



La démarche d'Ingénierie Système

Yann Pollet

Conservatoire National des Arts et Métiers

Chaire d'intégration des systèmes

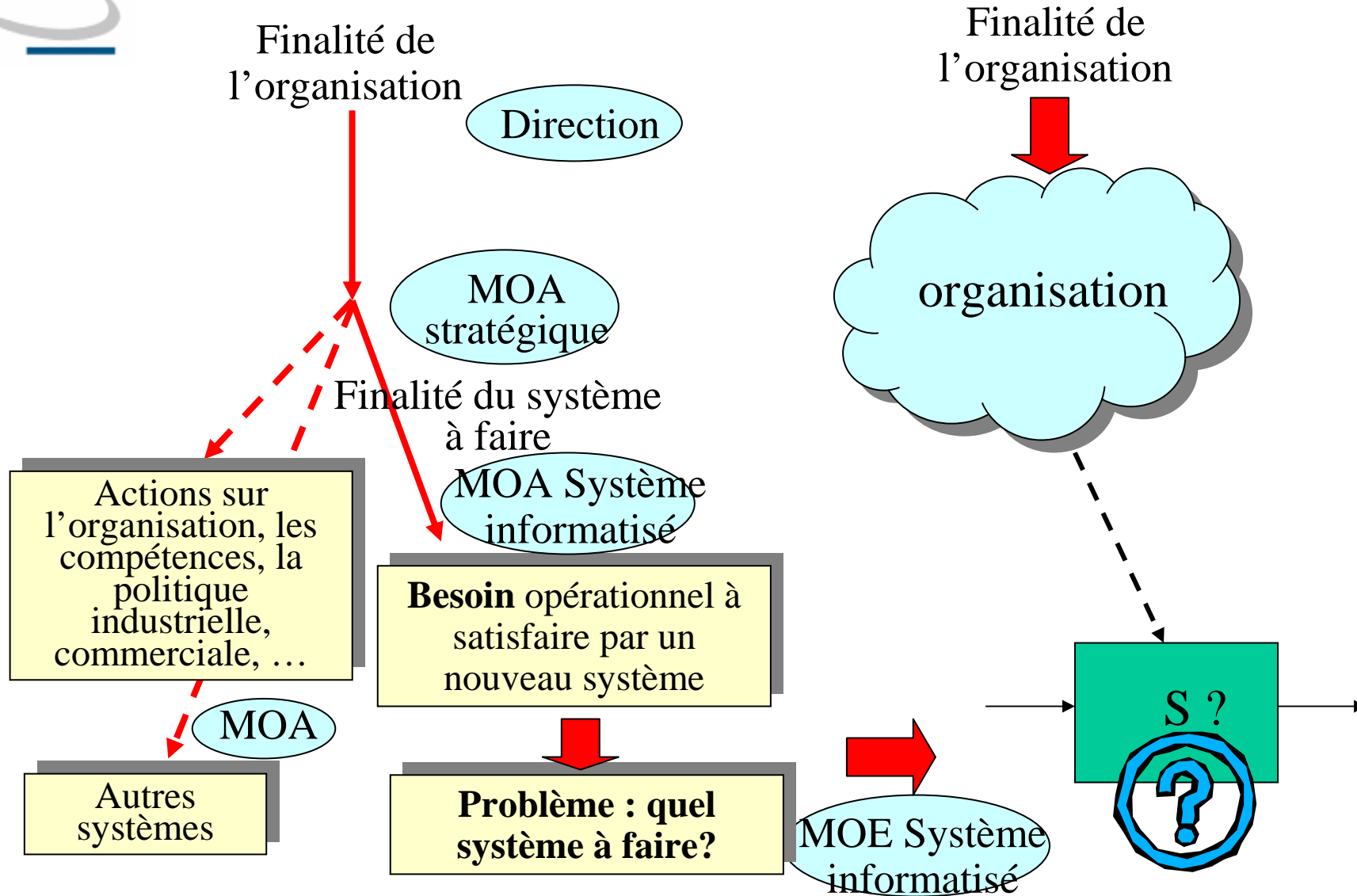
La démarche d'Ingénierie Système

- L'expression du besoin
- L'Ingénierie des Exigences
- La démarche d'analyse fonctionnelle / logique et la conception de systèmes



L'expression du besoin opérationnel

Finalité et besoin opérationnel



Finalité, besoin, exigences

Satisfaction d'un besoin \Rightarrow formalisation
d'un problème à résoudre

« Besoin »

\neq

« Problème »

Exigences auxquelles le système devra satisfaire

- **attentes et contraintes** des utilisateurs, usagers, exploitants, et de l'ensemble des parties prenantes
- résulte de la finalité
- Perception sous l'angle du service rendu, du produit délivré, de l'effet sur l'environnement

- Préciser ce que **doit faire** le système en faisant abstraction du « comment »
- Peut s'affiner au fil des choix techniques
- Ajoute les exigences des parties prenantes réalisatrices

Les « parties prenantes »

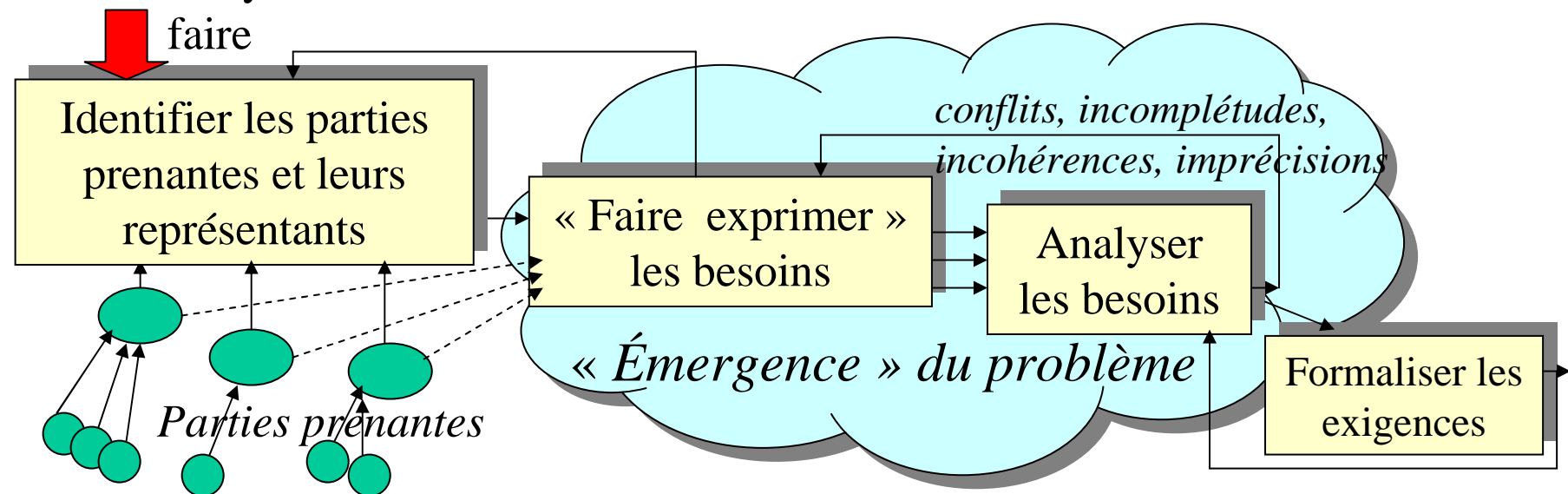
- Personnes physiques et organisations concernées directement ou indirectement par le futur système
- Réaliser un système répondant aux attentes et contraintes des usagers directs et acceptables par les autres
- Parties prenantes « intéressées »
 - Management MOA
 - utilisateurs directs, représentants de futurs clients (marketing, associations)
 - Personnes concernées par le système (ventes, actionnaires, ...)
 - Opérateurs exploitants
- Parties prenantes « impliquées »
 - Réalisation ou MCO du produit
- Parties prenantes « potentiellement concernées »
 - Impact du système à plus ou moins long terme

L'émergence des besoins

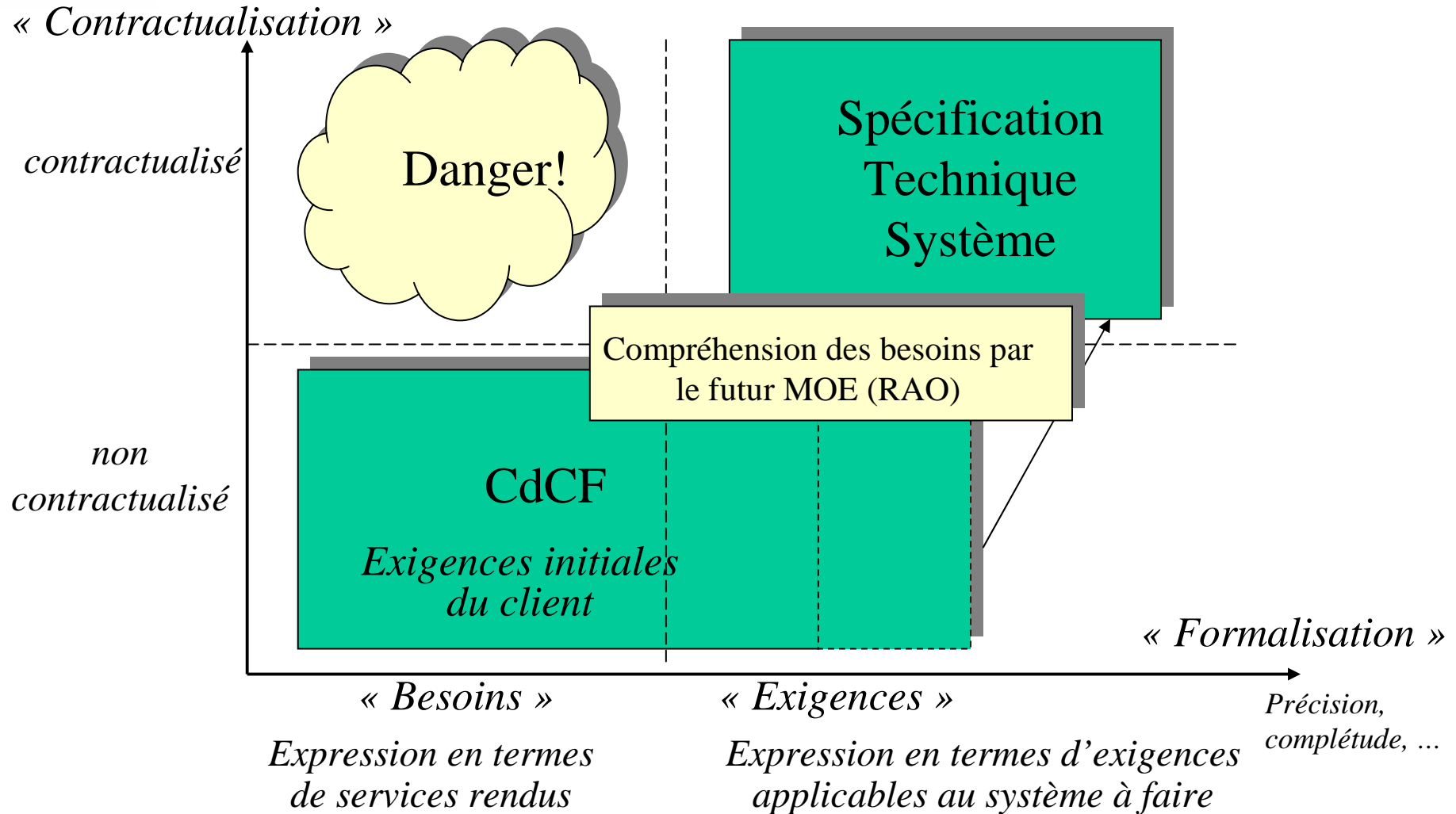
Multiplicité des parties prenantes \Leftrightarrow (*usage français*):

- **MOA** : représentant unique des parties prenantes liées à l'utilisation, à l'exploitation
- **MOE** : représentant des parties concernées par la conception, le développement, la production d'exemplaires multiples

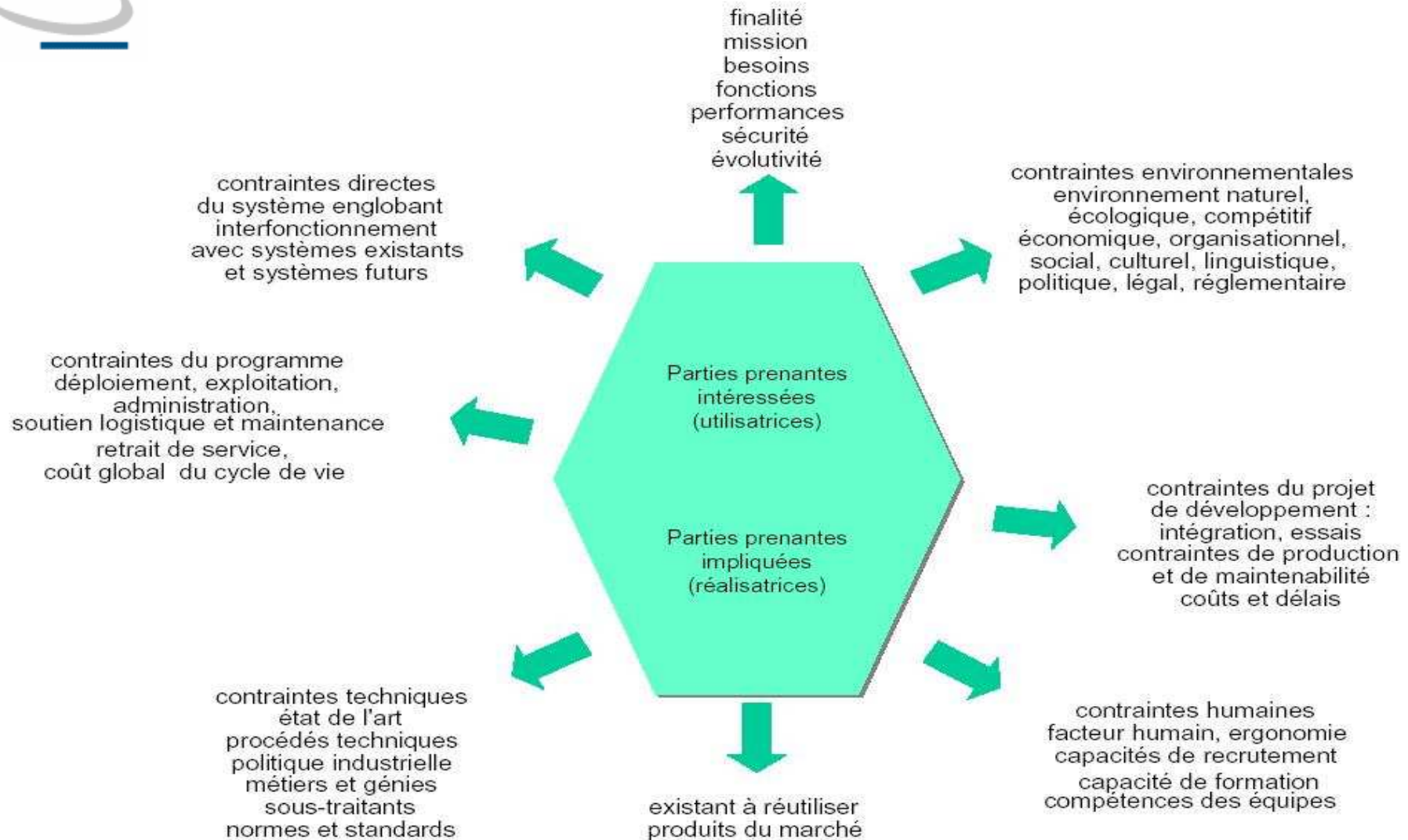
Finalité du système à



Besoins, exigences

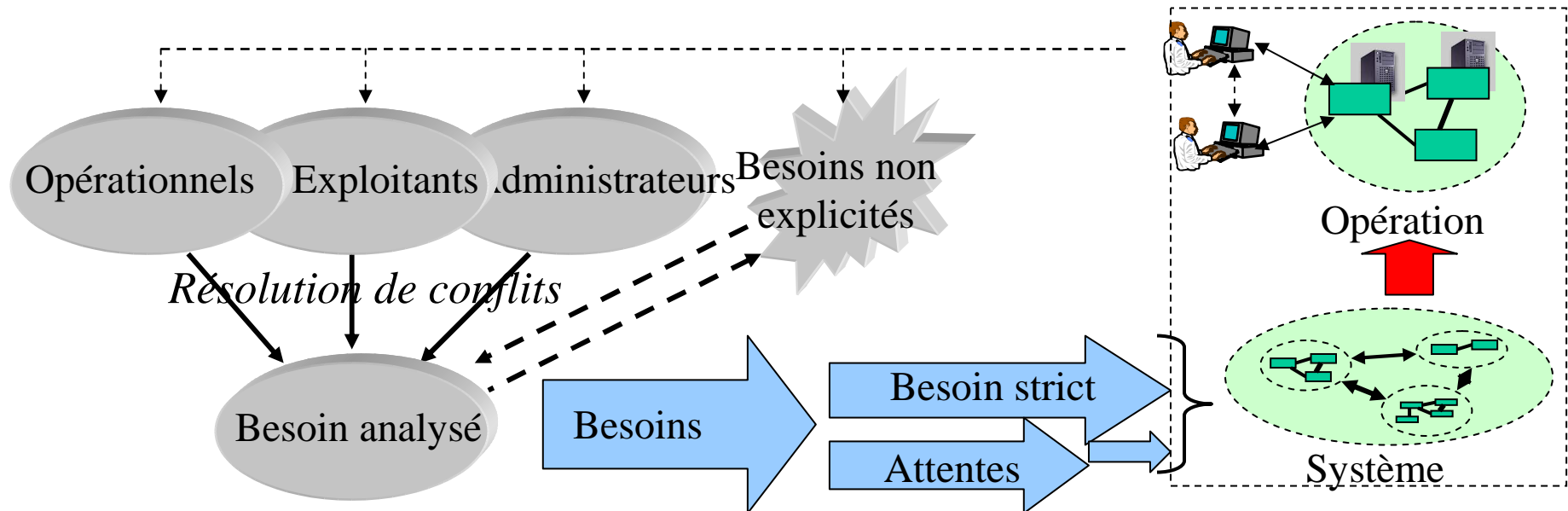


Sources des attentes et contraintes

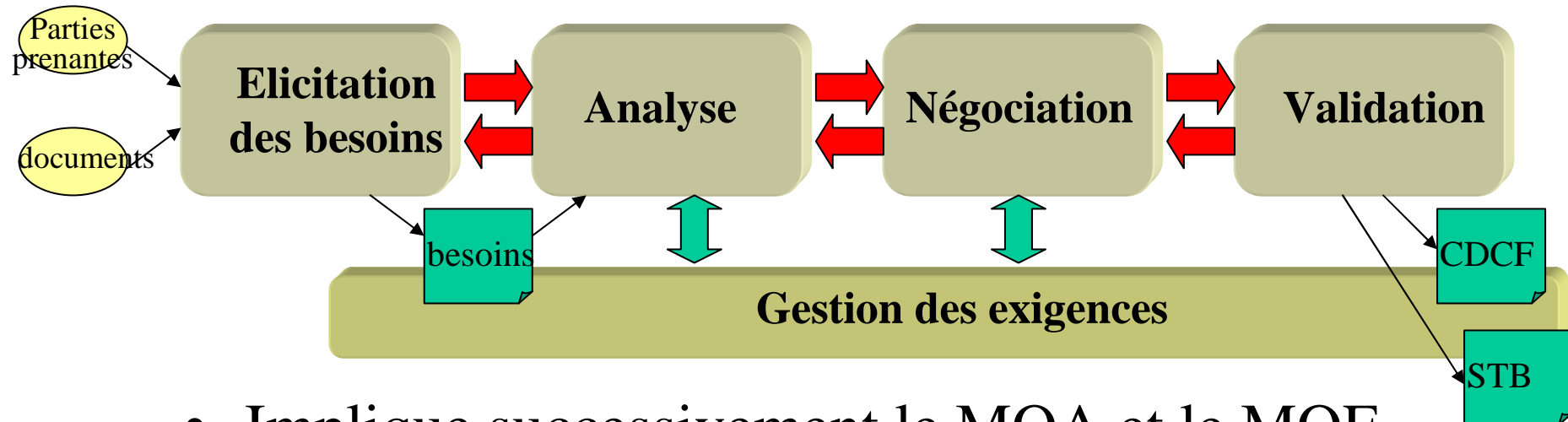


Le cycle des besoins

- Analyse des besoins MOA (études préalable) ⇒ cahier des charges (CDCF)
- MOE ⇒ Spécification des Exigences Système
- Problème d' extraction des véritables « besoins » :
 - multiplicité, instabilité et inconsistance des expressions
 - mise en évidence des besoins non explicités
 - séparation contrainte stricte / attente, gestion des conflits
 - anticipation (convergence itérative)

