (sur drones avancés)

8. Caméra (optionnel)

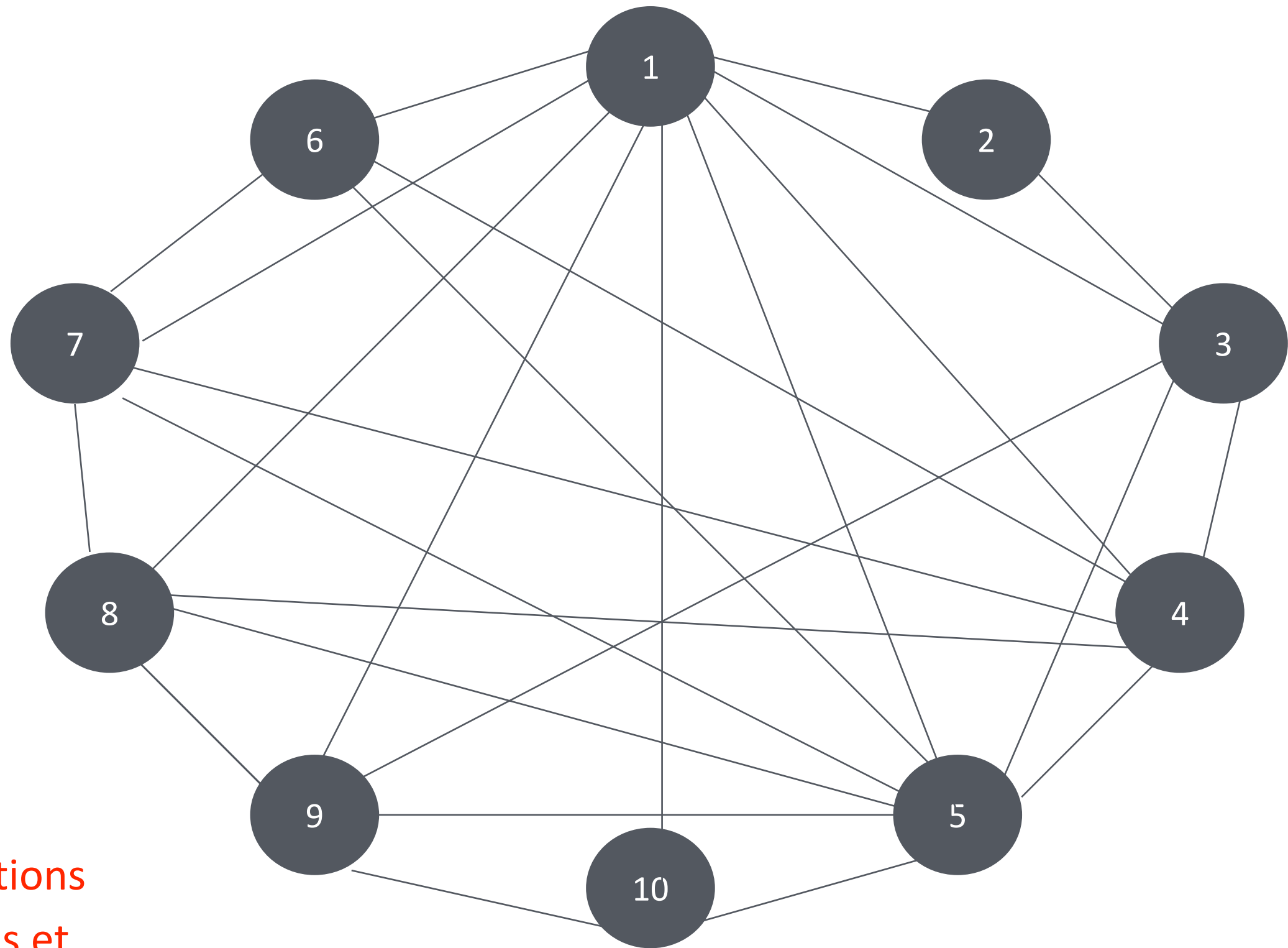
- Pour la prise de vue
- FPV (vue première personne)

9. ESC (Electronic Speed Controllers)

- Régulent la vitesse de chaque moteur selon ordres du contrôleur

10. Systèmes additionnels

- LEDs
- Modules de télémétrie
- Antennes spécifiques
- Support caméra (gimbal)



Interactions
de types et
d'intensités
différentes

Complexité

Drone de loisirs

AVANTAGES

- Excellente durée de vie de la batterie.
- Le positionnement global GPS assure la sécurité.
- Conception petite et portable
- Prise de vue de haute qualité
- Fonctions polyvalentes
- Faible latence
- Apparence « cool »
- Meilleur rapport coût-performance
- Moins de bruit
- Masse au décollage de 249 g pour éviter les exigences d'enregistrement
- Caméra haute définition 8K