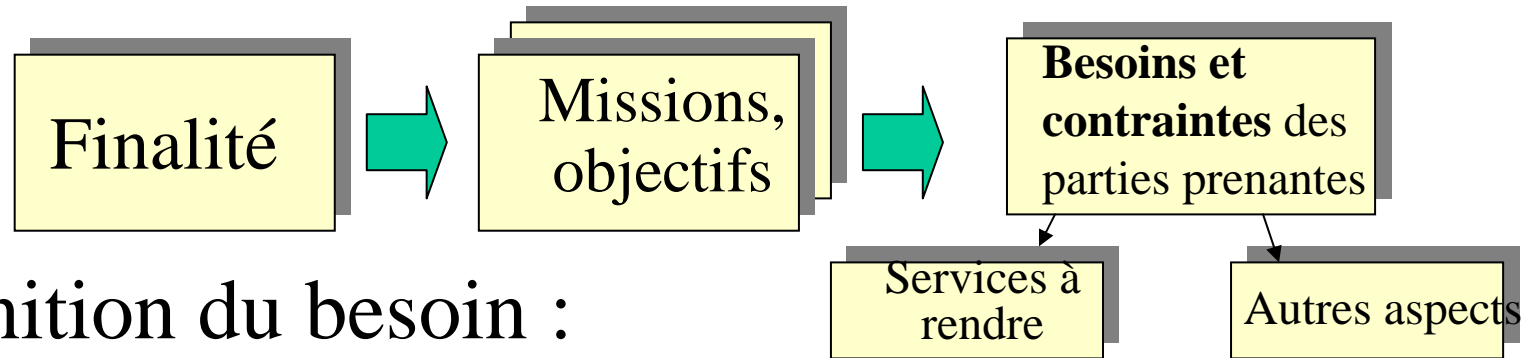


Activités d'ingénierie des exigences



- Implique successivement le MOA et le MOE
- Récursivité système / sous-système dans la démarche d'ingénierie
- Traçabilité des évolutions, des liens d'allocation et de « transformation »

Le besoin opérationnel



Définition du besoin :

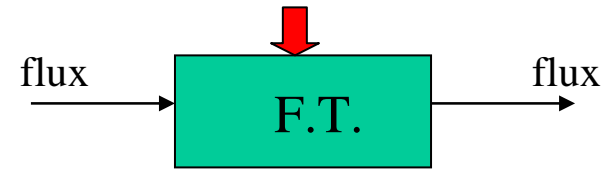
- Les **besoins fonctionnels** et **attentes** nécessaires à la réalisation des missions \Rightarrow ce que le système doit FAIRE et avec quelles performances \Rightarrow Fonctions de service
- Les contraintes et aspects non fonctionnels \Rightarrow influence ce que le système doit faire en lui imposant des **aptitudes**, **performances** ou **caractéristiques** non directement associables à des fonctions

Les besoins fonctionnels

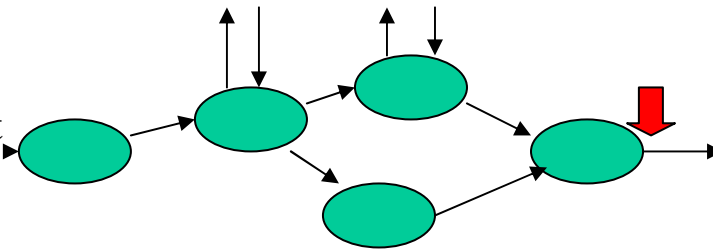
- Besoins fonctionnels = ce que doit FAIRE le système pour répondre à sa finalité
- **Missions** = ce que le système doit accomplir dans les différents contextes d'opération
 - ⇒ Le *concept d'opération* décrit de façon macroscopique ce que doit faire le système et pourquoi + Performances et **objectifs clés** à atteindre
- **Scénarios opérationnels et services**
 - Une mission s'analyse comme un enchaînement de *services* rendus à l'environnement par le biais de *fonctions*
- **Scénarios et fonctions logistiques**
 - ⇒ Besoin en MCO (ravitaillement, maintenance, ...) ⇒ scénarios et fonctions logistiques

Différents types de fonctions de services

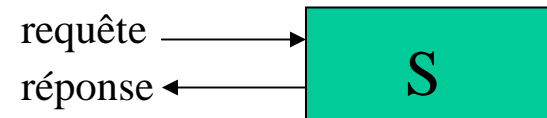
- Transformation



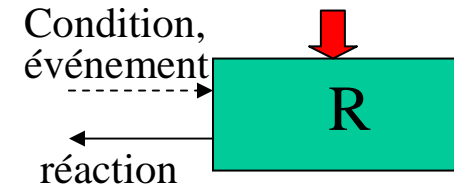
- « Processus » Événement



- Requête



- Régulation



Besoins non fonctionnels, contraintes

- Contraintes (opposées à « besoin »)
 - Exprimées par les parties prenantes
 - Issues de l'environnement
- Expriment des **propriétés, aptitudes capacités, performances** que devra présenter la solution \Rightarrow restreignent les choix techniques
- Exemples. Contraintes :
 - d'environnement physique
 - se sécurité
 - liées à l'environnement social
 - économiques, marché, concurrence
 - industrielles : standards, accords
 - réglementaires : loi, règlement, certification
 - logistiques : maintenabilité, testabilité, aptitude au déploiement
- Caractéristiques non fonctionnelles si on peut exprimer une exigence que comme une propriété globale du système, non réductible en première analyse à des fonctions

Démarche d'expression et de spécification du besoin

Démarche d'obtention du besoin (MOA, CdCF)

- Aspects relationnels avec les parties prenantes multiples
 - Analyse et recadrage des besoins exprimés (conflits, incohérences, contraintes antagonistes)
 - Intégration dans un ensemble complet et cohérent
 - Analyse de l'existant (en particulier humain, organisation)
 - Analyse de mission, simulation des scénarios
 - Analyse d'impact sur l'environnement indirect
 - Vérification d'opportunité et de faisabilité
 - Validation des besoins
- **Activité d'ingénierie du besoin**

Etudes préliminaires

Pour les systèmes « nouveaux » :

- **Etude de finalité** \Rightarrow consensus sur le problème à résoudre et le but
- **Conceptualisation** \Rightarrow définition macroscopique des missions
- **Faisabilité** \Rightarrow existence plausible de solutions dans l'état de la technique et des coûts
- **Opportunité** \Rightarrow étude préliminaire d'impact sur l'entreprise, études de marché
- Utilisation de démonstrateurs, prototypes, simulations, maquettes

Recueil des besoins des parties prenantes

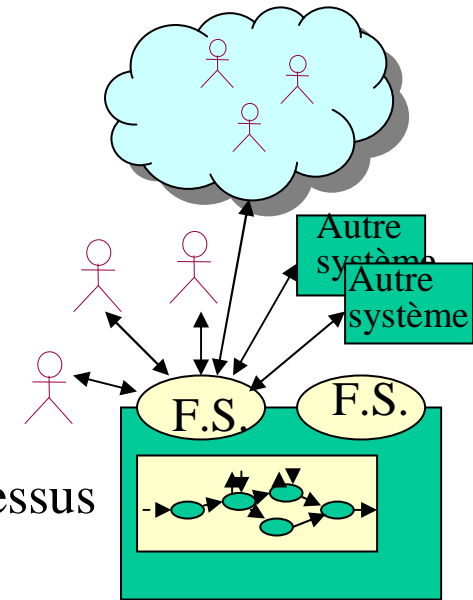
- Répertorier toutes les parties prenantes individuelles et collectives, identifier les personnes ou entités aptes à les représenter
- Intégration par catégories puis inter catégories
- Hiérarchisation des attentes avec introduction de la flexibilité (élément incontournable, normal mais compensable), souhait \Rightarrow analyse de la valeur
- Stabilité des exigences
- Langage commun \Rightarrow thesaurus, ontologies de domaine
- Des techniques multiples :
 - Interviews, séminaires, recueil d'expertises
 - Maquettage
 - Analyse de la valeur (utilité sur coût, ROI)

Analyse fonctionnelle externe

- Système \Rightarrow boîte noire rendant des services à l'environnement, perçus comme des transformations de flux MEI
- Définition des scénarios de chaque type de missions, enchaînement des services et des échanges attendus avec l'environnements

\Rightarrow Définition des **fonctions de service** :

- Conditions de déclenchement
- Éléments de l'environnement mis en relation
- Natures et caractéristiques des flux échangés
- Scénarios des échanges (cas utilisation), et processus éventuels mis en oeuvre
- Réactions aux cas singuliers
- Transformations réalisées
- Performances attendues (temps de réponse, capacité, ...)





Ingénierie des Exigences

Principes des exigences

- Spécification répondant au CdCF = formalise le problème \Rightarrow Référentiel pour les activités futures de conception du système
- Modèle prescriptif : reste en principe dans le domaine strict du problème (\neq modèle constructif)
- Recherche de rigueur et de traçabilité \Rightarrow structuration en énoncés élémentaires = *Exigences*

Définition et caractéristiques de exigences

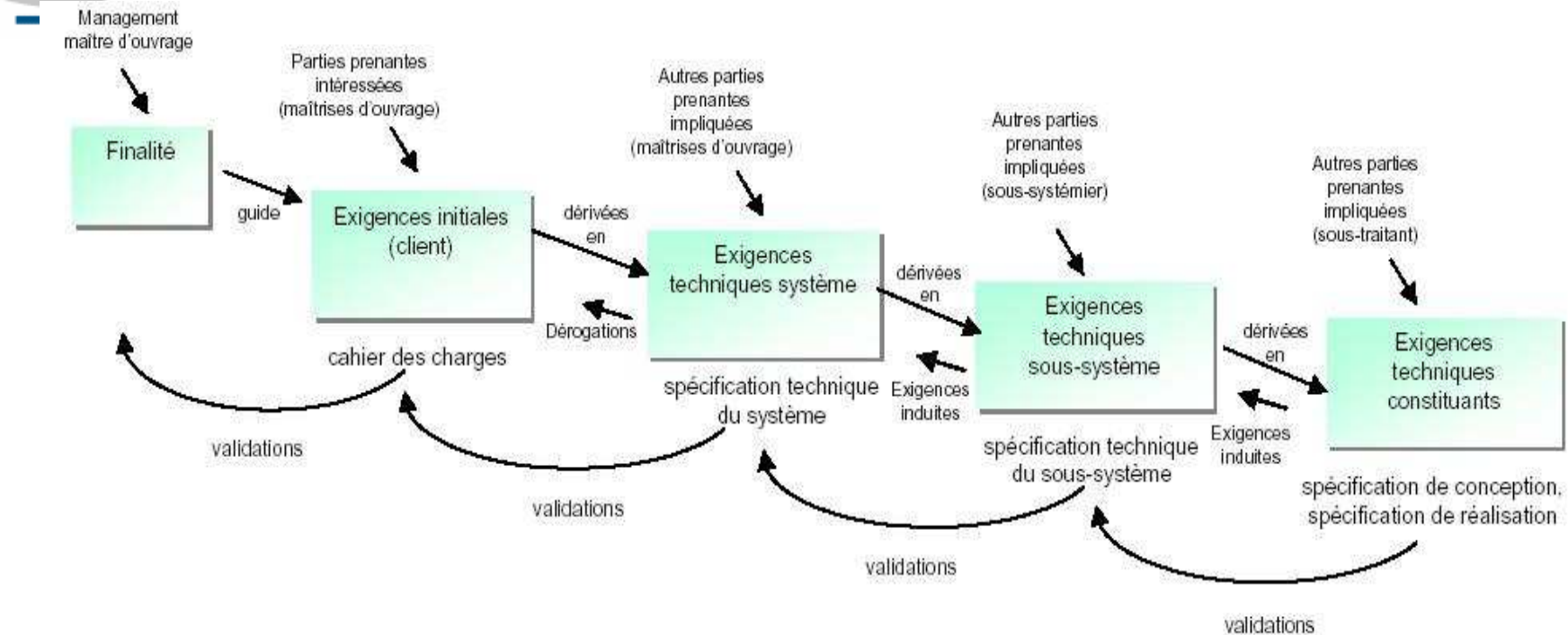
- *Exigence* = énoncé prescrivant une fonction, une aptitude, une caractéristique, une limitation à laquelle doit satisfaire un produit
- Caractéristiques de qualité (niveau élémentaire) :
 - **Unicité** : *une exigence ne traite que d'un sujet*
 - **Précision** : *rigueur dans l'expression*
 - **Non ambiguïté** : *ne permet qu'une seule interprétation*
 - **Pure prescription** : *porte que le Quoi? Et non sur le Comment?*
 - **Vérifiabilité, testabilité** : *à toute exigence peut être associée une méthode permettant la vérification de son obtention*
 - **Faisabilité** : *peut être satisfaite avec l'état de l'art technologique*
 - **Réalisme** : *peut être satisfaite dans les contraintes du projet*
- Caractéristiques (niveau global) :
 - **Cohérence** : *pas d'exigences contradictoires*
 - **Complétude** : *pas de manques*

Généralisation de la notion d'exigence

Formulation en exigences :

- Expression de besoin des parties prenantes
- Spécification des exigences système
- Spécification des produits : sous-systèmes, constituants, produits contributeurs (besoins du MOE et réponses)
- Spécification des référentiels de chaque phase de vie : conception, industrialisation, production, mise en service, retrait