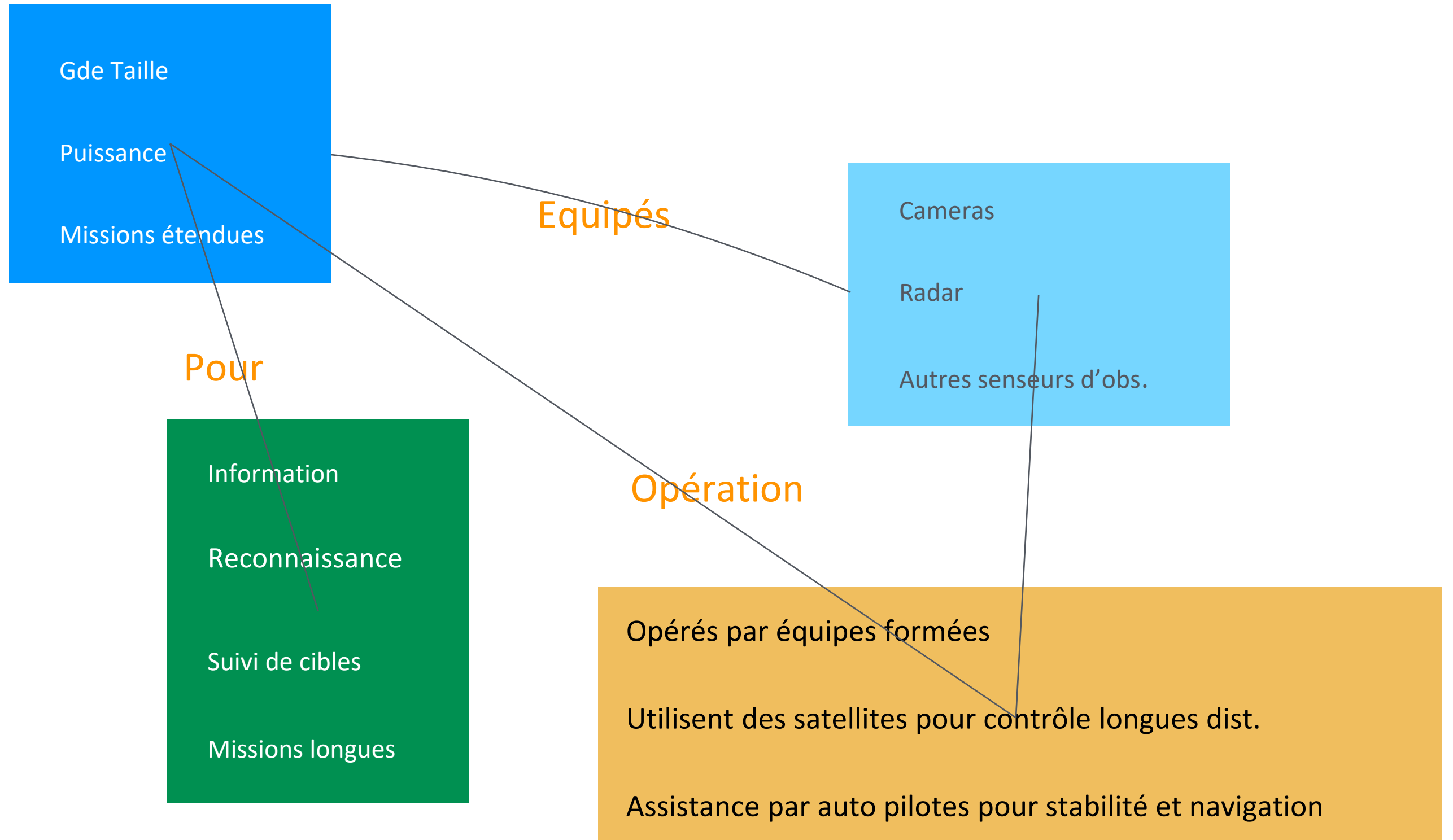
Le meilleur en 2025 - EONVY AIR +

Drones professionnels

Des utilisations nombreuses et diverses:

- Photos pro, cinema, spectacles, pub
- Inspection
- Cartographie
- Agriculture
- Logistique
- Surveillance, Sécurité
- Recherche
- Immobilier
- Tourisme

Grands drones (ex: Reaper)

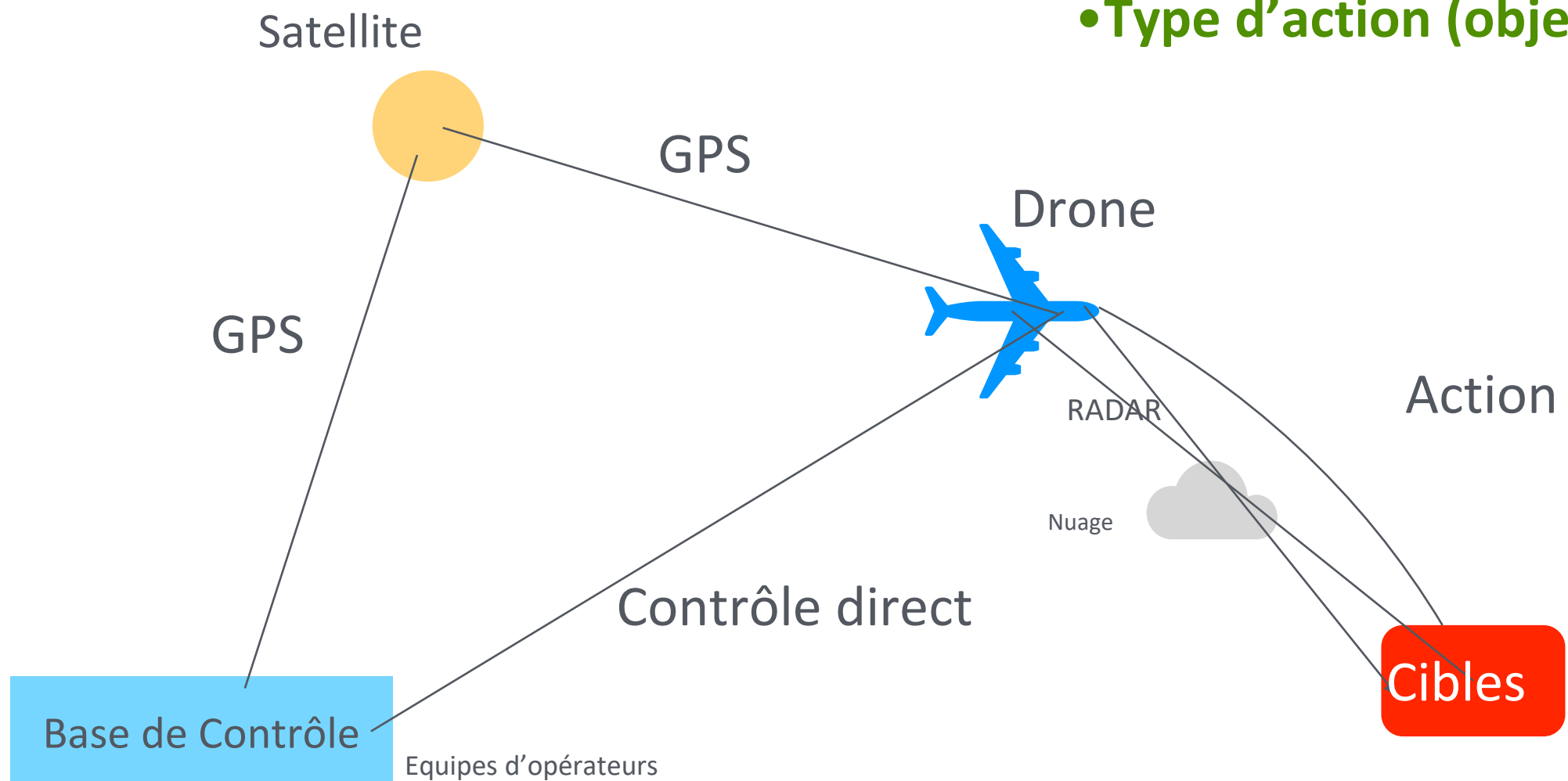


Fonctionnement d'un grand drone (ex: Reaper MQ-9)