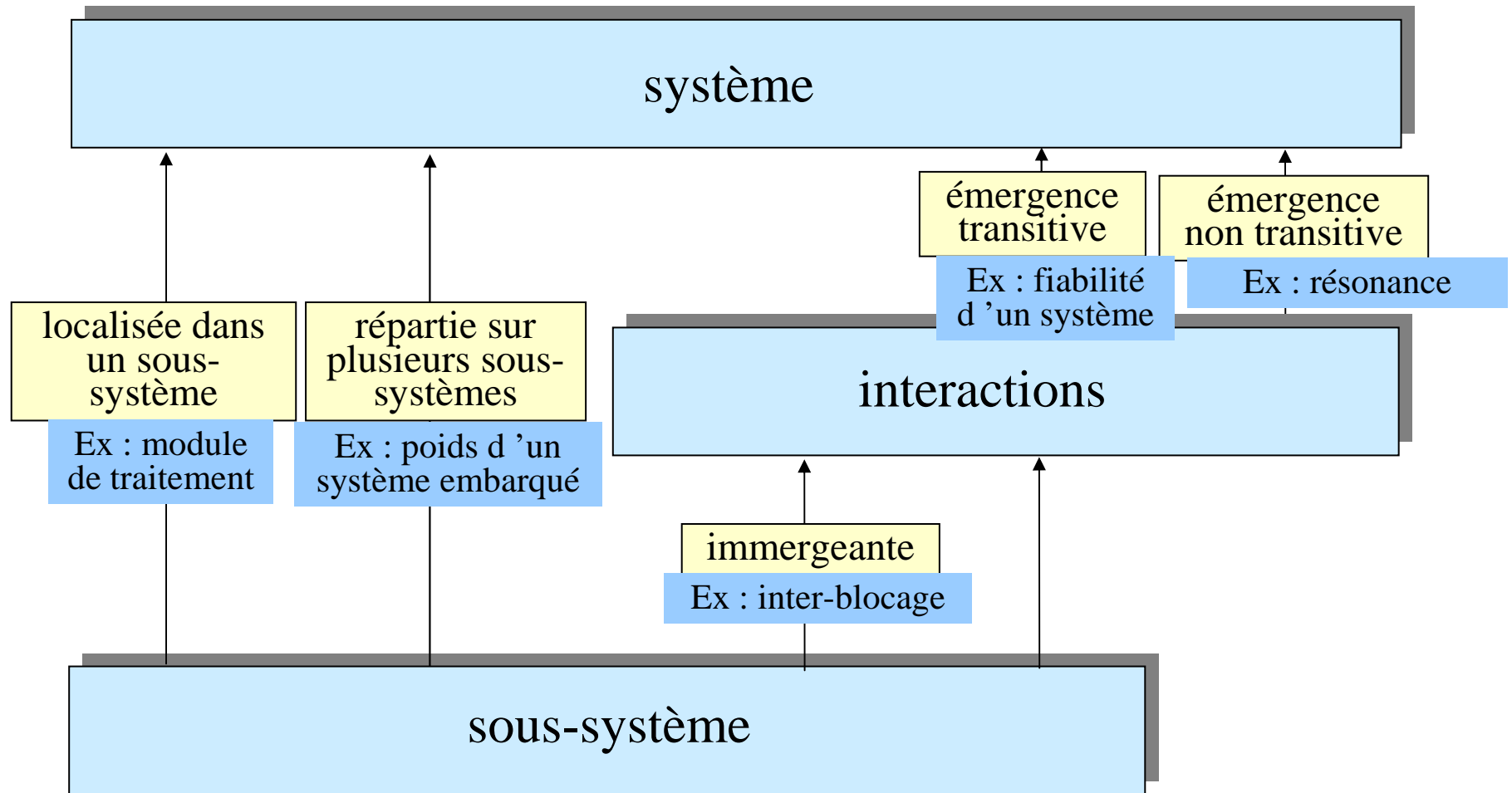
La chaîne des exigences



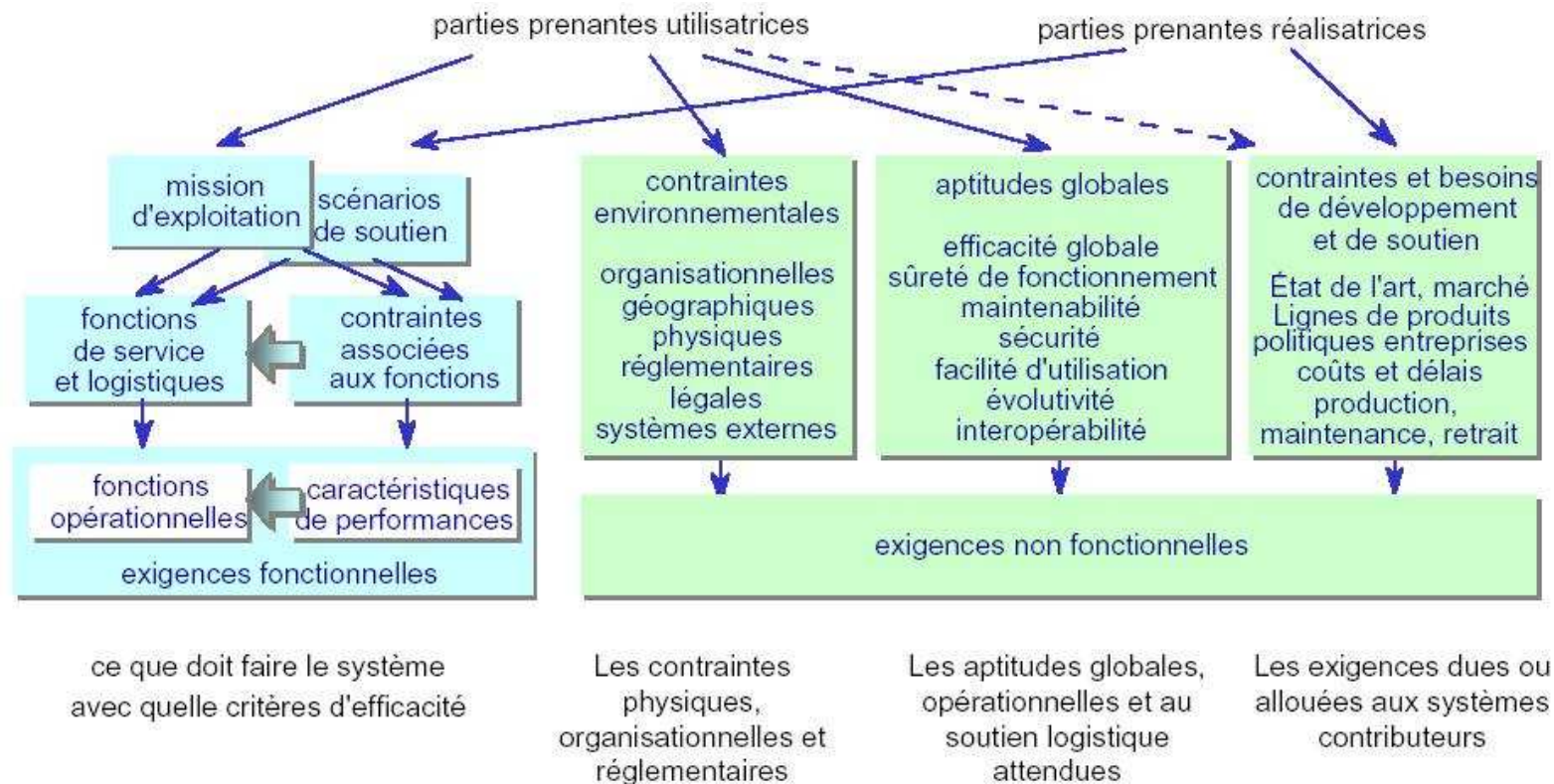
- Gestion de la chaîne des exigences depuis la finalité du système jusqu'aux exigences détaillées de chacun des constituants
- Les référentiels d'exigence successifs sont élaborés, gérés, vérifiés
- Toute évolution, allocation, modification doit être tracée

Classification des propriétés d'un système

Classification de Thomé



Typologie et origine des exigences systèmes

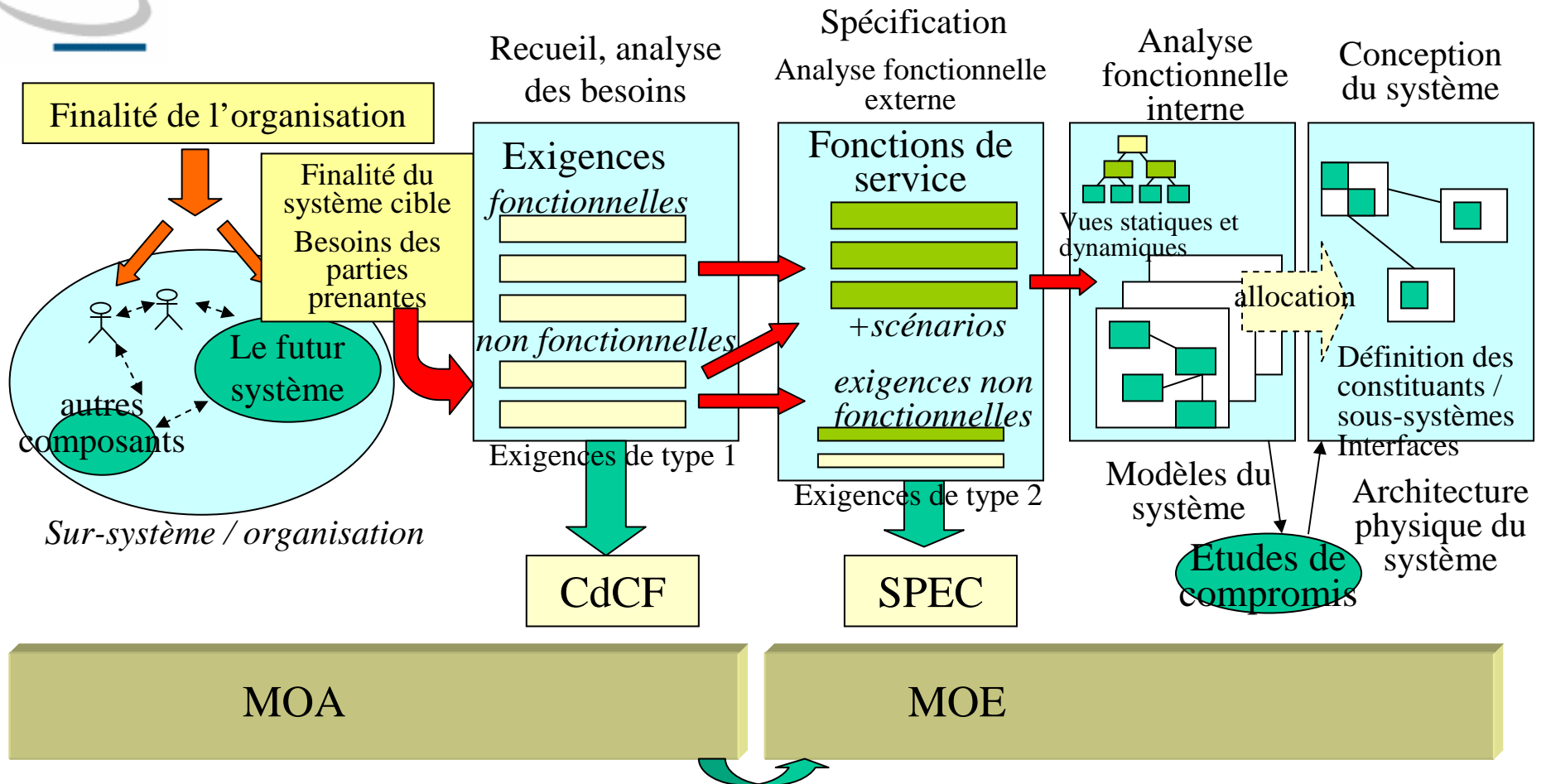




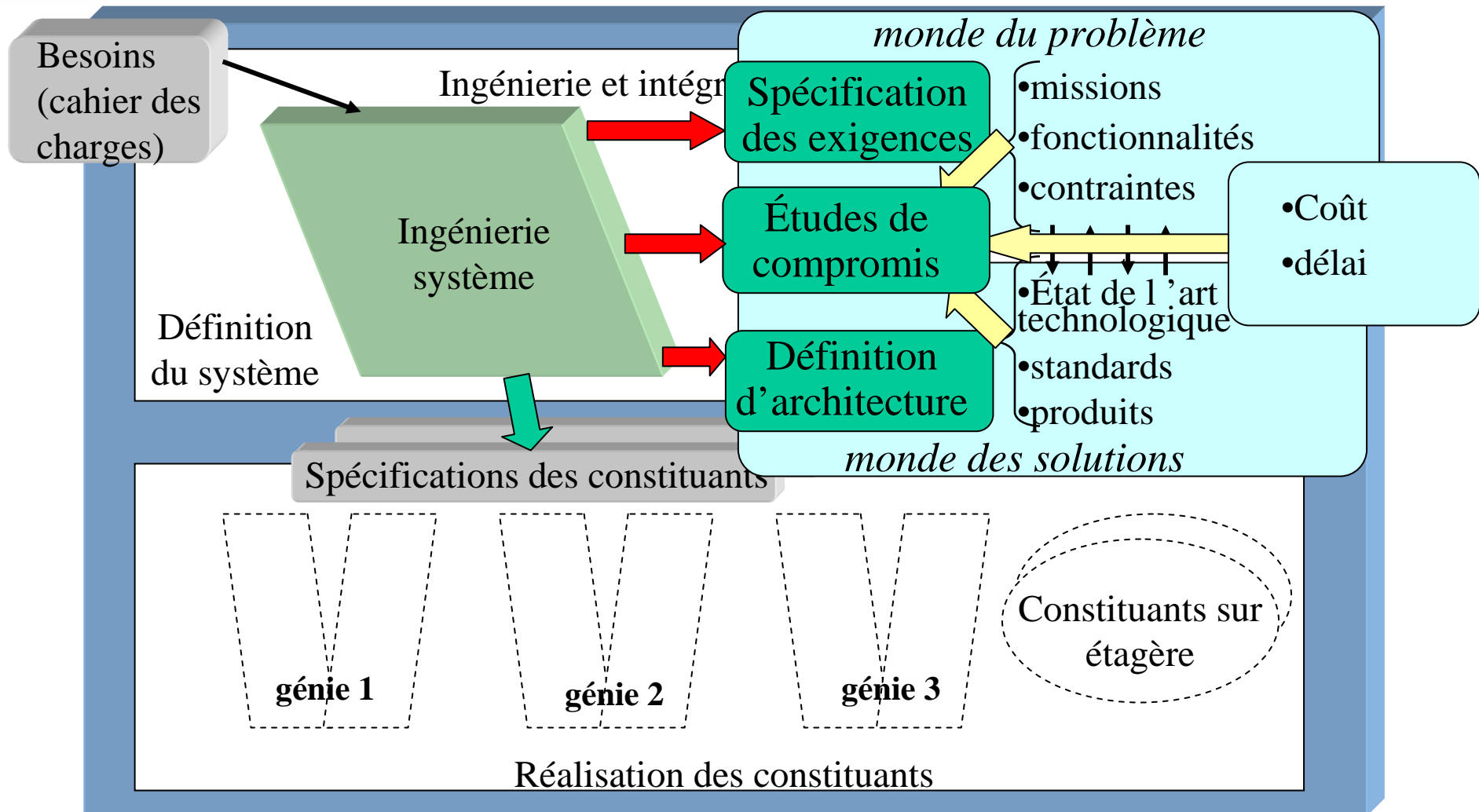
Analyse Fonctionnelle / Logique

La démarche générale

La démarche générale d'ingénierie

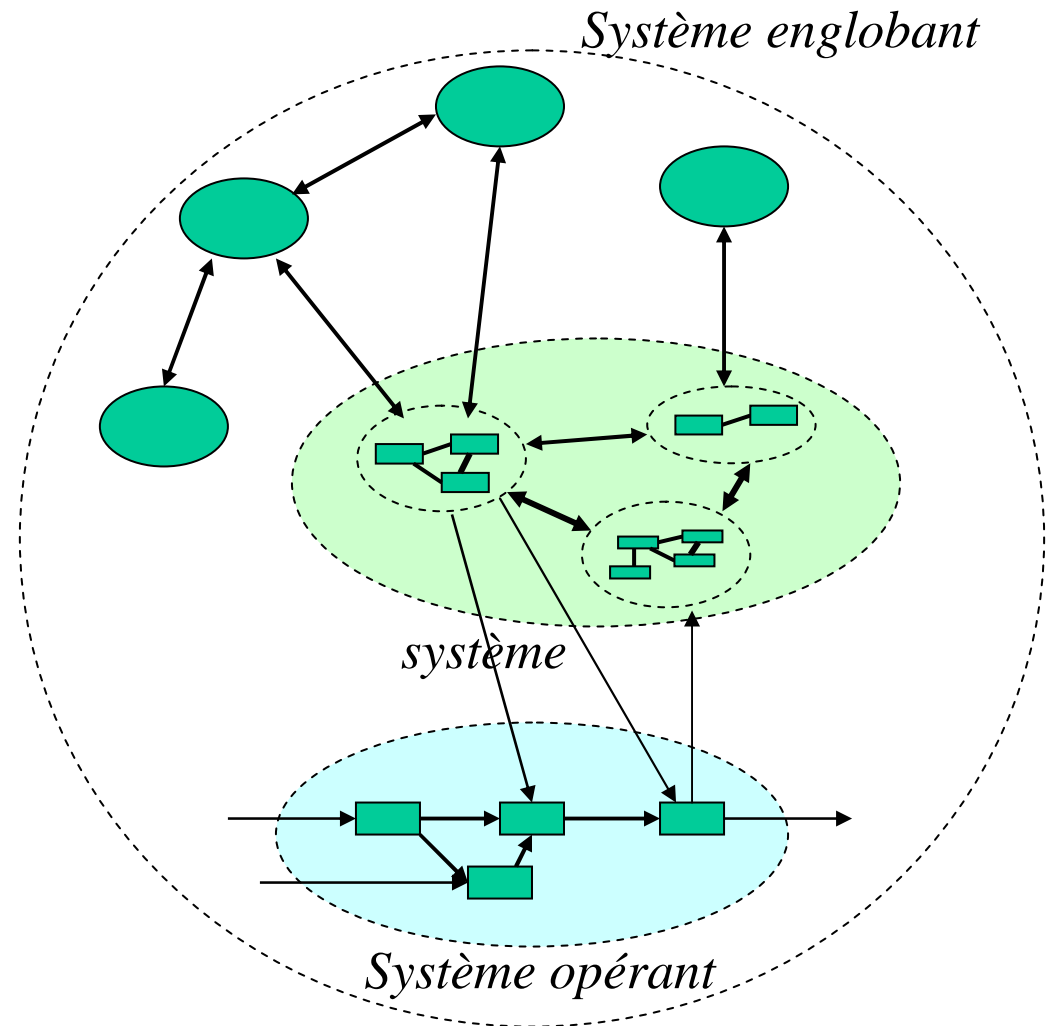


Le processus d'ingénierie système



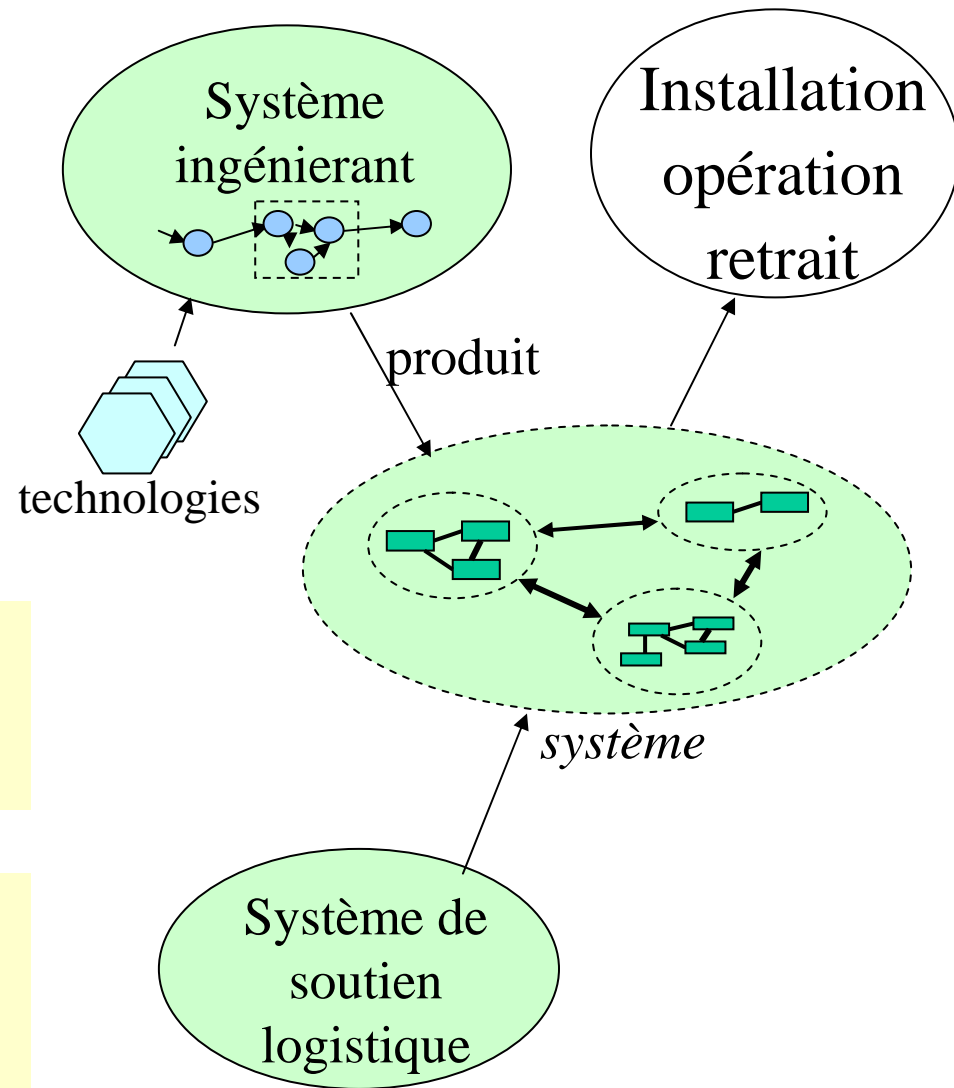
Le processus d'ingénierie système

- Prise en compte du système englobant
- Prise en compte du système opérant piloté