Complexité

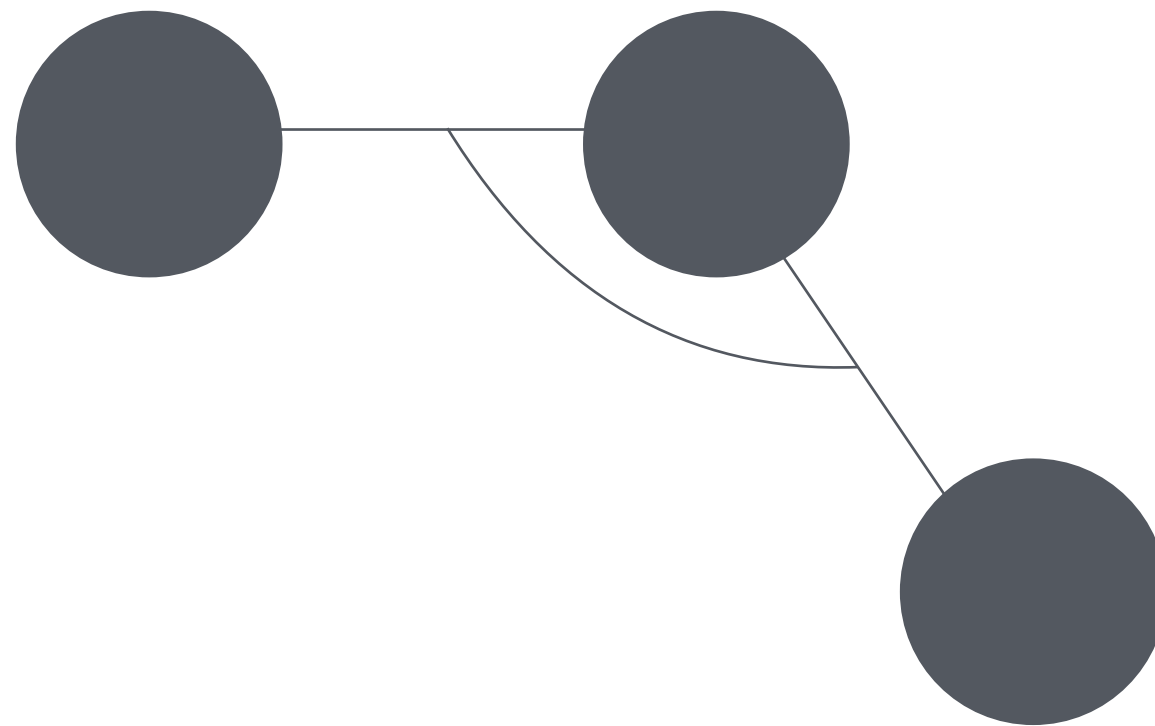
- Facteur humain
- Meteo
- Terrain
- Type d'action (objectif)



Essaims de drones

Origine: les Boids de Craig Reynolds

Règles assez simples pour se maintenir en essaim



Distance entre deux drones

Angles entre paires de drones par rapport à un troisième

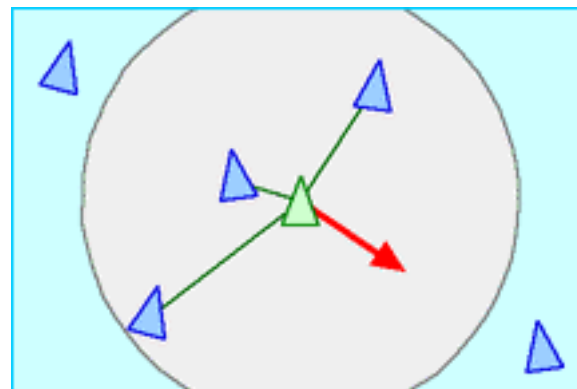
Vitesses de chaque drone dans limites strictes

Evitement d'obstacles

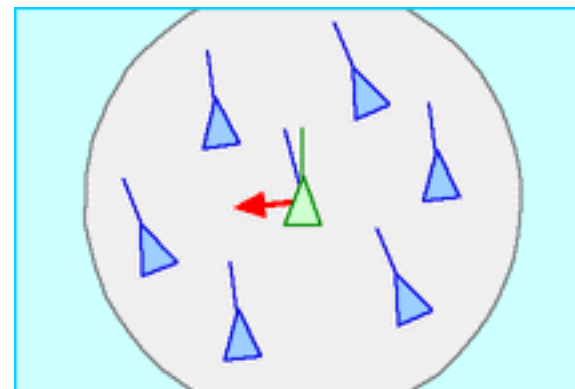


Wikipedia

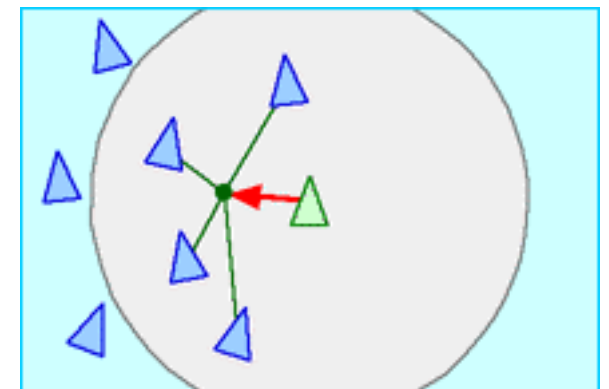
Separation



Alignement



Cohésion



Essaims de drones



Scalabilité

Adaptation

Résilience

mais

Sensibles aux pannes

Sensibles au brouillage

et

Utilisation:

- Spectacles
- Industrie (inspection, surveillance)
- Militaire

Problèmes éthiques



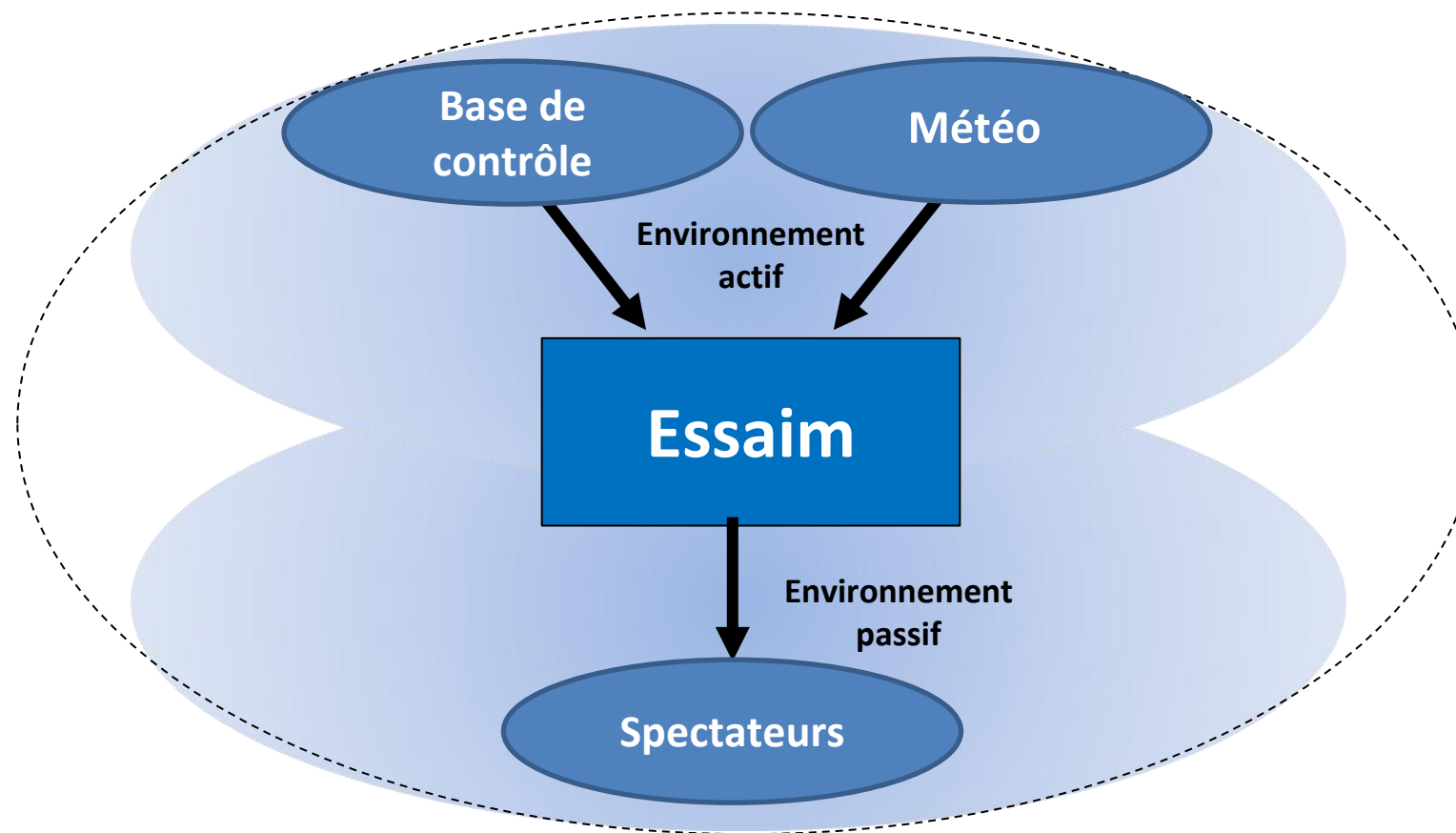
Spectacle Chinois de 10000 drones

20

Doc de JJ Lévy



Environnement d'un essaim



Il peut être utile de faire la séparation même si la réalité n'est pas séparable, pour mieux comprendre ce qui se passe

Règles, éthique

Les drones posent de nombreux problèmes, d'où:

- Nécessité de réglementation pour limiter l'usage

Loisirs

Usages professionnels

- Règles d'éthique dans l'utilisation militaire

Autonomie

Ciblage

Anti-drones



La nouvelle arme anti-drone:

le faisceau LASER

- Mais aussi des solutions « bio-mimétiques » : utilisation des faucons,
- Des filets sur des Km de routes,

...Et les solutions classiques avec des opérateurs humains directs

Quelques usages moins courants

- Satellites sur orbite très basse, 180Km
- Récupération du booster de New Glenn en mer, sur une plate-forme drone
- Essais dans le désert pour des drones prévus pour Mars
- Fermes agricoles autonomes ou coopèrent des drones volants et terrestres
- Livraison de défibrillateurs par drones suite à appel au 911 en Caroline du N
- 150M\$ pour délivrer par drones de médicaments et biens essentiels en Afrique
- Drones collecteurs de déchets (survol de l'Everest)
- Drone quadri de concours de vitesse
- Taxis -drones (en cours d'expérimentation à Dubaï)

Le drone, un système

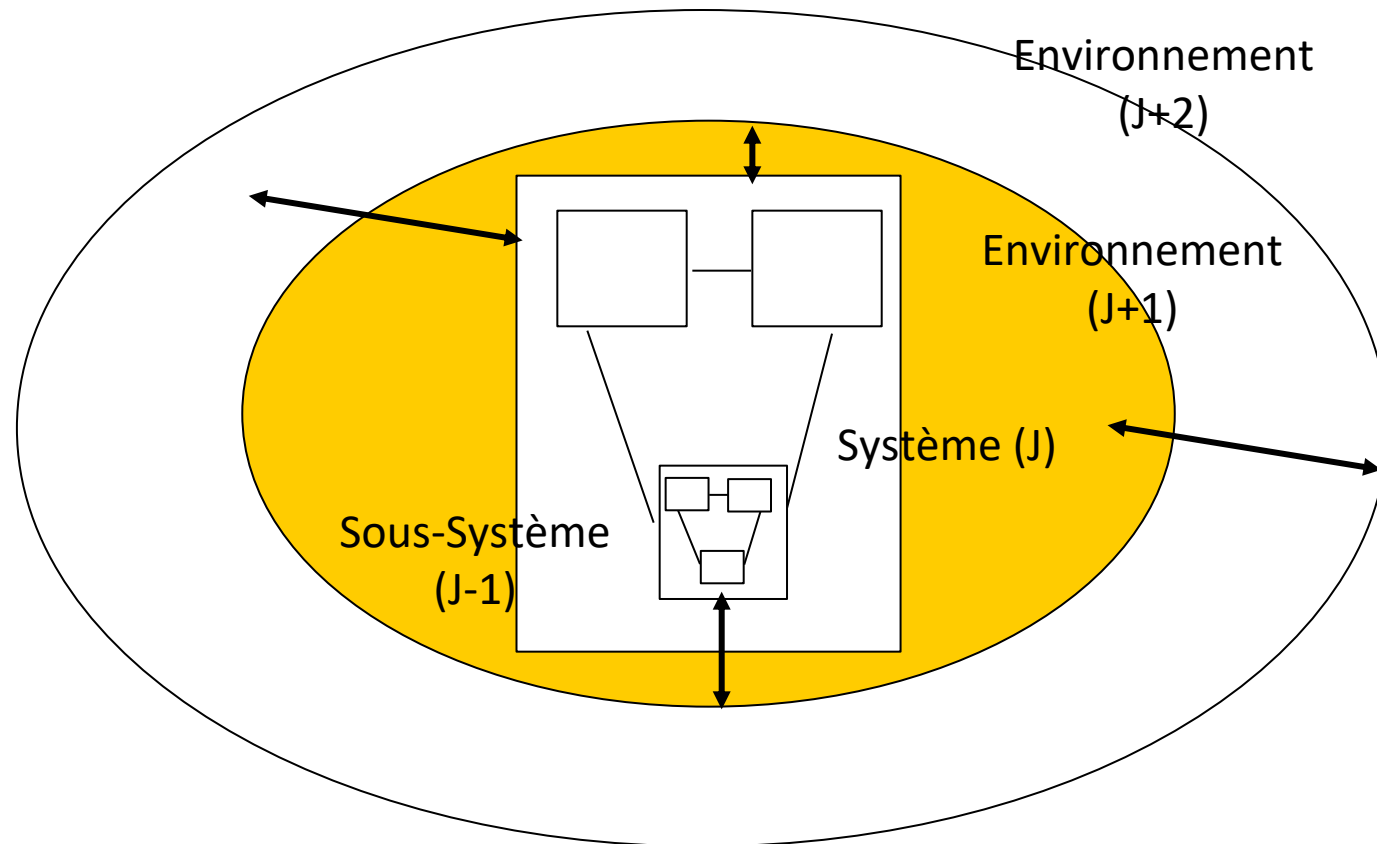
Des concepts essentiels des systèmes

- **Totalité (objet et environnement)**
- **Organisation (organigramme, programme, invariants)**
- **Complexité (facteur humain, nombre, interaction)**
- **Information**
- **Frontières**

L'organisation

- Agencement de relations entre les composants techniques et humains qui permet **l'émergence** de nouvelles propriétés
Le drone accomplira la mission qui lui est assignée et donc aura un résultat
- Aspect structurel: **l'organigramme**
Façon dont sont agencés les composants >> emboîtements
- Aspect fonctionnel: **le programme**
Relation opérateur-drone, invariants divers
- Implique:
Stabilité (de la structure et du programme)
Buts (seront atteints si le résultat attendu émerge)