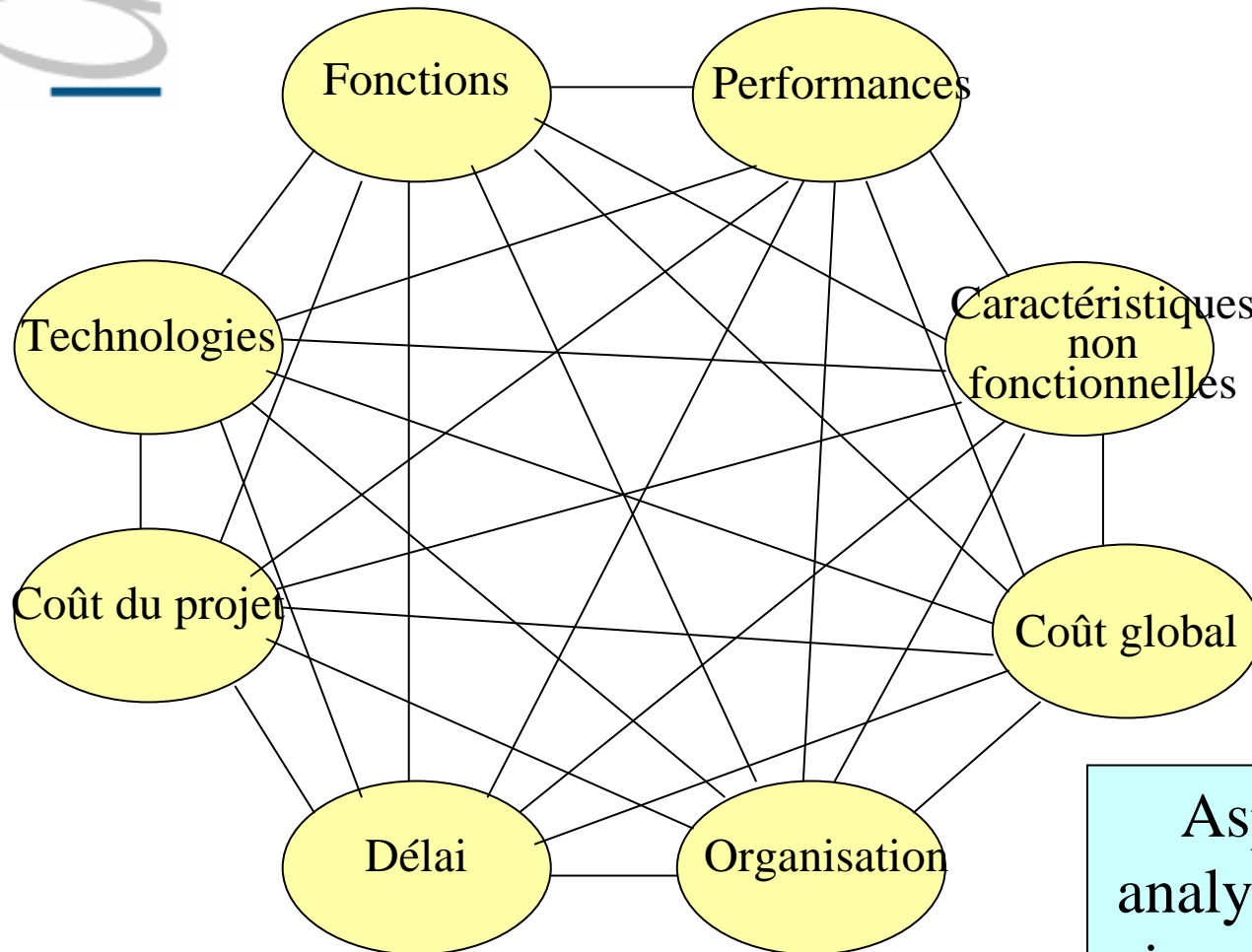


Le processus d'ingénierie système

- Prise en compte de l'ensemble du cycle de vie
- Prise en compte du soutien logistique
- Prise en compte du système « ingénierant »
- Prise en compte des technologies mises en œuvre



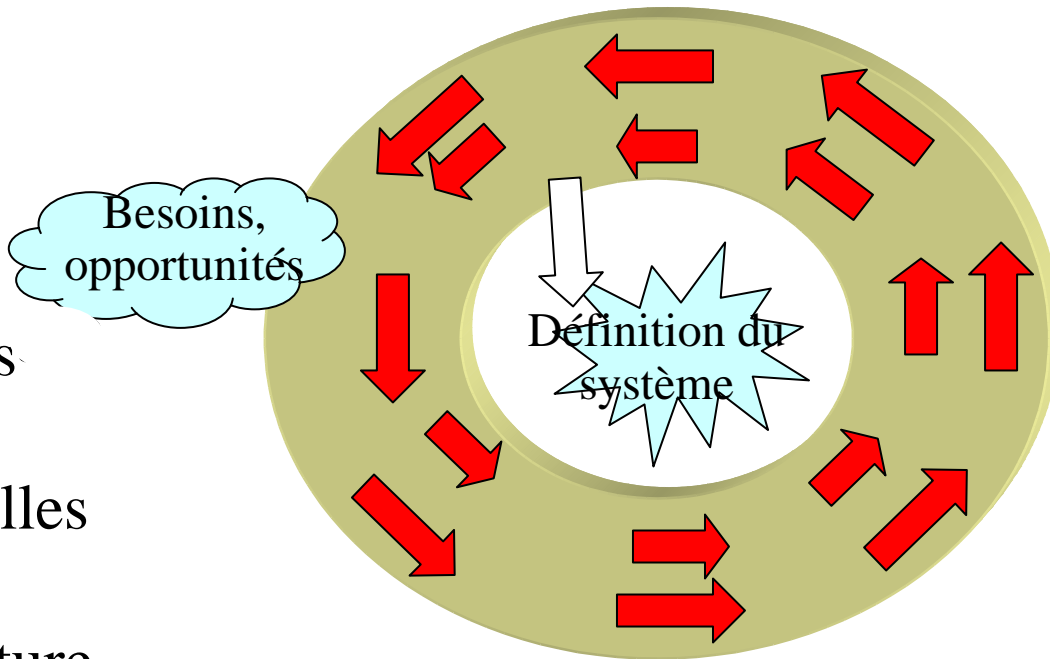
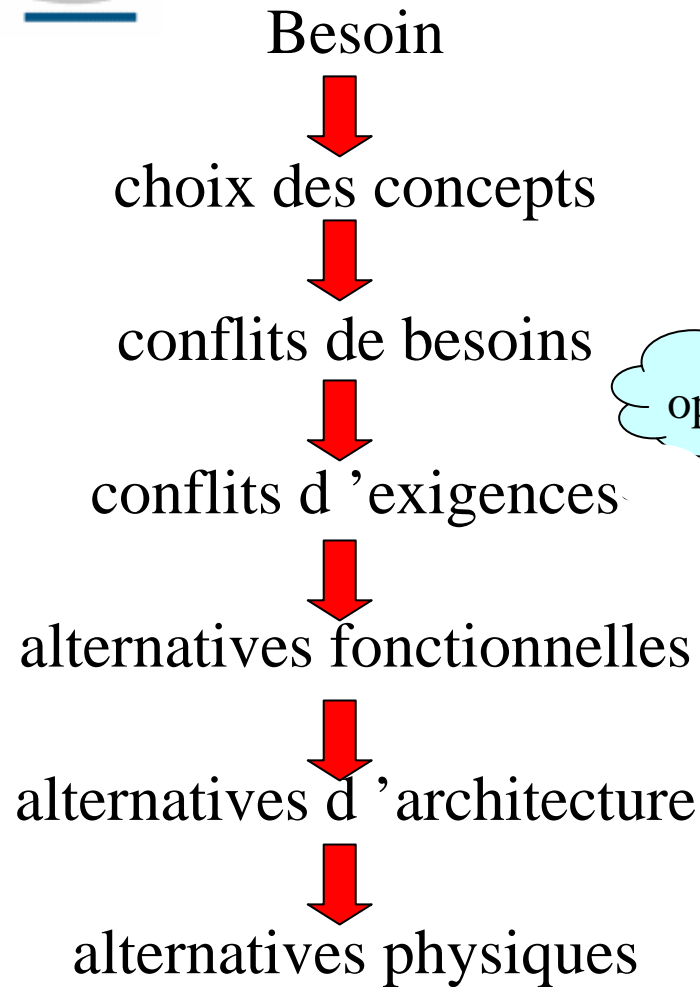
Un problème d'optimisation



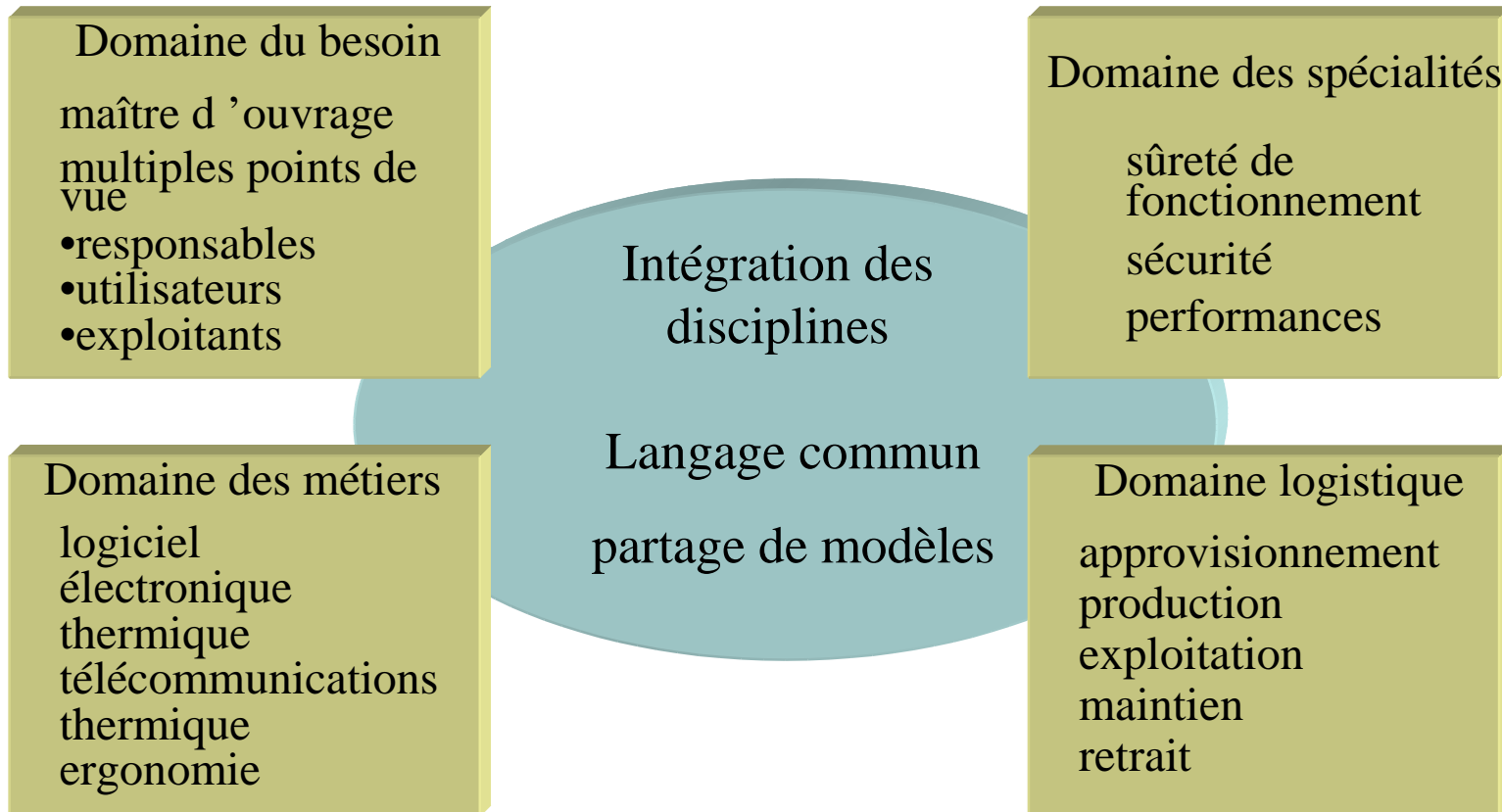
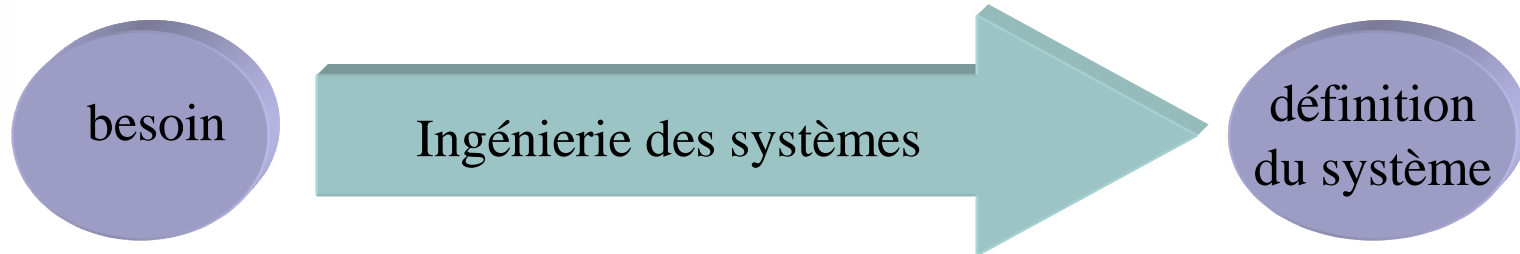
$n.(n-1) / 2$
conflits
élémentaires
possibles

Aspect systémique :
analyser les problèmes et
risques qui émergent des
conflits entre pôles

La spirale des choix

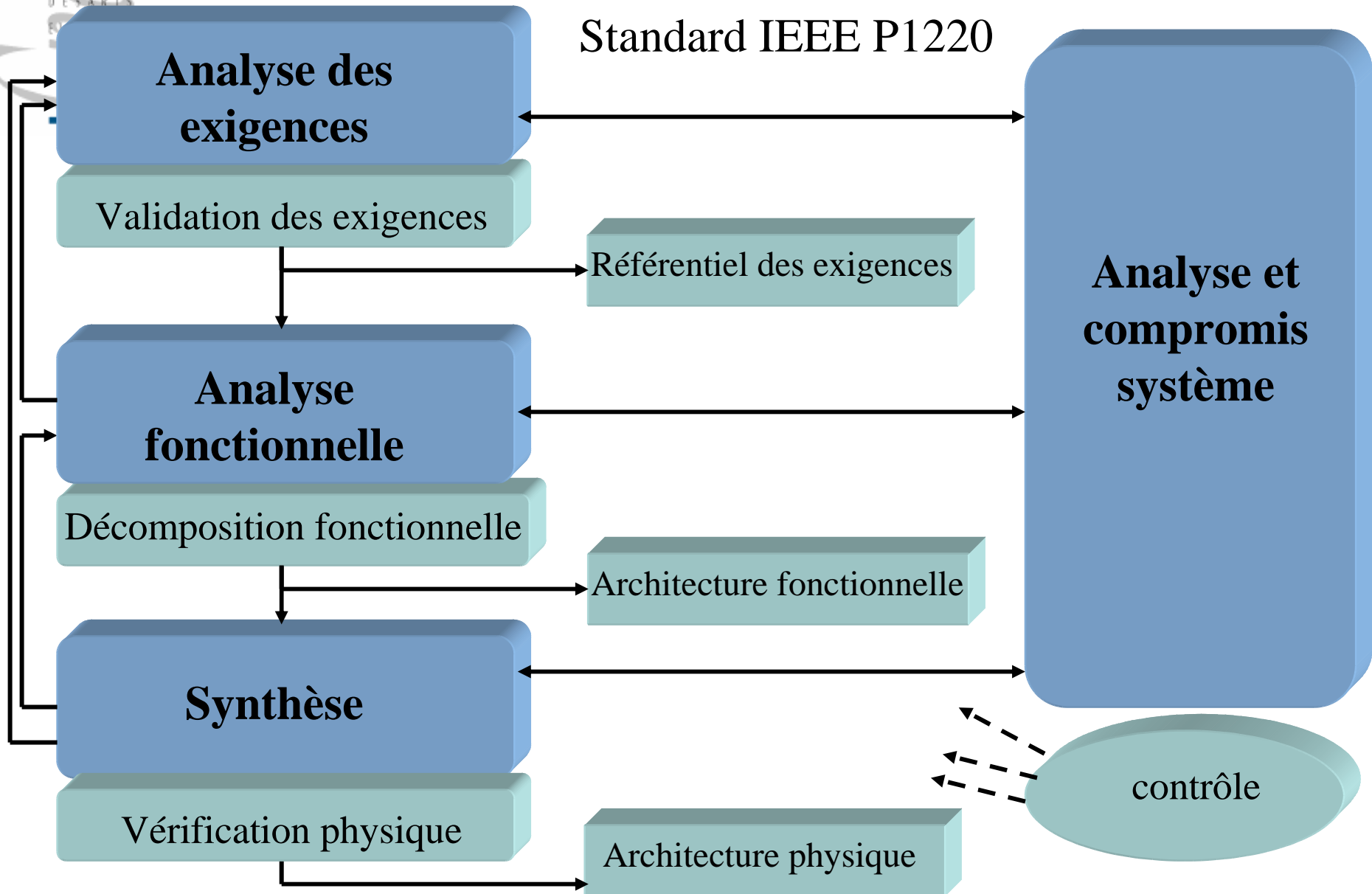


L'intégration des disciplines

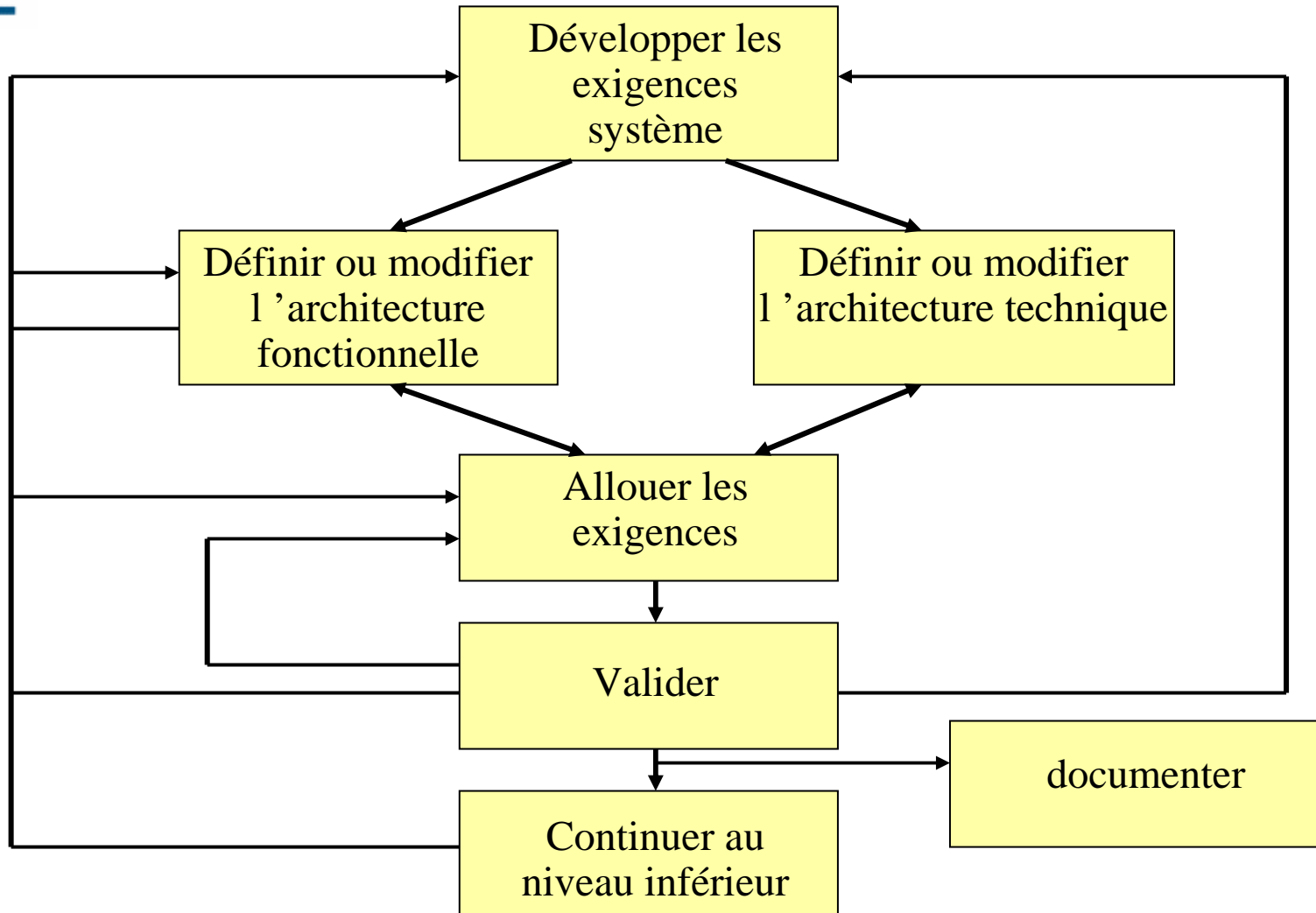


Processus général

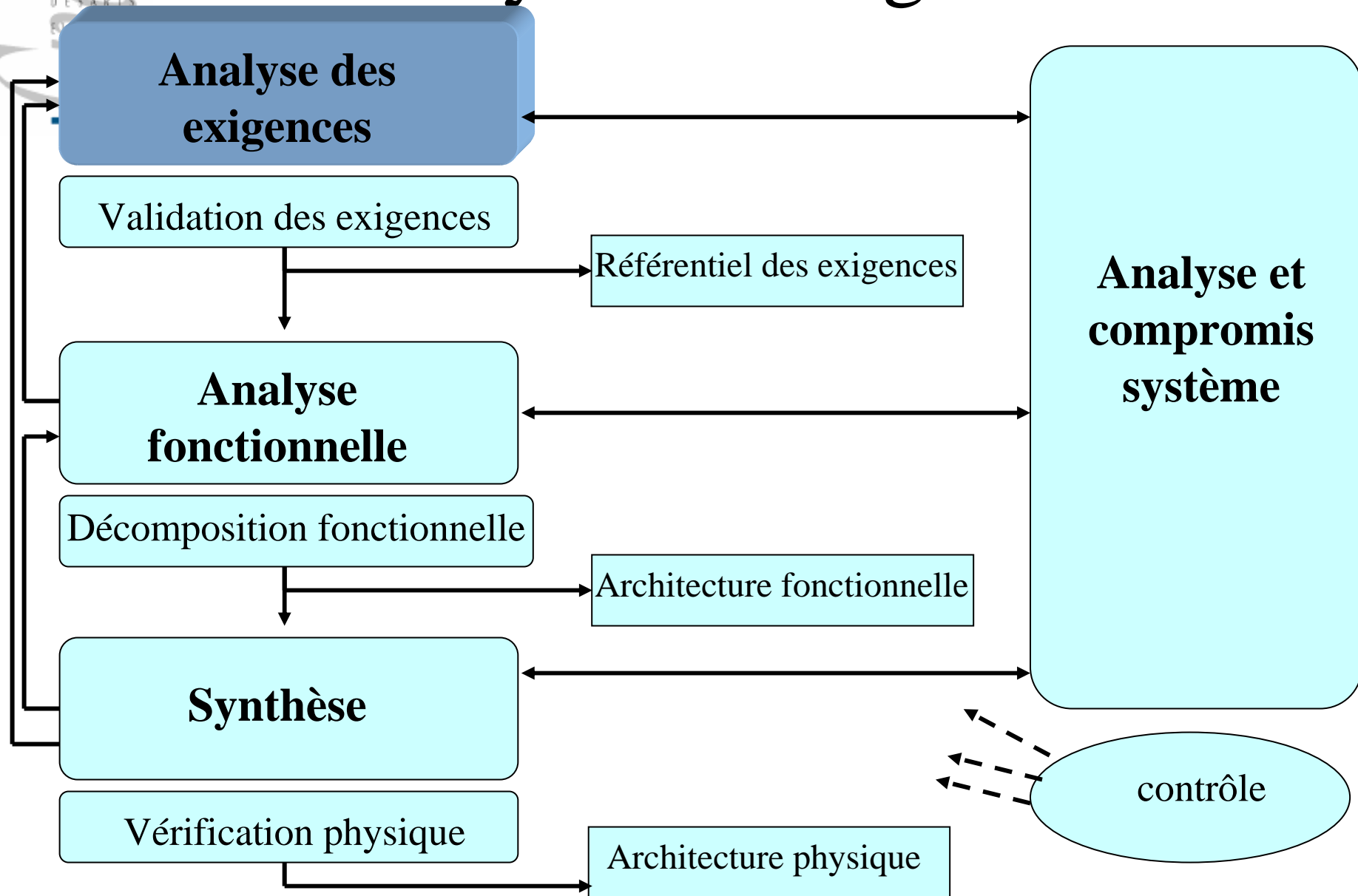
Standard IEEE P1220



La boucle de définition système



L'analyse des exigences



L 'analyse des exigences

- Définit les spécifications du système :
 - **exigences fonctionnelles** : ce que doit faire le système
 - **exigences non fonctionnelles** : caractéristiques, qualité
 - **contraintes** et environnement du système

⇒ *fixe contractuellement l 'engagement du maître d 'œuvre, engage le coût*
- Deux étapes :
 - l 'analyse des besoins
 - le raffinement des exigences

L 'analyse des besoins (suite)

- Nécessité de modélisations pour la transmissibilité entre analyste et utilisateurs
- Maquettage partiel du système et de ses Interfaces Homme-Machine
- Techniques dans le cas d 'expertises complexes, assistance de techniques linguistiques et cognitives (KOD, C. Vogel)

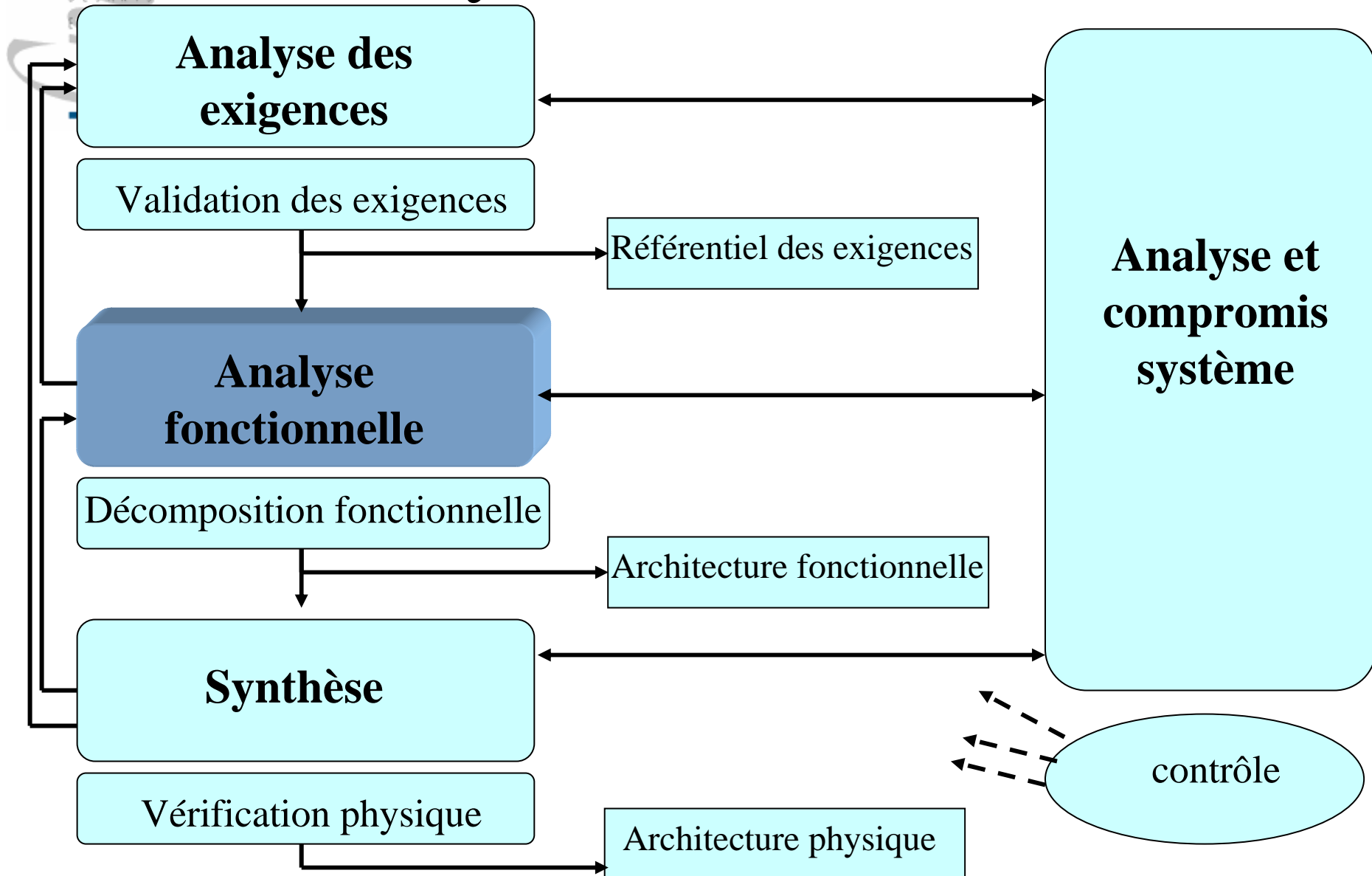
Le raffinement des exigences

- Décomposer et préciser les exigences de besoin (ex : sécurité),
- Différents modes et phase du cycle de vie
- vérification de la faisabilité technique dans le budget et le coût \Rightarrow premiers choix de conception
- vérification de la testabilité de chaque exigence
- analyse de risque
- analyse de la valeur comparaison avantage / coût
- validation des spécifications avec les représentants du maître d'ouvrage \Rightarrow fige le **Référentiel des exigences**

Raffinement des exigences : principaux points

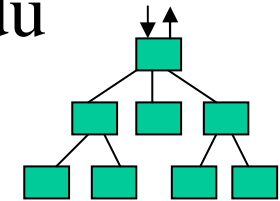
- Missions et objectifs du système
- Prise en compte des différents types d'utilisateurs et des exploitants
- scénarios opérationnels et interaction avec l'environnement technologique et humain
- flux (matière, énergie, information), processeurs
- conditions environnementales (température, chocs, vibrations, .)
- contraintes internes du maître d'ouvrage ou du maître d'œuvre
- contraintes externes : standards industriels, réglementation
- contraintes opérationnelles d'exploitation et de logistique
- ergonomie
- facteurs de qualité attendus : performance, fiabilité, disponibilité, sûreté, sécurité, maintenabilité, opérabilité, interopérabilité)

L'analyse « fonctionnelle »



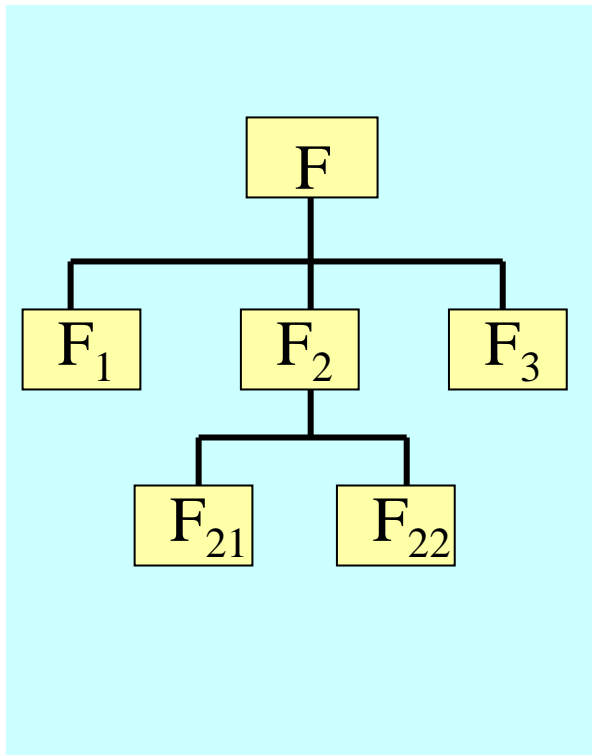
L 'analyse « fonctionnelle »

- Objectif : détailler la définition du problème
- développer l '**architecture fonctionnelle** du système par décomposition itérative de fonctions de l 'analyse des exigences
- définir chaque fonction :
 - transformation de flux
 - comportement dynamique
 - Interactions
- Plus généralement, analyse « logique » (ex : approche objet)
- allouer les exigences non fonctionnelles

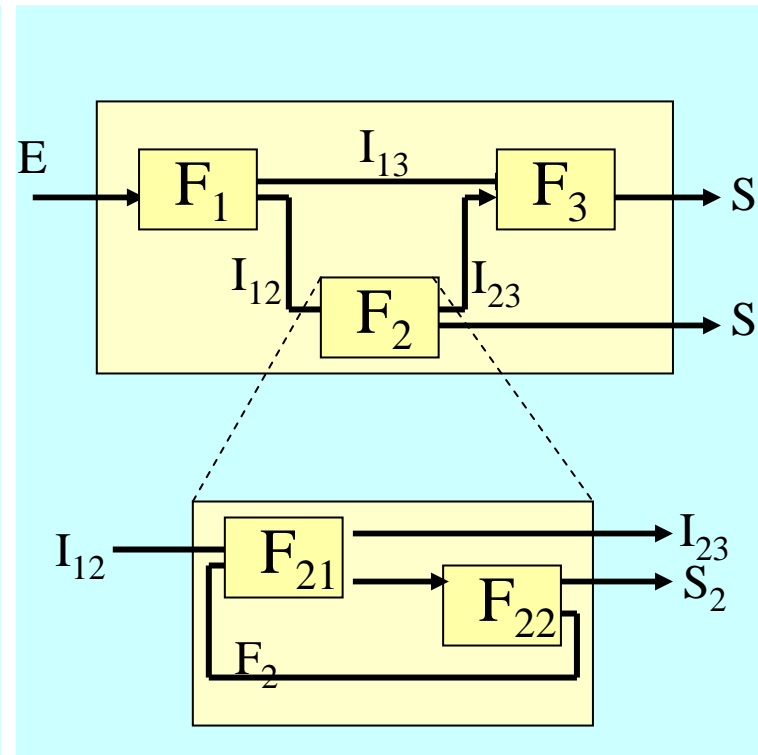


Décomposition d'une fonction

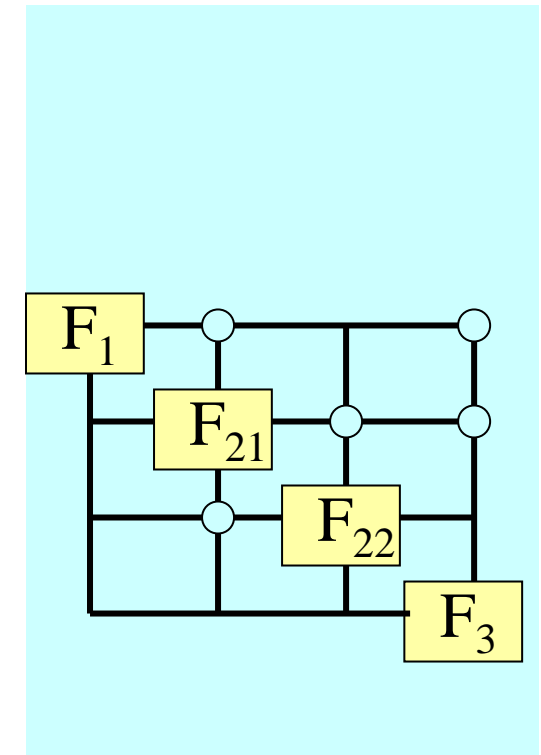
Différentes représentations



Arborescence fonctionnelle



Décomposition structurée



Matrice de couplage

L'analyse fonctionnelle

- Décomposition : qualité d'une décomposition :
 - forte cohésion interne
 - faible couplage entre sous-fonctions \Rightarrow limitation des interfaces
 - répartition équilibrées des exigences de performances entre sous-fonctions

étude de décompositions alternatives avec résolution de conflits par recherche de compromis
- Vérification de la complétude de l'architecture logique
- Production de l'architecture logique :
 - \Rightarrow décomposition des fonctions
 - \Rightarrow interactions, flux et objets traités
 - \Rightarrow comportement dynamique

Ingénierie des systèmes

Un exemple simple

Un système de transport automatique

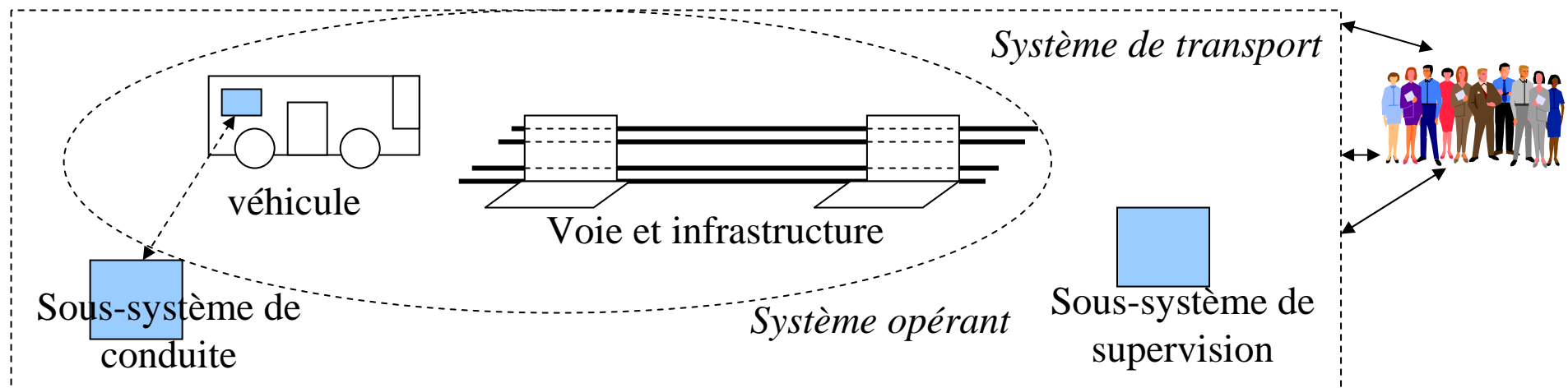
Analyse de système. Exemple : un système de transport automatisé

- **Finalité** : transporter des passagers de station en station
- **Concept** : véhicule léger sur rail, automatisé, à moteur électrique
- **Environnement** : voie en site propre, alimentation électrique secourue, stations d'embarquements passagers
- **Objectifs, contrainte** : performances (flux, délais, sécurité)

Système opérant : système de transport véhicule léger + infrastructure (voie, stations, alimentation électrique) + signalétique

Système de transport : système opérant + système de conduite + système de supervision