Sous-systèmes, Emboîtement



Types de sous-systèmes

- Substituable
- Fonctionnel
- Neutre
- Disfonctionnel
- Complémentaire
- Antagoniste
- Indépendant

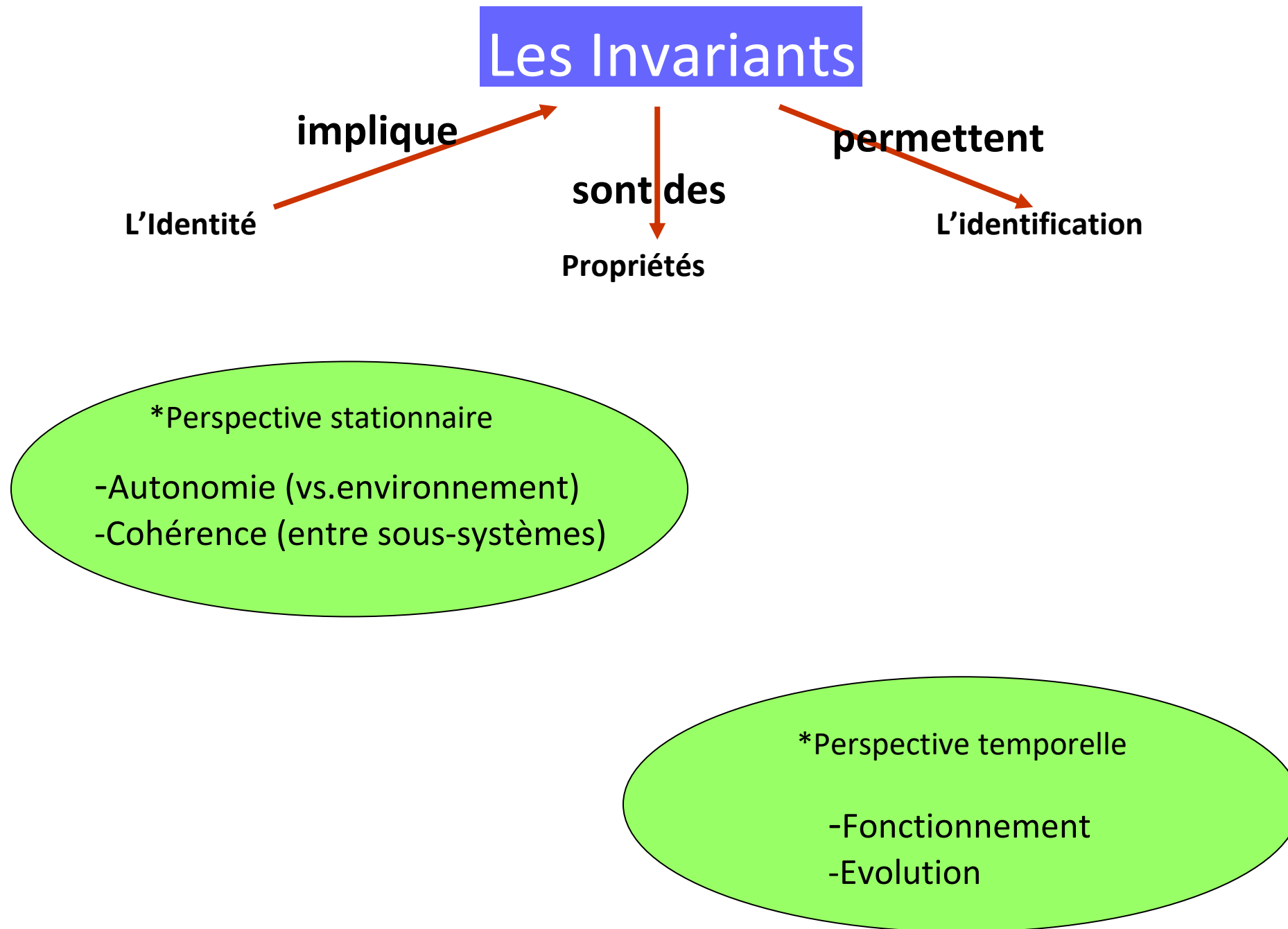
Système considéré = Drone

Sous-système = Carte de vol

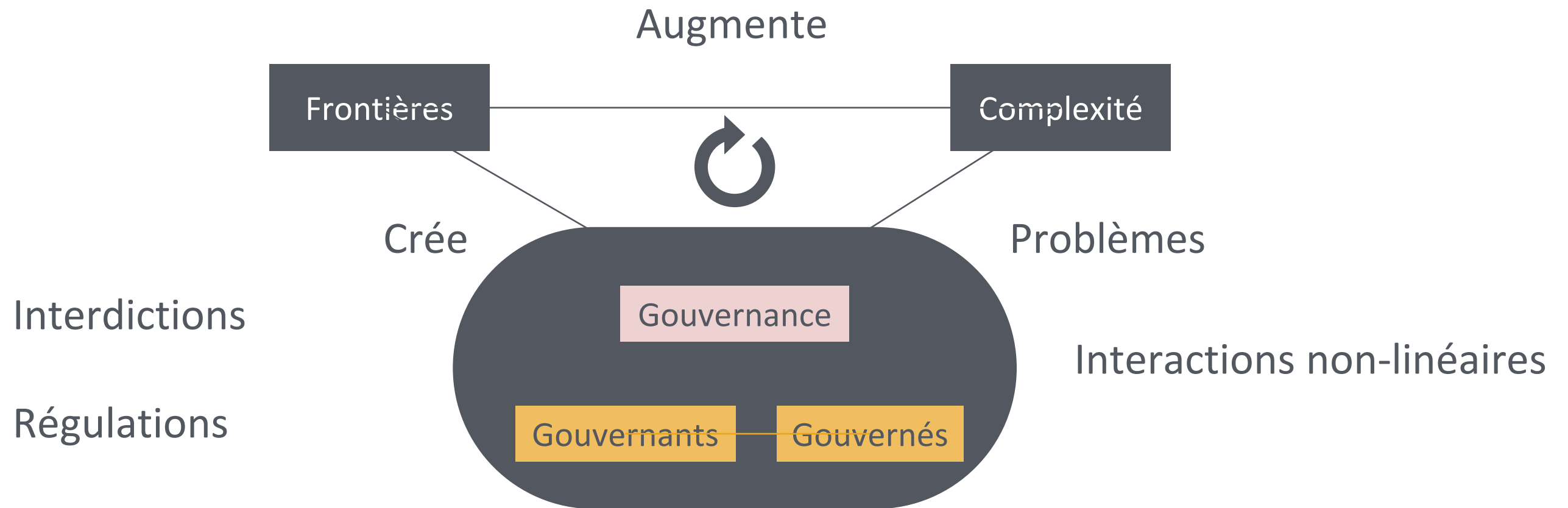
Environnement J+1 = L'opérateur du drone

Environnement J+2 = Le théâtre d'action

Invariants



Drones et gouvernance



Ensembles de systèmes qui se chevauchent

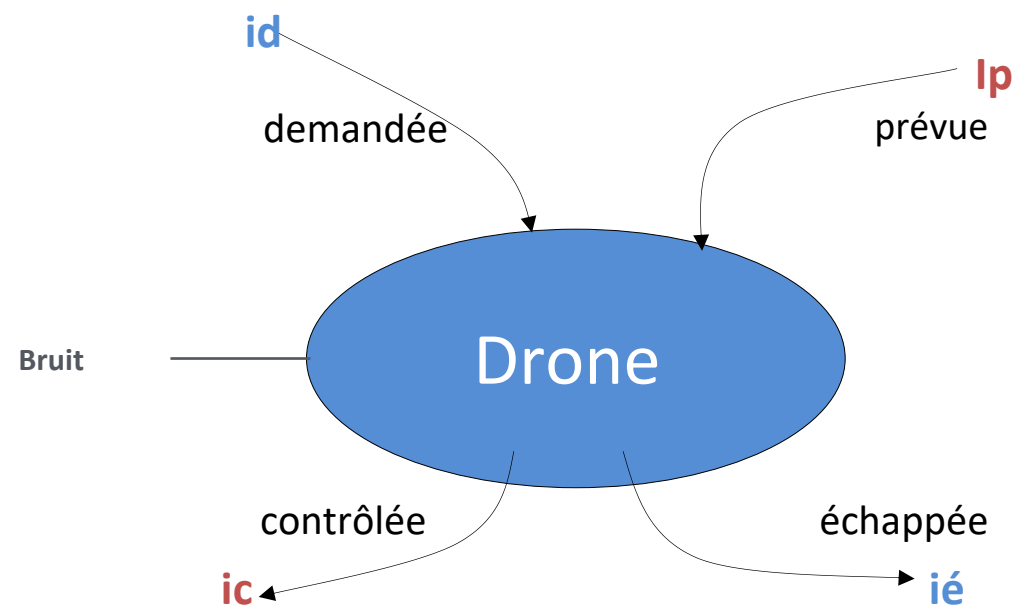
Frontières structurelles, fonctionnelles, temporelles

La complexité

- Implique de l' **aléatoire**, de l' **inconnu** , du **flou**
- Pour résoudre un problème complexe il faut du temps de la méthode et de l' intelligence
ne pas faire la confusion entre
complexe et compliqué
- Dépend des éléments et de leurs relations (nombre et type d'interaction)
- Est devenue une discipline en soi, est une **dimension essentielle des systèmes**

L'information

Information reçue (captée)



Information donnée (émise)

Transmission

dans le temps >> mémoire

dans l'espace >> mouvement

Changement (transformation)

de forme >> codage/décodage

de contenu >> calcul

Contrôle

Frontières

Forme (limites de l'objet)

Limites techniques

Type d'environnement

Facteurs humains (H-H, H-M)