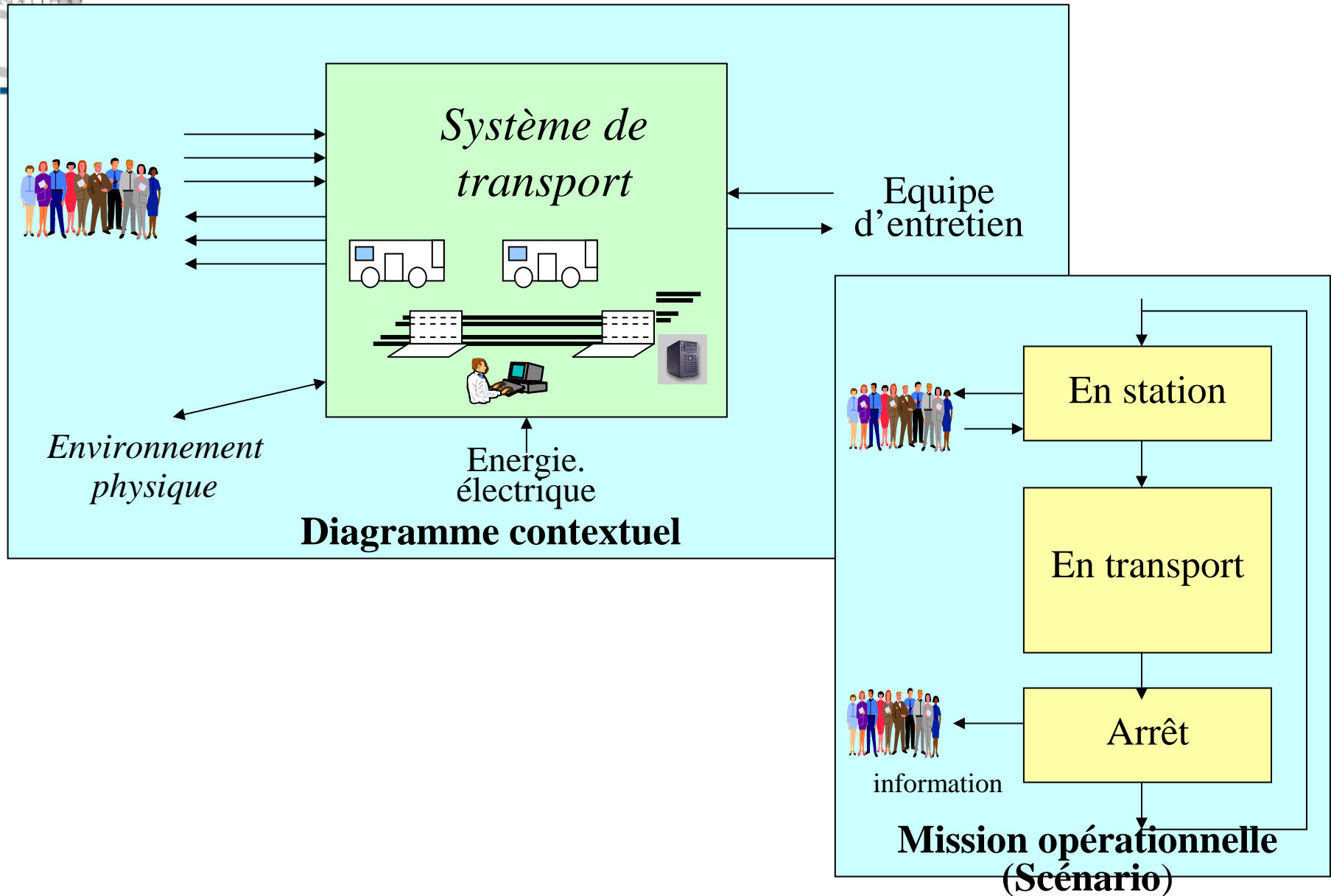
Système logistique : alimentation électrique, équipe d'entretien



Un système de transport automatisé

- Parties prenantes : exploitant (direction, opérationnels, maintenance,...), passagers, ...
- Objectifs :
 - Flux moyen de passagers. Ex : 50 passagers à la minute
 - Temps d'attente max. Ex : 2 minutes
 - Temps de transport
- Exigences non fonctionnelles, contraintes :
 - Sécurité physique des passagers dans le véhicule
 - Sécurité des voies
 - Information des passagers
 - Prise en compte des pannes
 - Choix d'une solution automatisée
 - Minimisation du coût d'exploitation

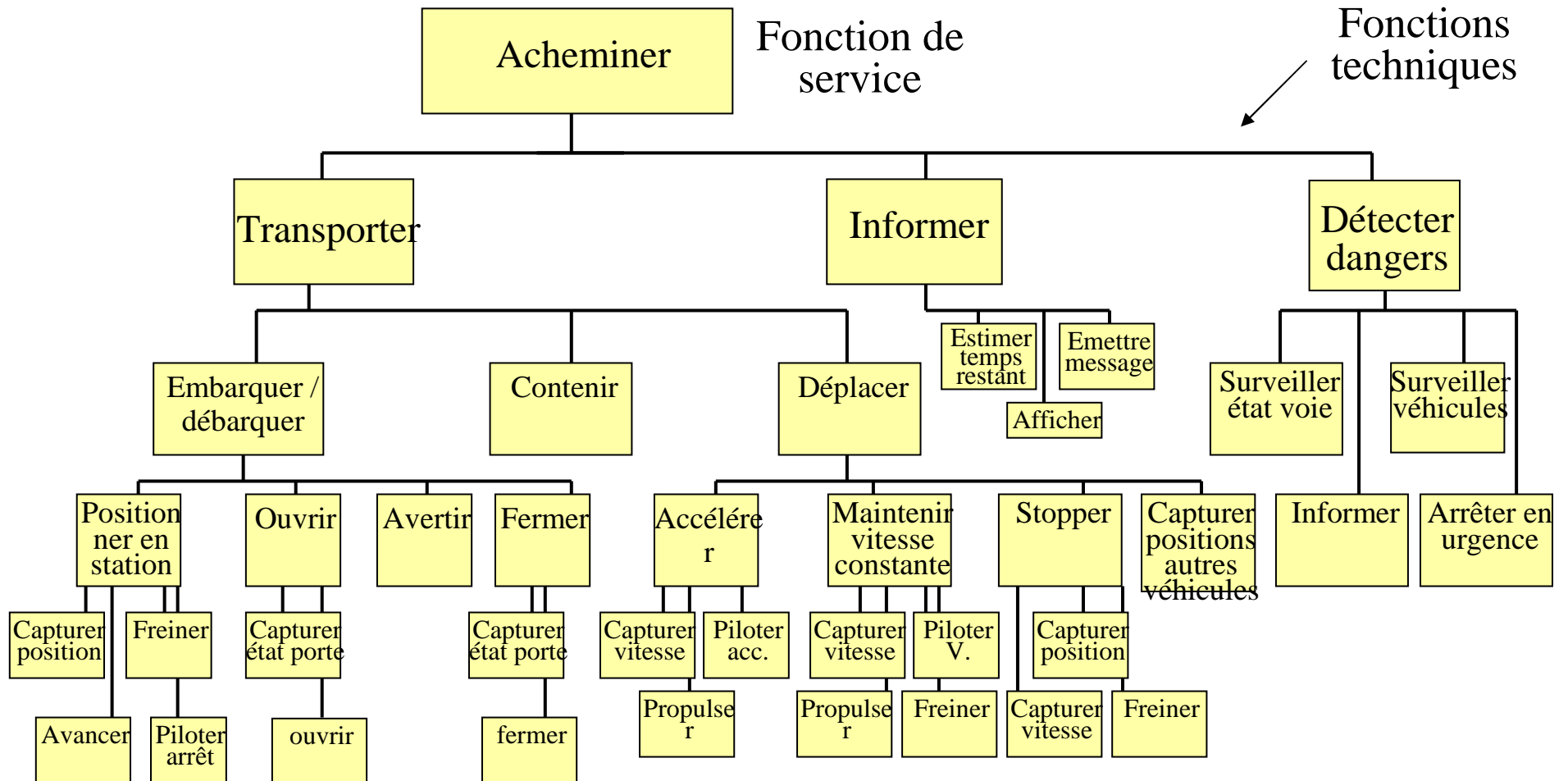
« Contexte » du système



Fonctions du système

- Une fonction de service « opérationnelle » :
 - Acheminer (stations S_i , S_j)
- Fonctions techniques :
 - Transporter
 - Embarquer / débarquer
 - Contenir
 - Déplacer (S_i , S_j)
 - Informer les passagers
 - Détecter les dangers
 - Surveiller les voies
 - Détecter pannes
 - Informer opérateur humain
 - Arrêter le système en urgence

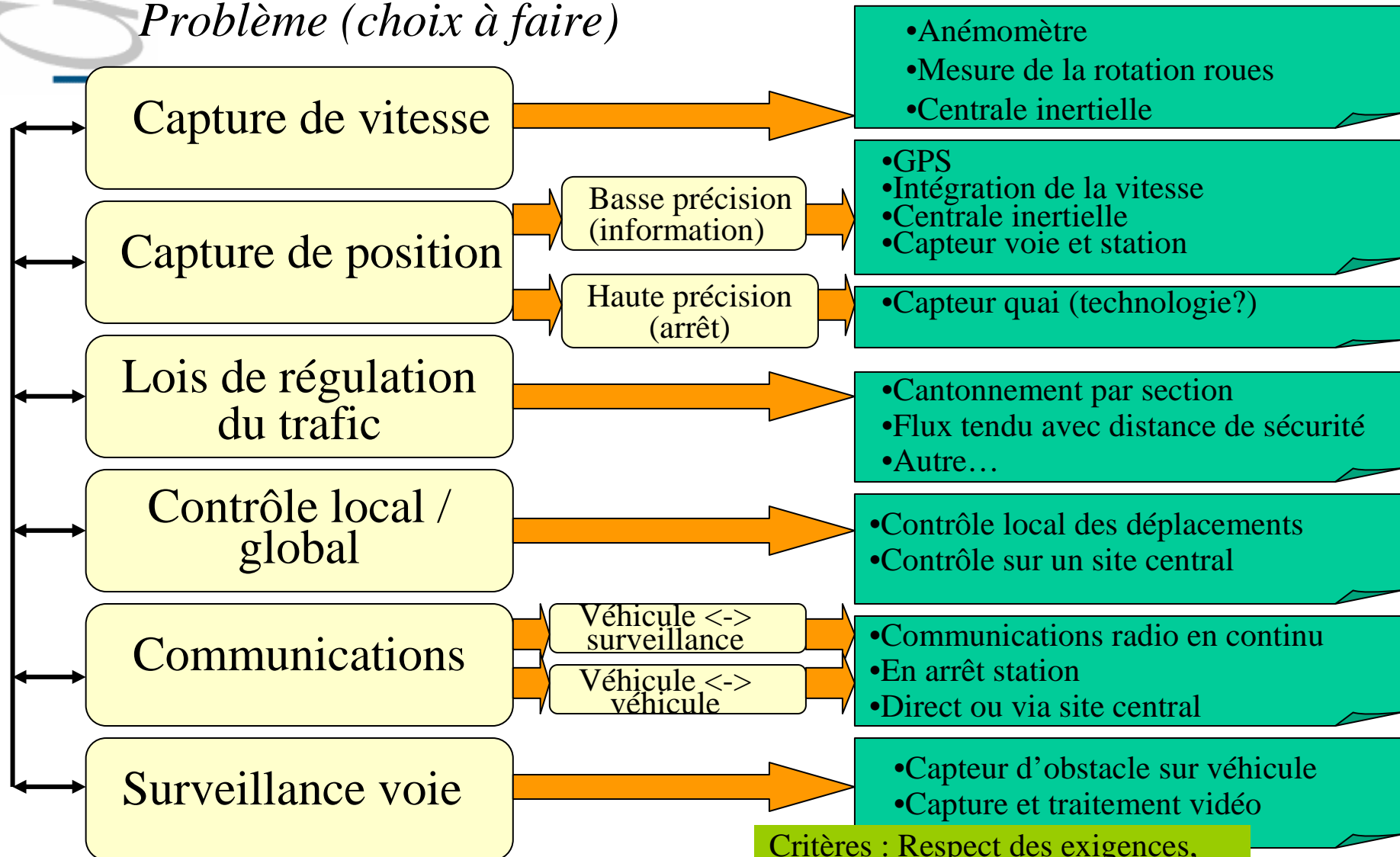
Analyse des fonctions du systèmes



Choix de conception, compromis

Problème (choix à faire)

Alternatives



Critères : Respect des exigences, des contraintes, coût, risque, ...

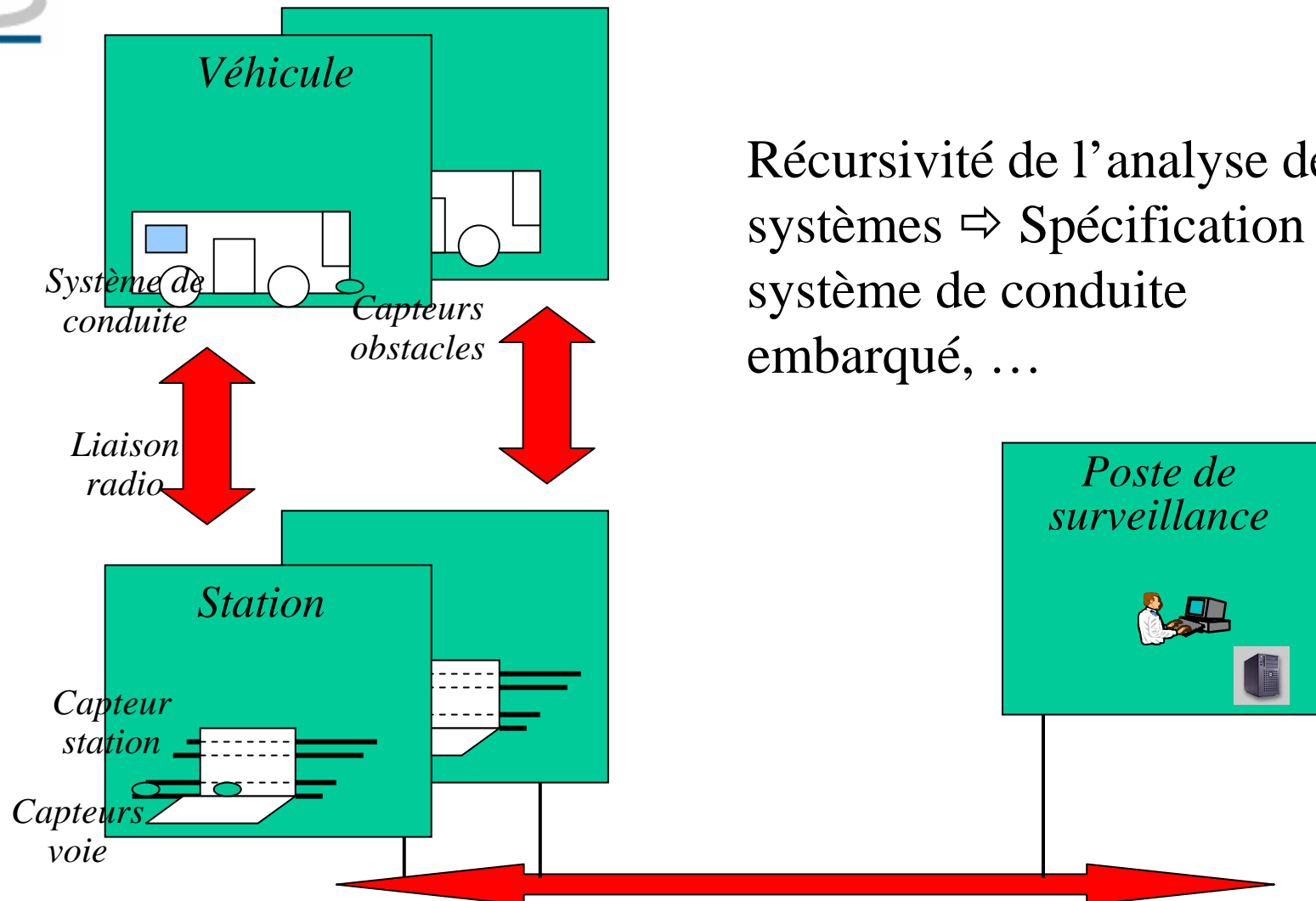
Choix de conception, compromis (2)

Contraintes, faisabilité, coût, risque \Rightarrow

Emergence d'une solution

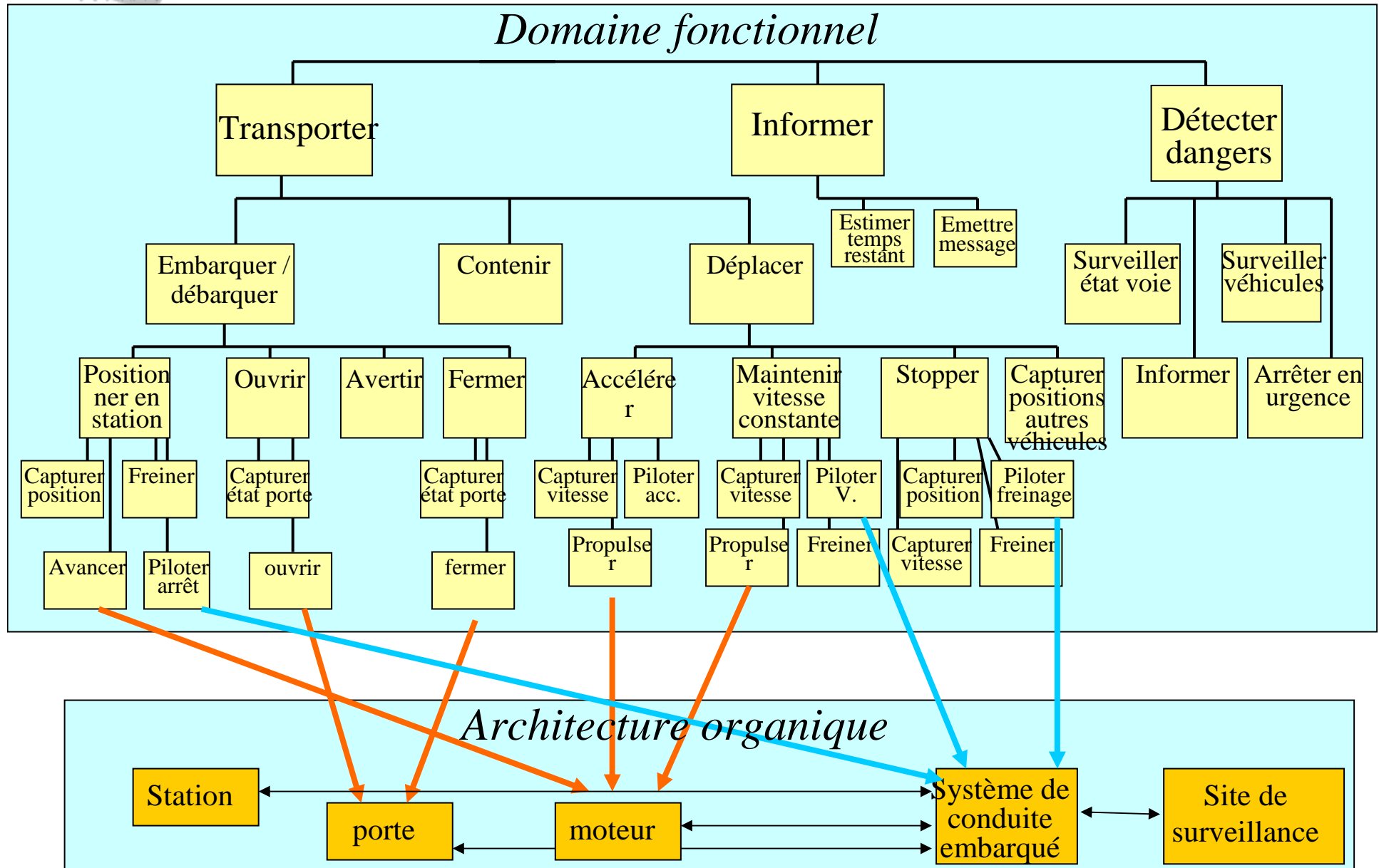
- Estimation de vitesse à partir de la rotation roue
- Estimation de position basse précision par intégration vitesse et capteurs voies
- Mesure de position haute précision par capteur quai
- régulation par cantonnement de zones
- Contrôle de déplacement en local, état global système sur site central de surveillance
- Communication radio véhicule station à l'arrêt
- Communication stations site central de surveillance