Prix

Type d'utilisation

Civile

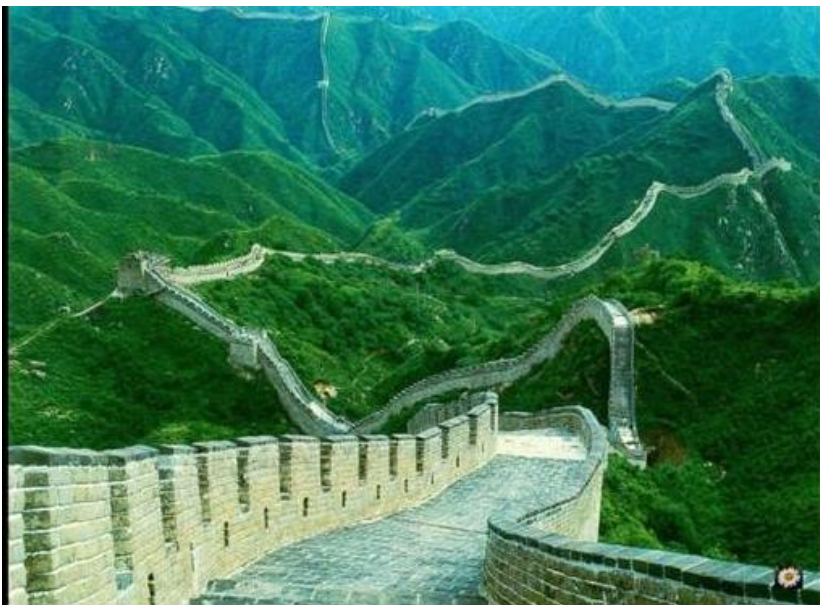
Professionnelle

Loisirs

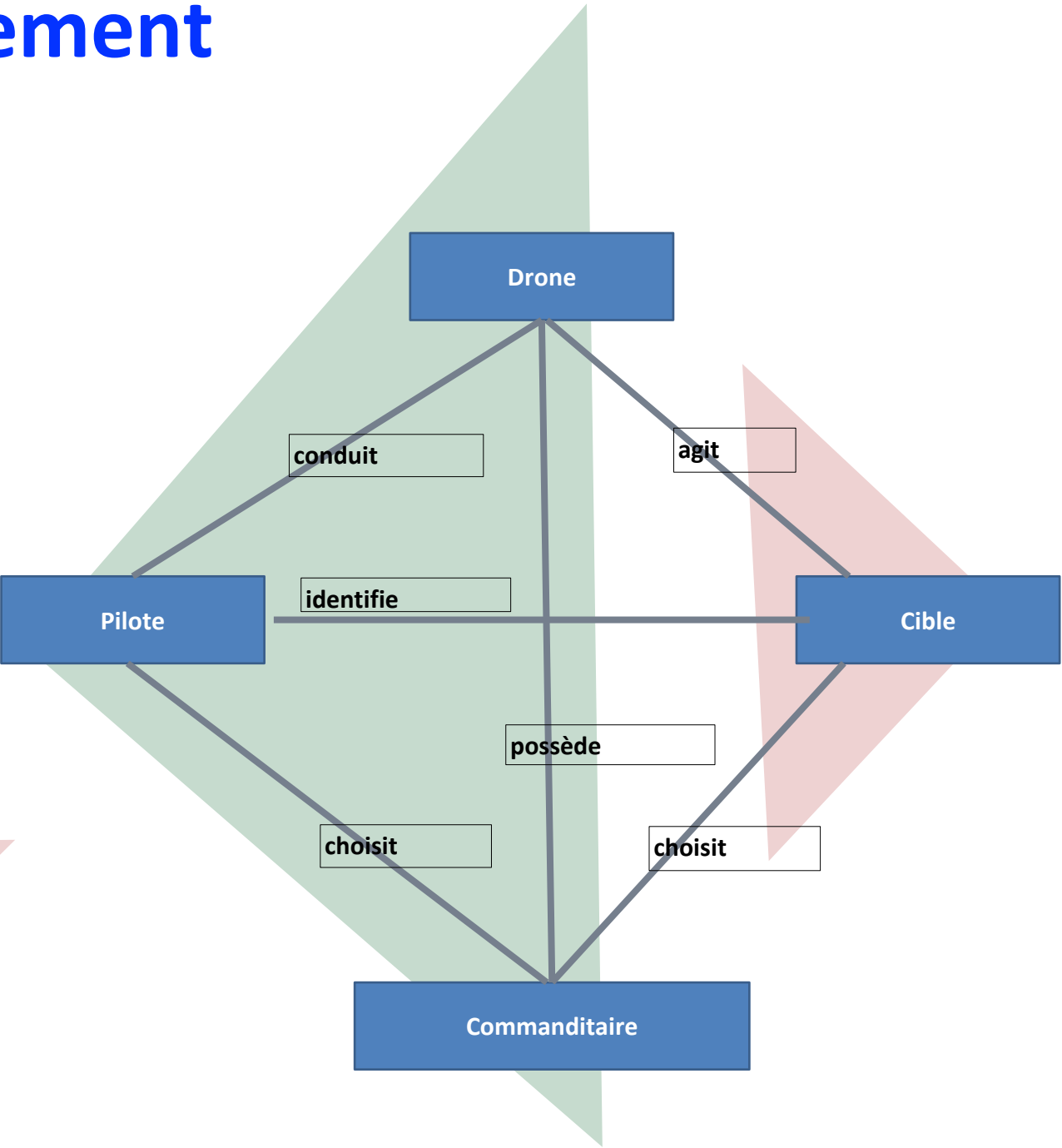
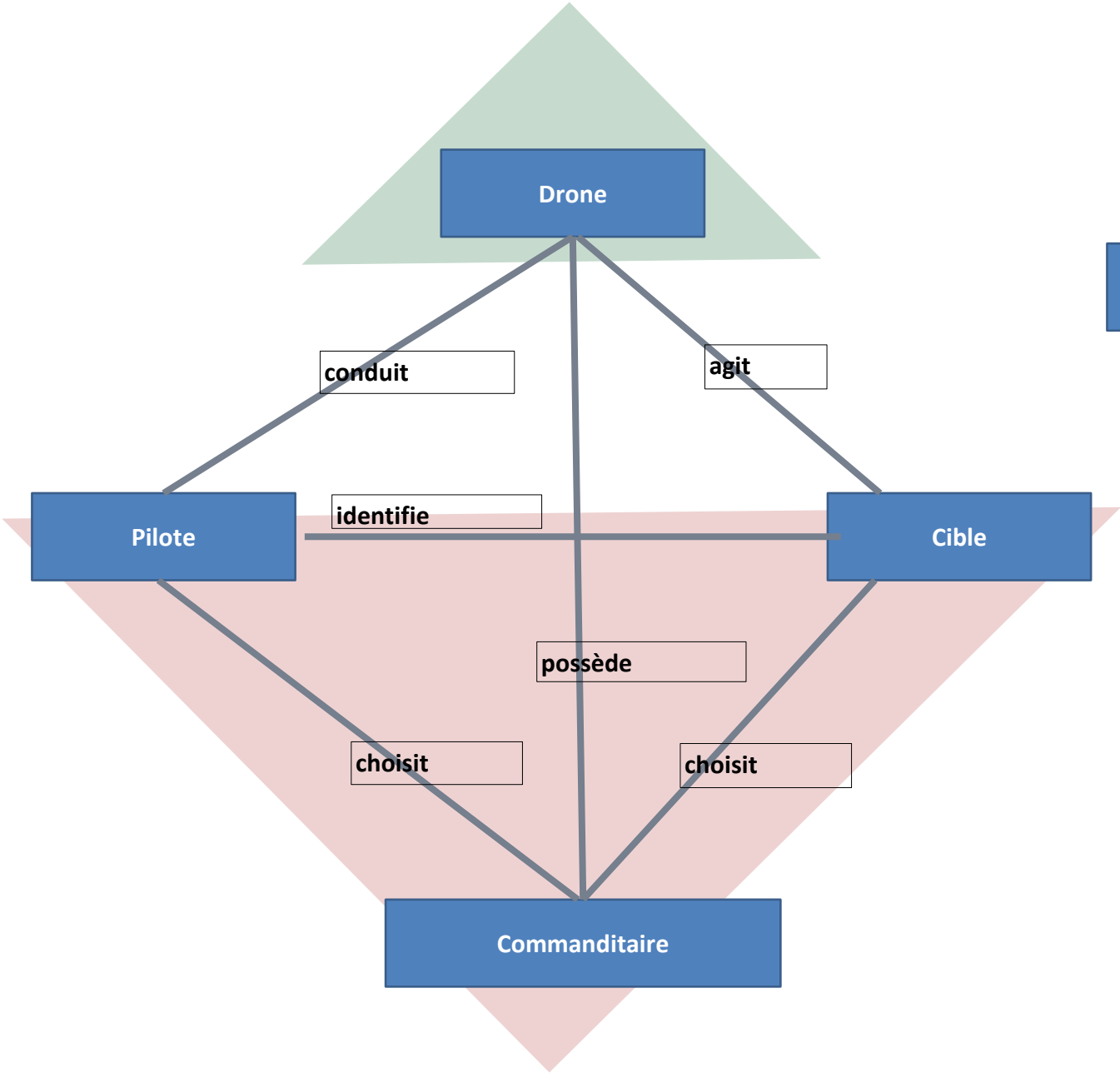
Militaire