Architecture organique

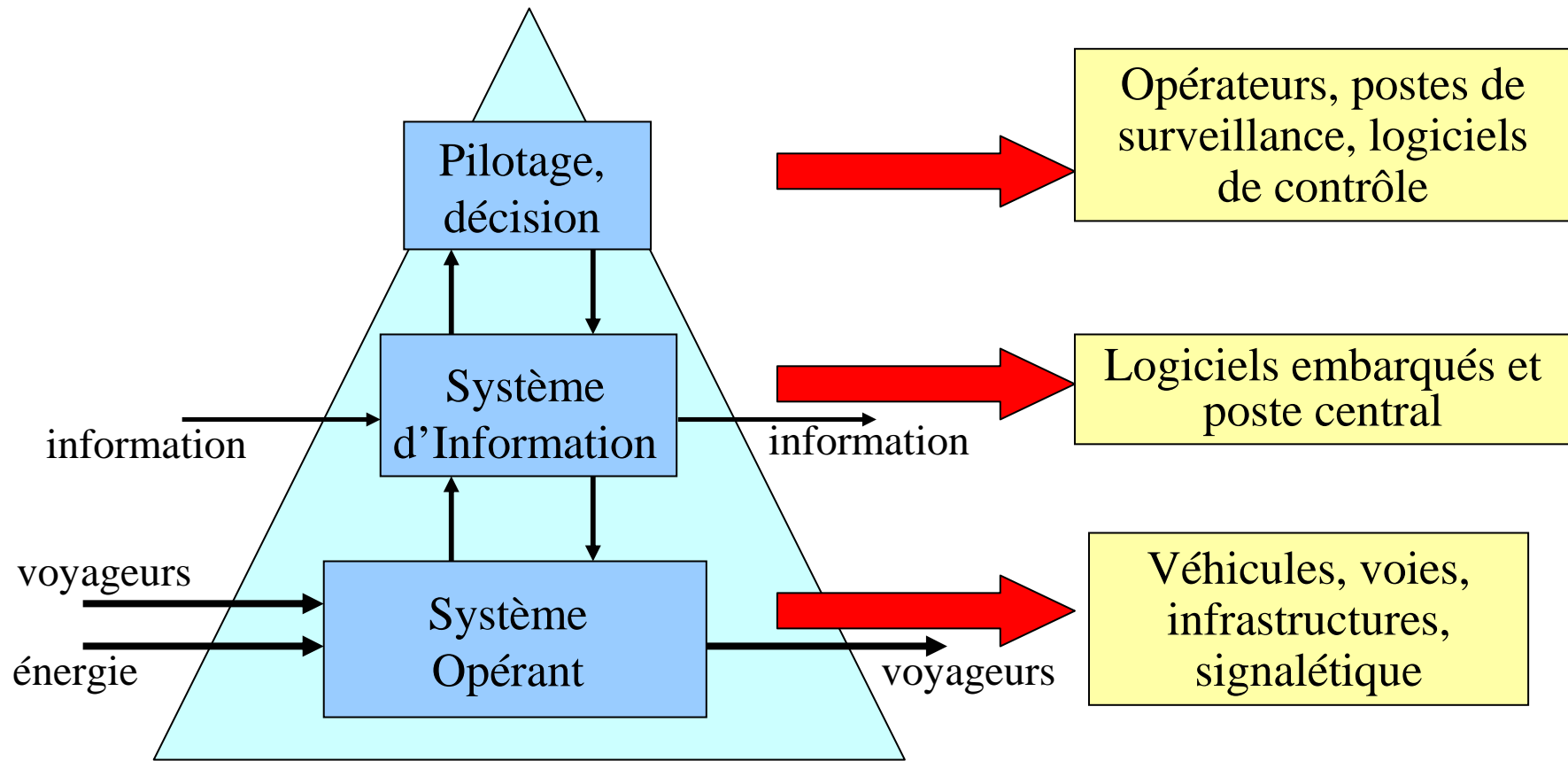


Récurtivité de l'analyse de systèmes \Rightarrow Spécification du système de conduite embarqué, ...

Allocation des fonctions



Les différents niveaux de systèmes



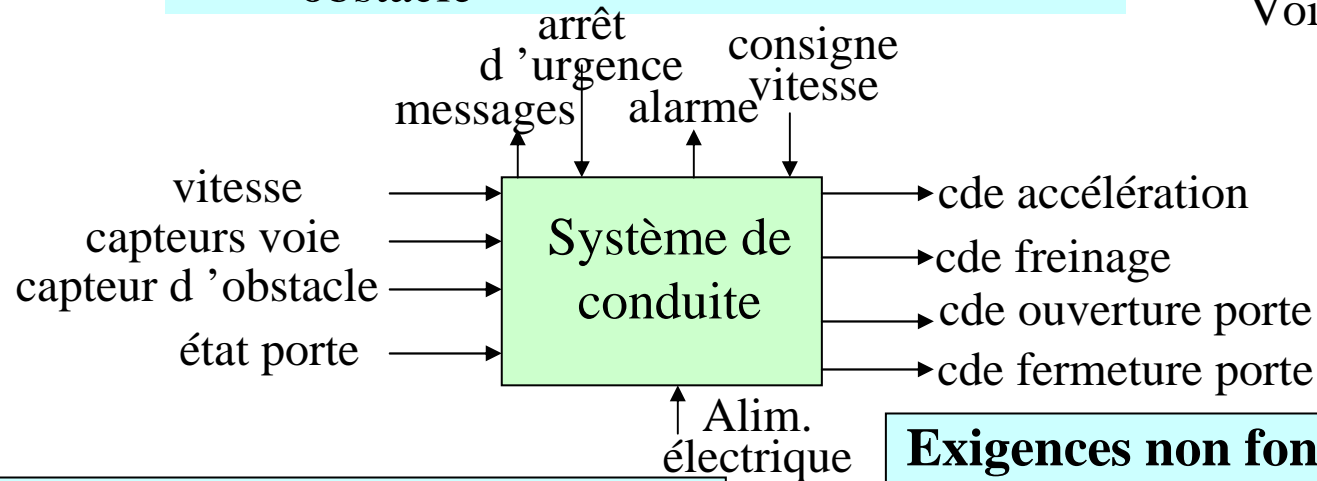
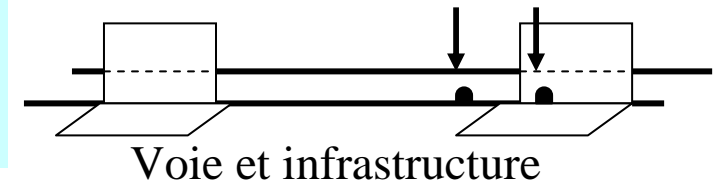
Aspects temporels et pilotage

- « Continu » et « phases » : loi de fonctionnement
- Mais tous les aspects temporels n'ont pas été traités (modes) :
 - Prise en compte de la maintenance
 - Adaptation de la vitesse aux conditions extérieurs
 - Modulation du flux de véhicule en fonction des heures ou du flux observé

Analyse du système de conduite

Choix techniques :

- système de conduite autonome embarqué
- capteurs :
 - vitesse
 - proximité station, station, fin de voie
 - obstacle



Exigences fonctionnelles

Fonctions de service

- embarquer / débarquer passagers
- transporter d'une station à l'autre

Exigences non fonctionnelles

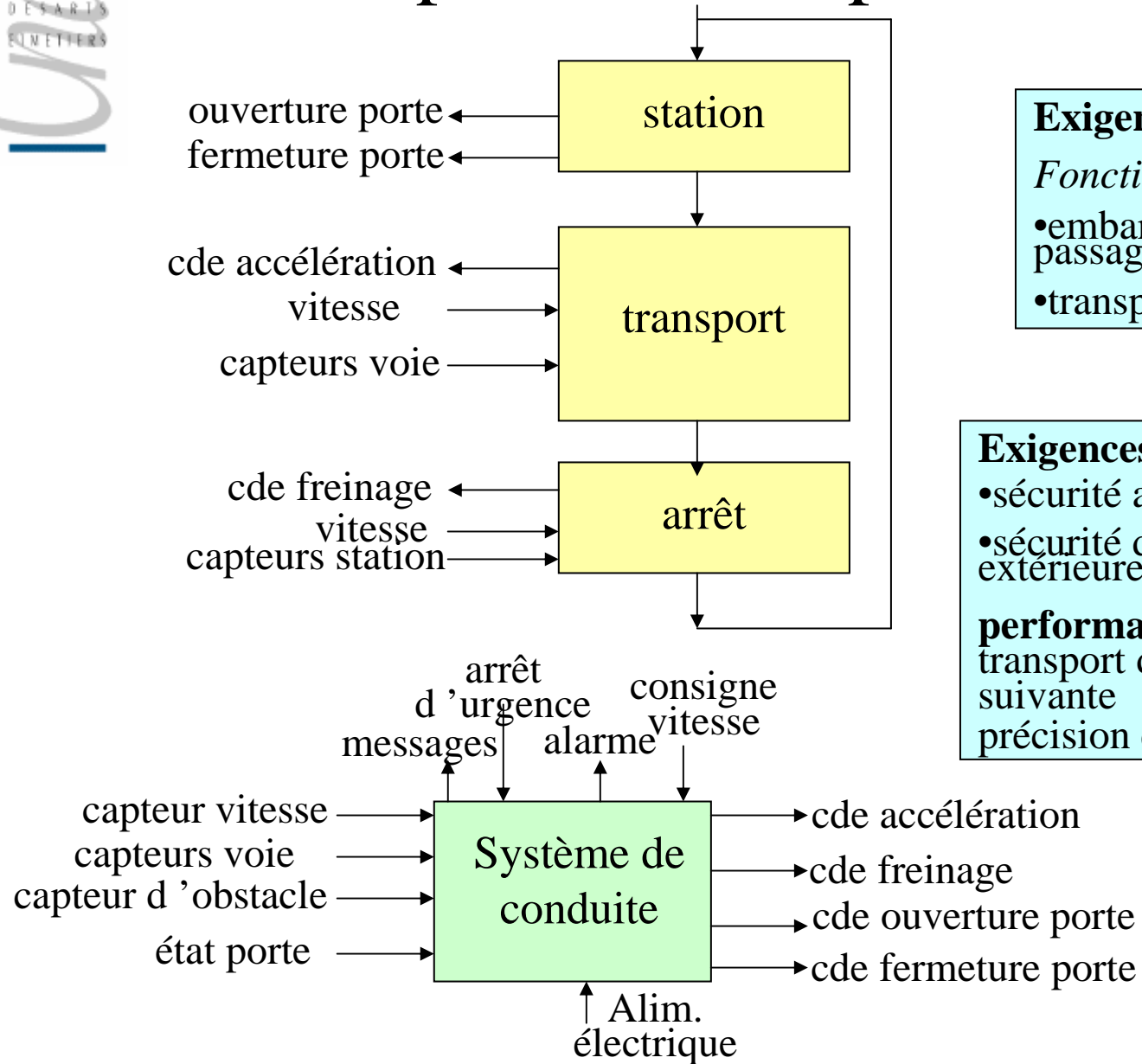
- sécurité absolue des passagers
- facilité d'utilisation

performances : temps de transport d'une station à la suivante
 précision des arrêts

Exigences d'interface
 alimentation électrique

Exigences du cycle de vie
 procédures de maintenance

Exemple : vision opérationnelle



Exigences fonctionnelles

Fonctions de service

- embarquer / débarquer passagers
- transporter

Exigences non fonctionnelles

- sécurité absolue des passagers
- sécurité des personnes extérieures

performances : temps de transport d'une station à la suivante
précision des arrêts

Vision fonctionnelle interne

Décomposition temporelle

*Phases
de vie*

évolution

Fonctionnement

marche / arrêt /
maintenance

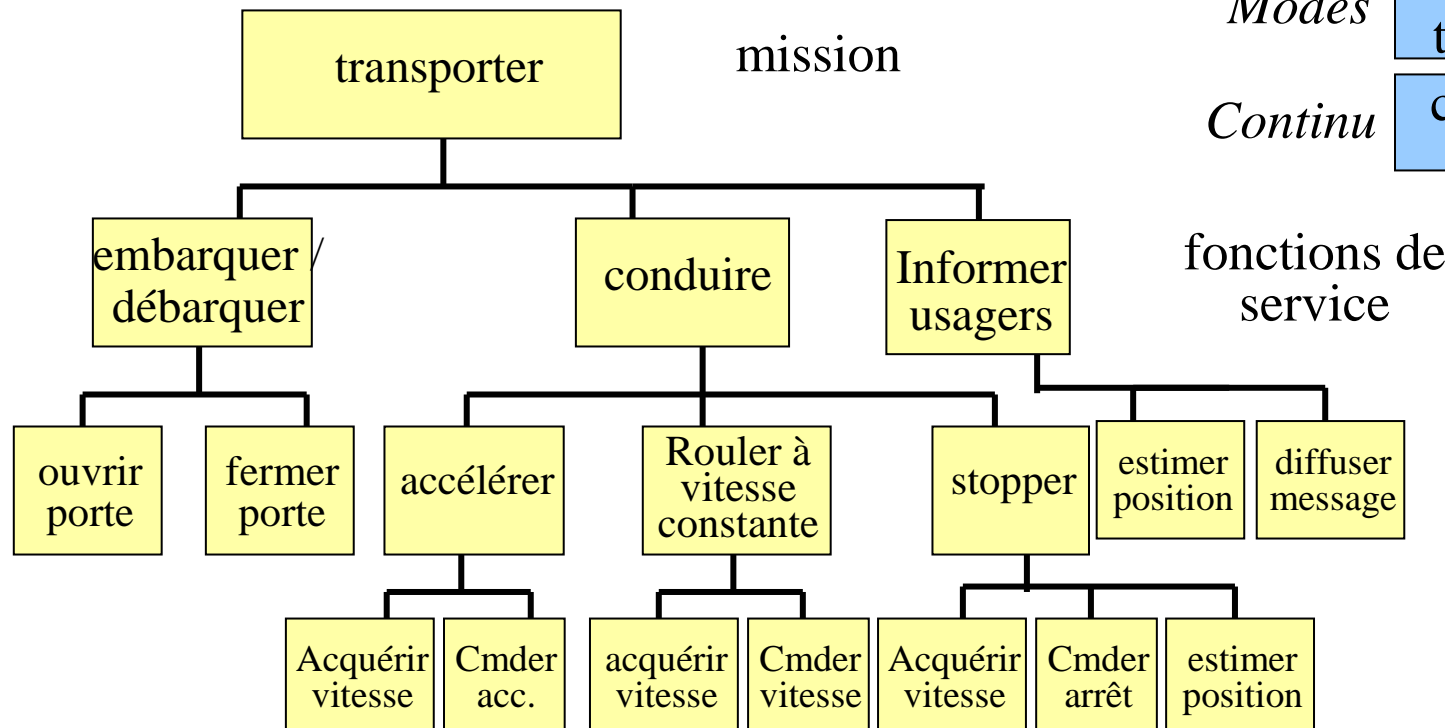
Modes

contrôle des
transitions entre états

Continu

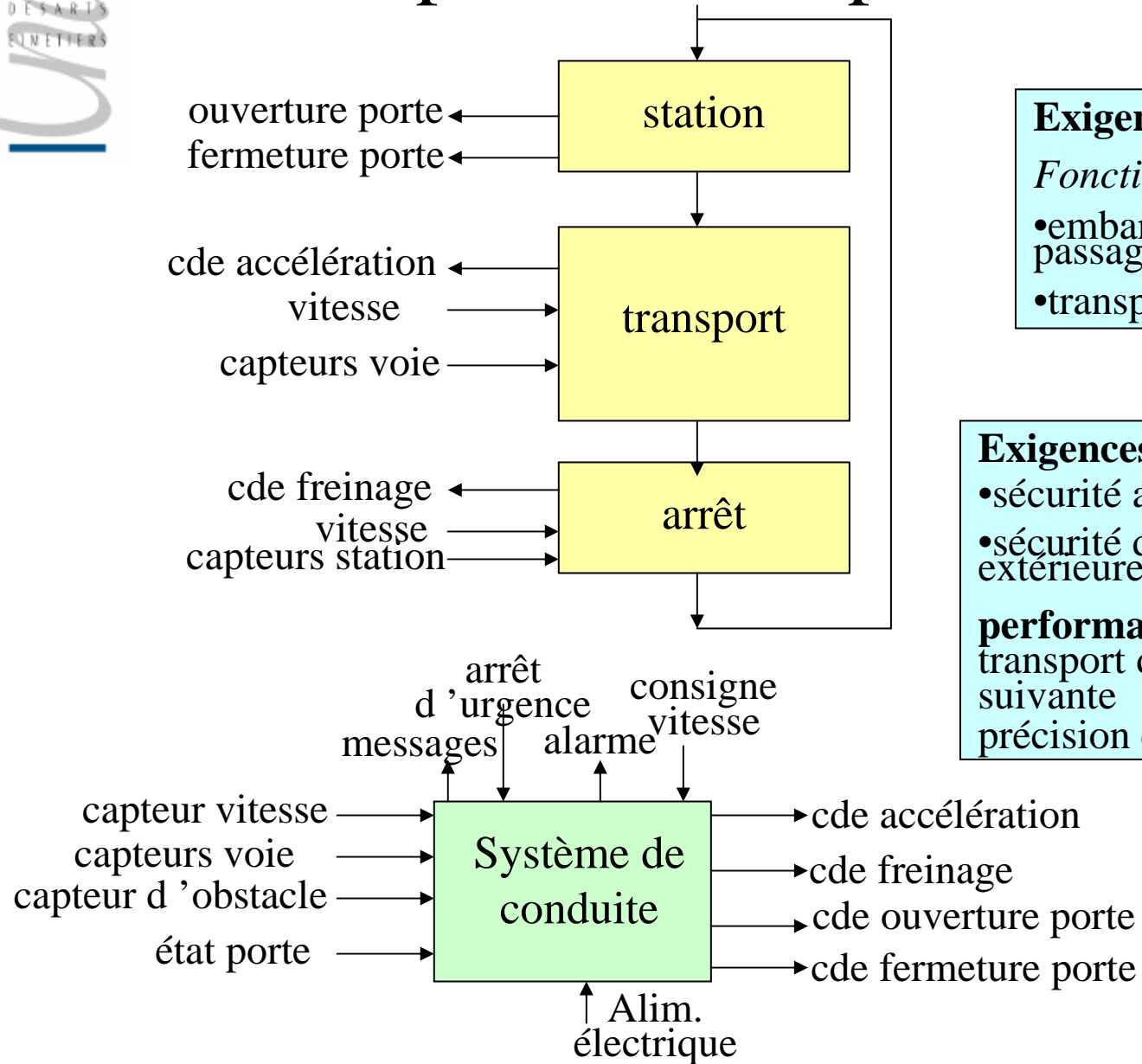
contrôle du système
opérant

Décomposition fonctionnelle



Arborescence fonctionnelle

Exemple : vision opérationnelle



Exigences fonctionnelles

Fonctions de service

- embarquer / débarquer passagers
- transporter

Exigences non fonctionnelles

- sécurité absolue des passagers
- sécurité des personnes extérieures

performances : temps de transport d'une station à la suivante
 précision des arrêts