Surveillance

Action



Environnement

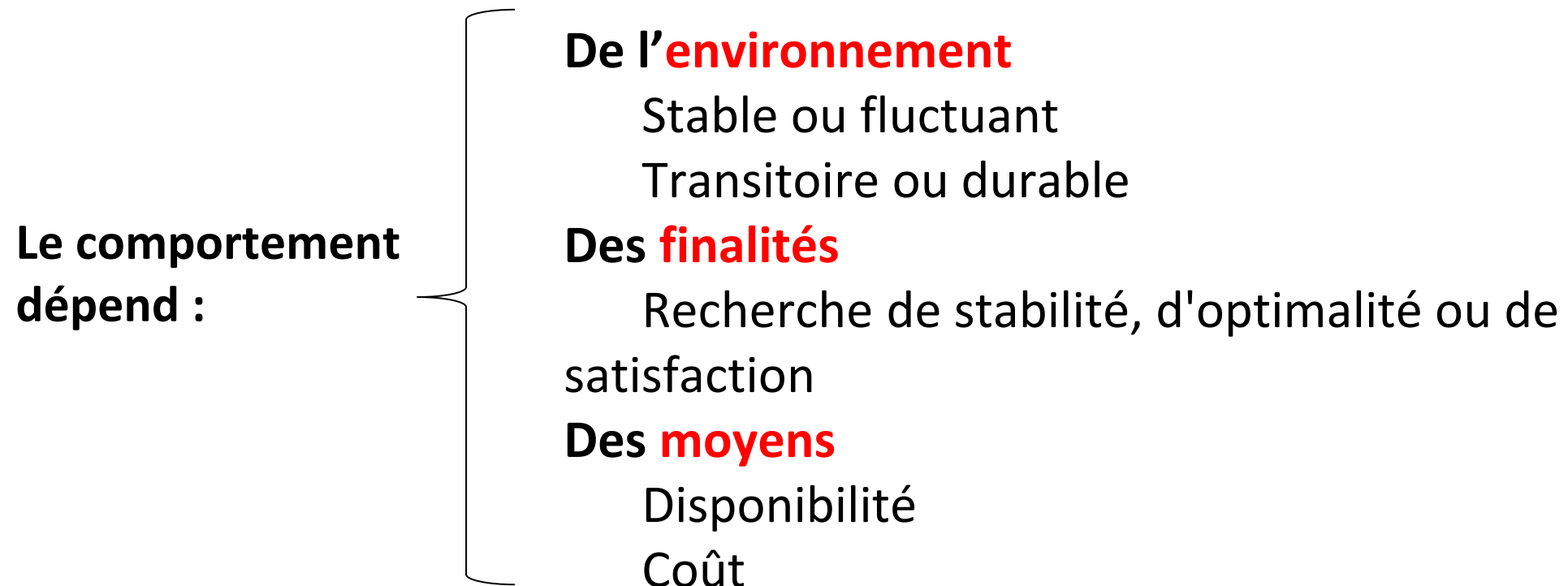


Le comportement

- Tout système adaptatif adopte un comportement favorable à ses finalités en tenant compte de l'environnement
 - **Lutte**
 - Modification de l'environnement
 - **Adaptation**
 - Utilisation de ses variables internes pour modifier les effets des entrées (les atténuer ou les compenser)
 - **Fuite**
 - Changement de lieu
 - Abandon de l'environnement
- Le comportement dépend de la structure et du fonctionnement son étude permet l'évolution du drone (ou de l'essaim)



Le comportement



Le comportement et les relations qui en découlent:

- Relation **environnement / finalité**
 - Favorable / défavorable
- Relation **action système / environnement**
 - Modification ou observation de l'environnement
- Relation **action système / finalité**
 - Réussite/Erreur

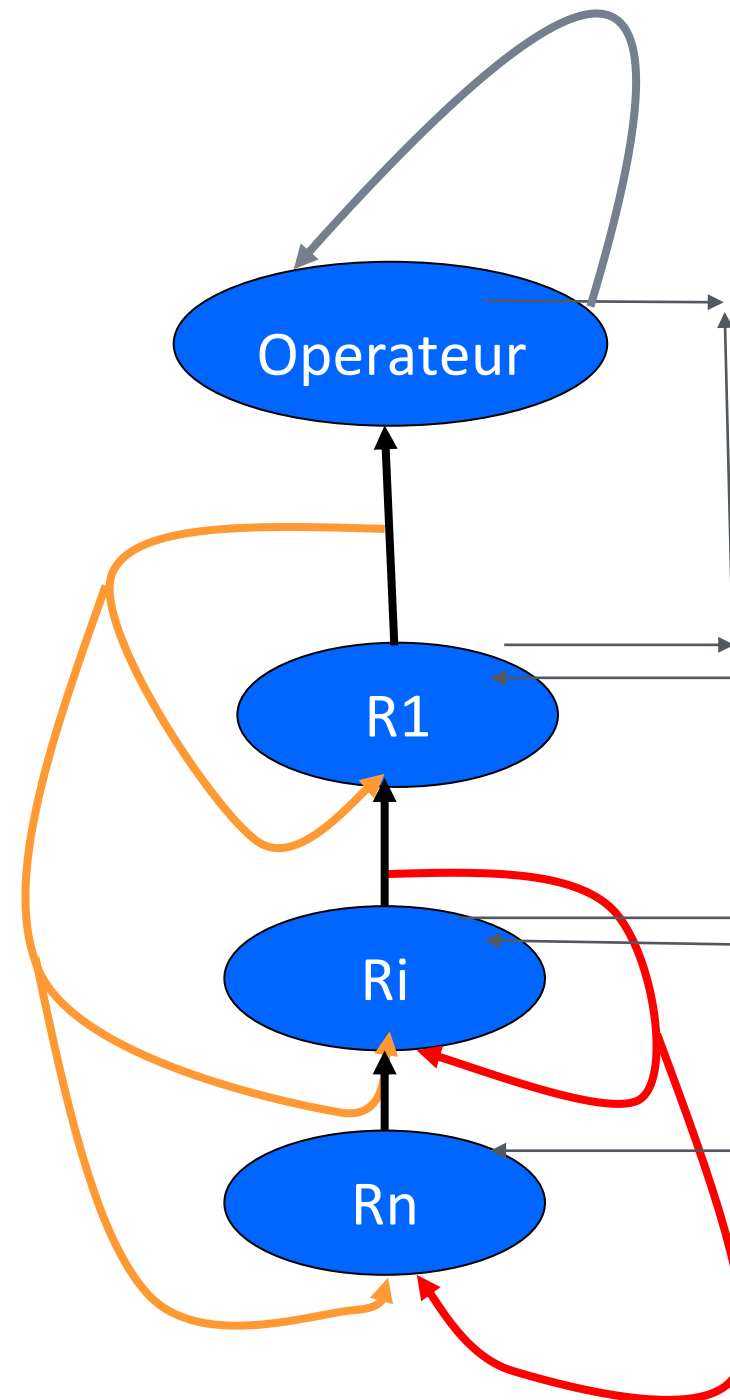
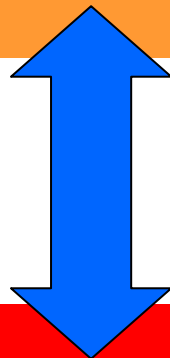
Dynamique, régulation , hiérarchies

Niveaux de régulation:

- opérationnel → execution
- tactique → régulation
- stratégique → contrôle
- politique → coordination

Court terme
Rythme rapide
Objectifs

Long terme
Rythme lent
Finalités globales



➡ **HIERARCHIES et RETROACTIONS**

Sources d'information

- Wikipedia (français, anglais)
- Google et sites divers
- Chat GPT
- Facebook, Youtube
 - Sites constructeurs (Parrot, DJI, Reaper, Thales)
 - Science et Vie (et cahiers), Epsilon
 - Mon cours de Systèmes à l'IMA

Tentative de conclusion

- Une approche système permet de mieux comprendre pour mieux agir
- Les drones ont créé une révolution dans l'utilisation des objets volants
 - Visibilité forte pour le domaine militaire et les loisirs
 - Utilisation civile industrielle au début, mais progresse
- Ce sont des systèmes complexes par:
 - Le nombre de composants interactifs
 - Le facteur humain omniprésent
 - La non-linéarité des interactions
 - La porosité des frontières
- Ce sont des systèmes dont le prix très est faible, notamment dans le domaine militaire, par rapport aux objets volants classiques
- Les sources d'information sont très nombreuses et riches

Je vous remercie!

Joyeuses Fêtes de Noël et de Nouvelle Année!

Le drone de Gérard ZIVY