Vision fonctionnelle interne

Décomposition temporelle

*Phases
de vie*

évolution

Fonctionnement

marche / arrêt /
maintenance

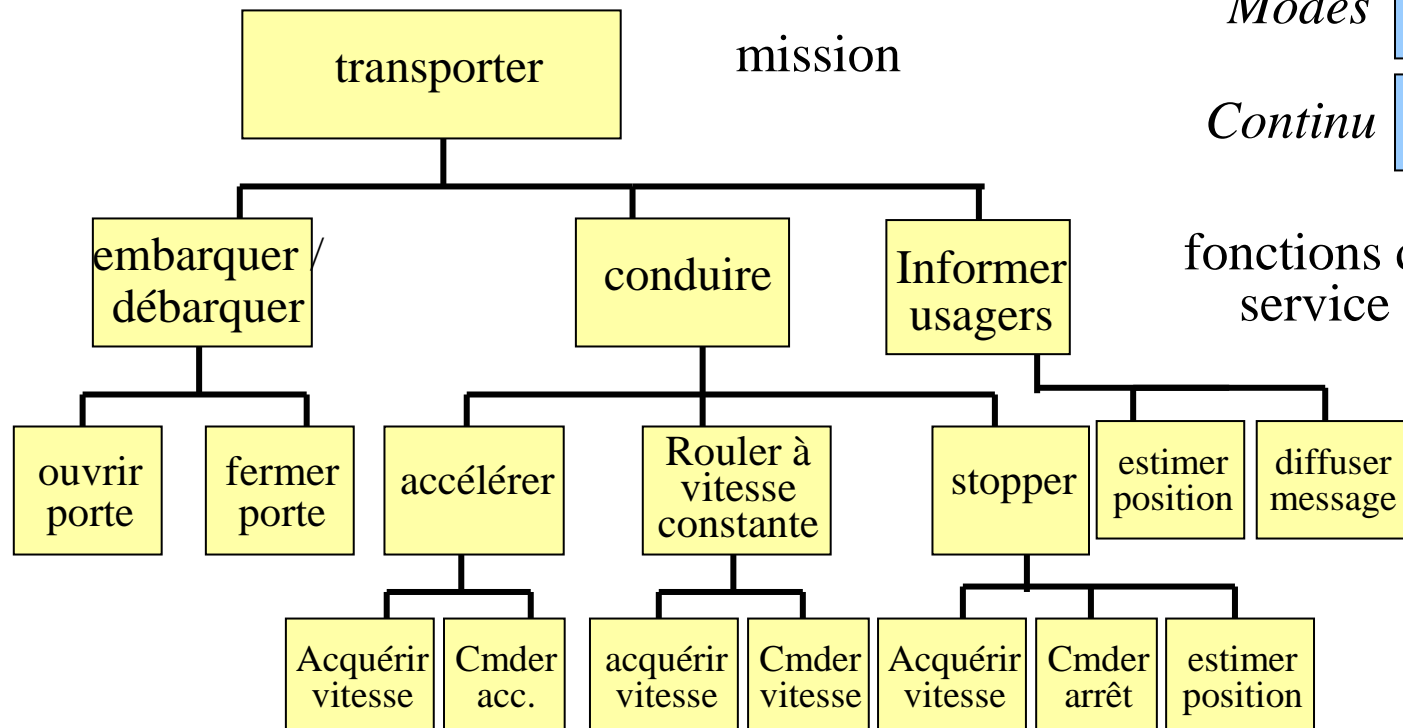
Modes

contrôle des
transitions entre états

Continu

contrôle du système
opérant

Décomposition fonctionnelle

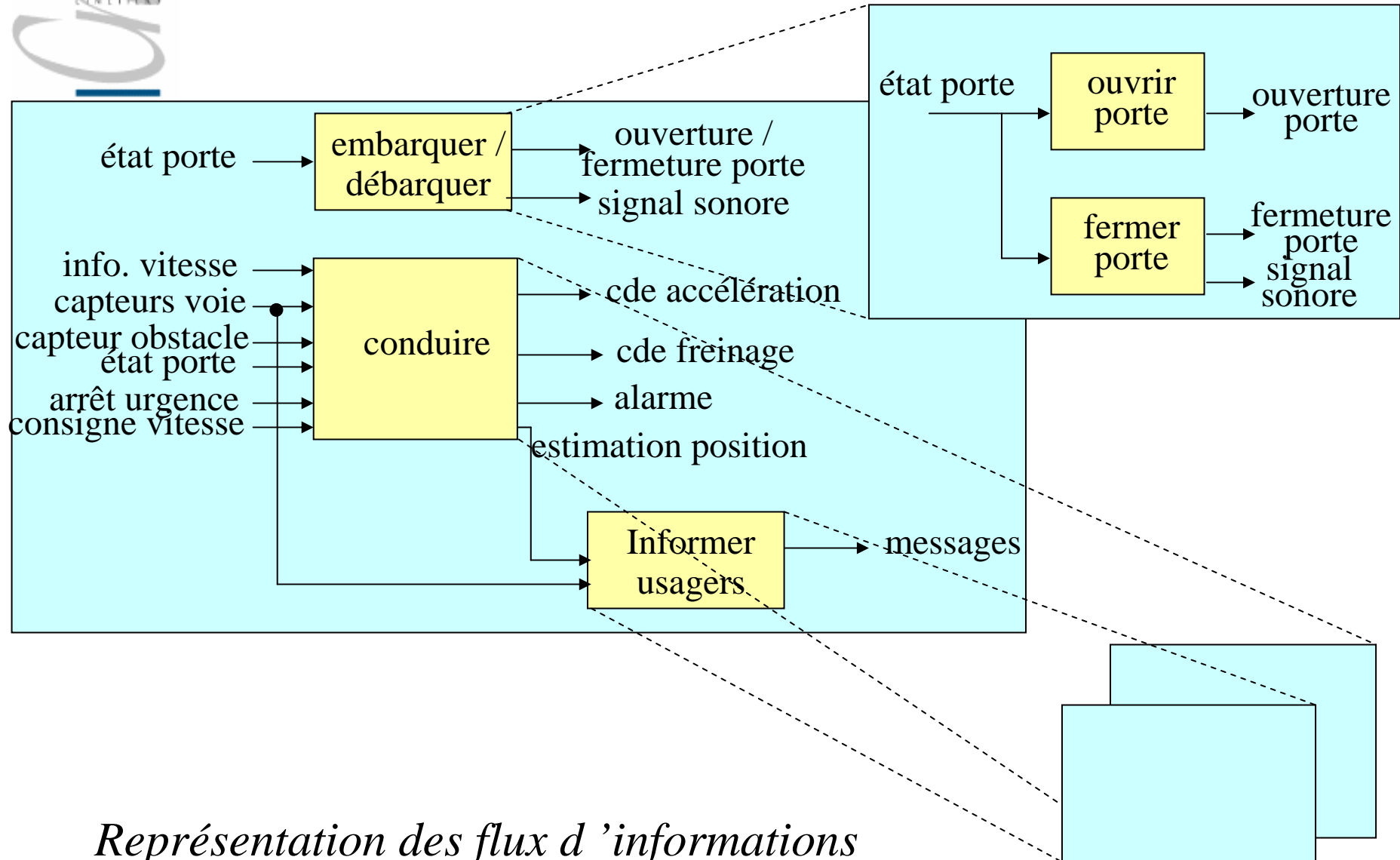


fonctions de
service

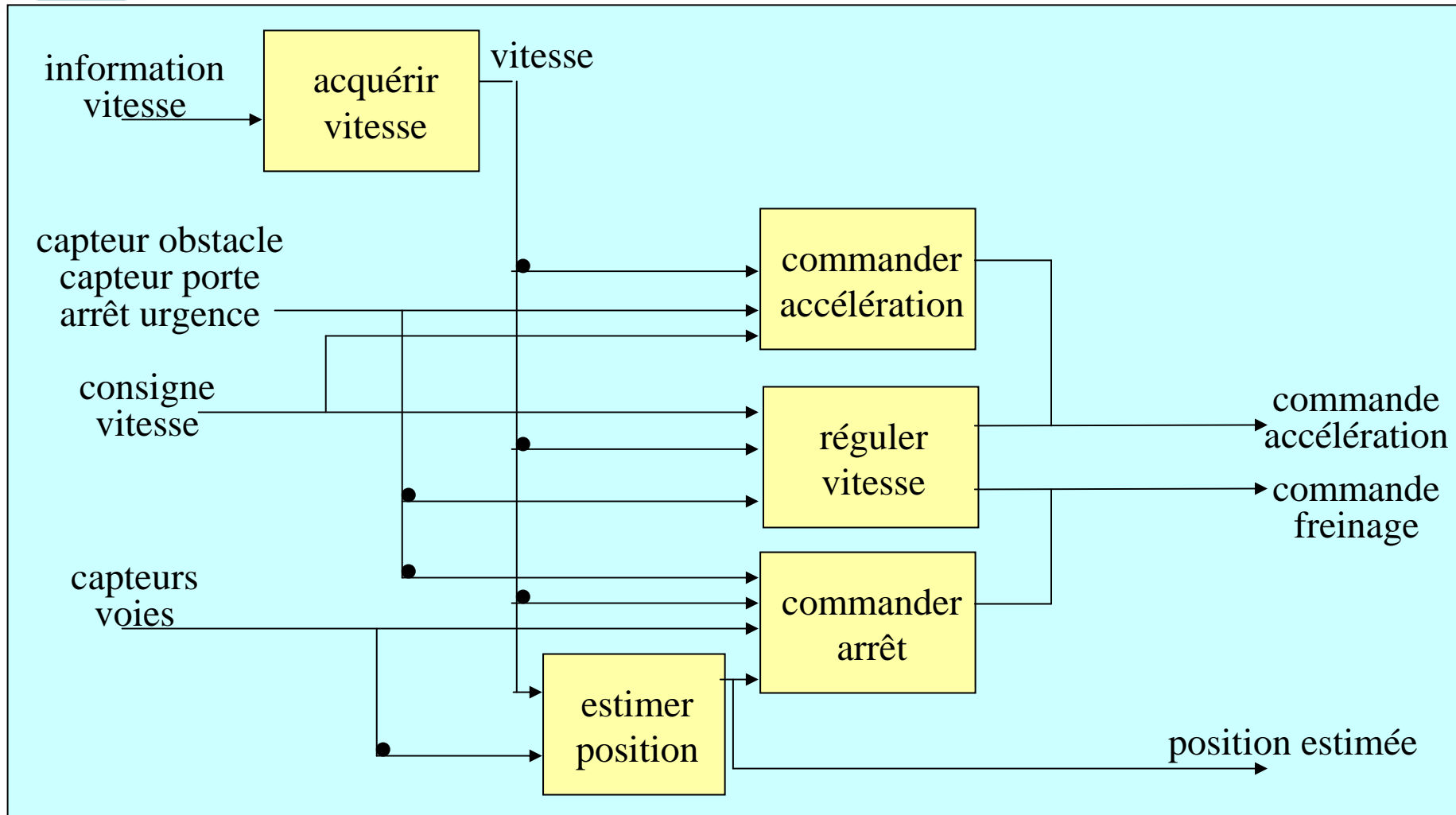
Fonctions
techniques

Arborescence fonctionnelle

Flux d'information

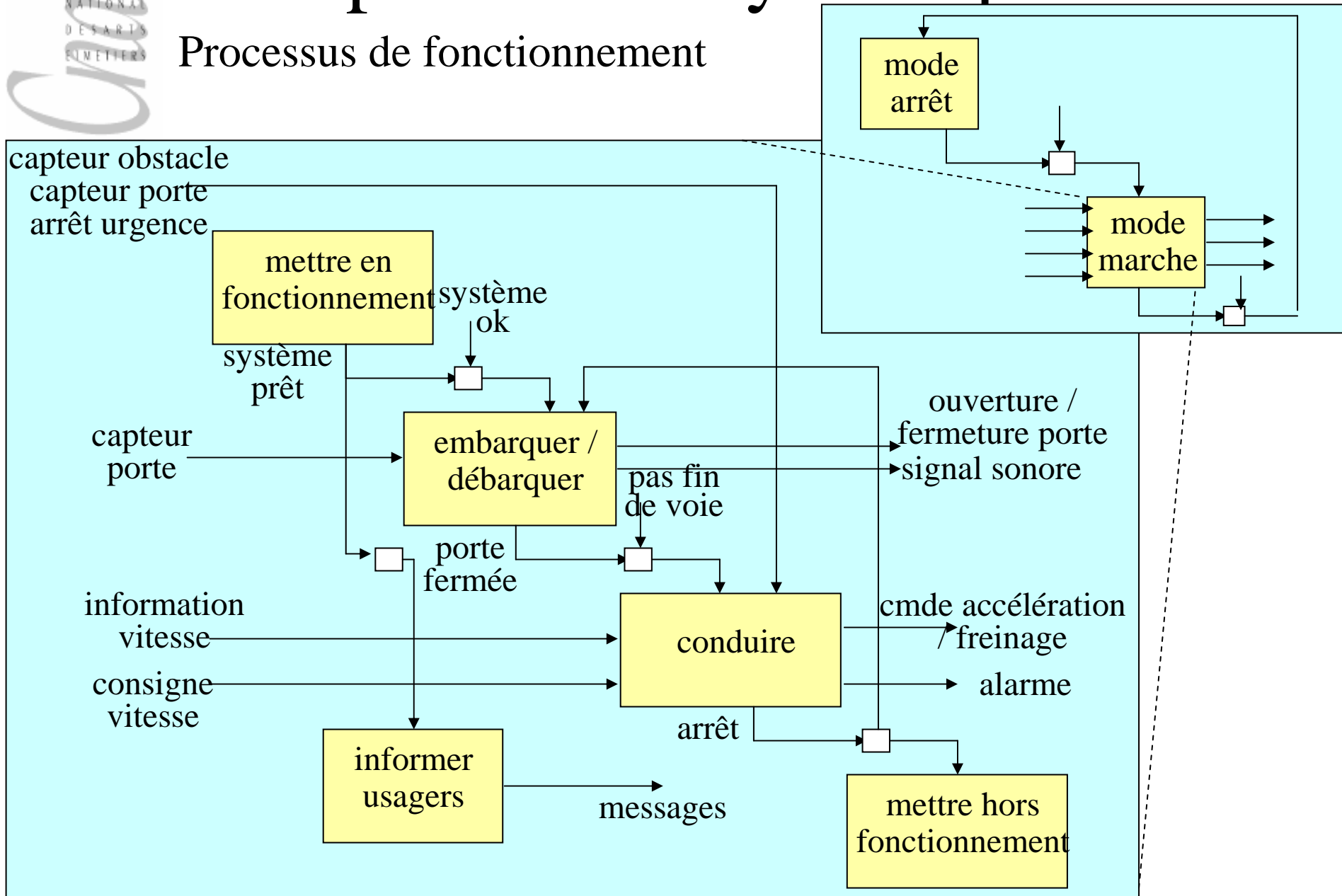


Flux d'information(2)

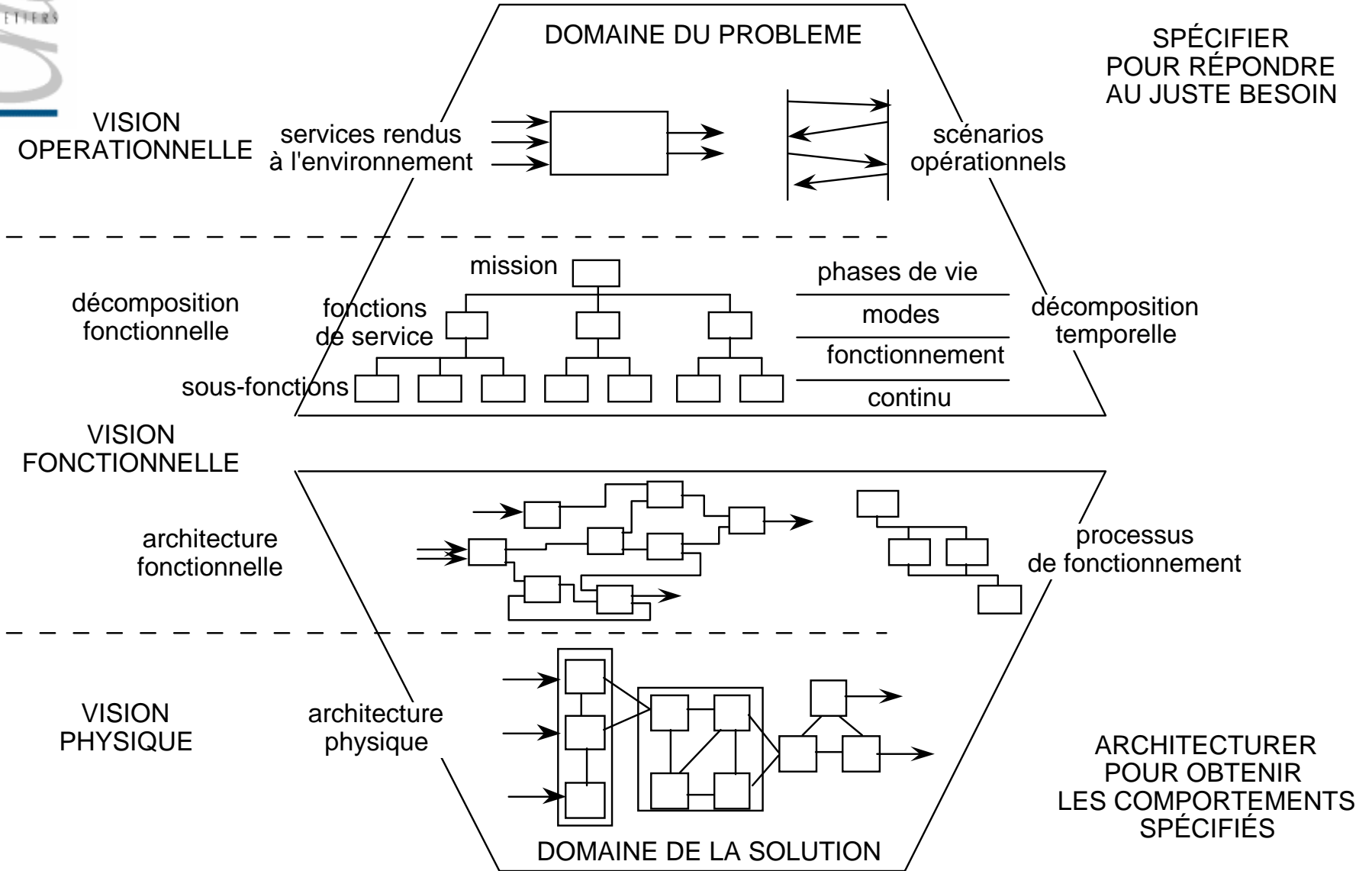


Comportement dynamique

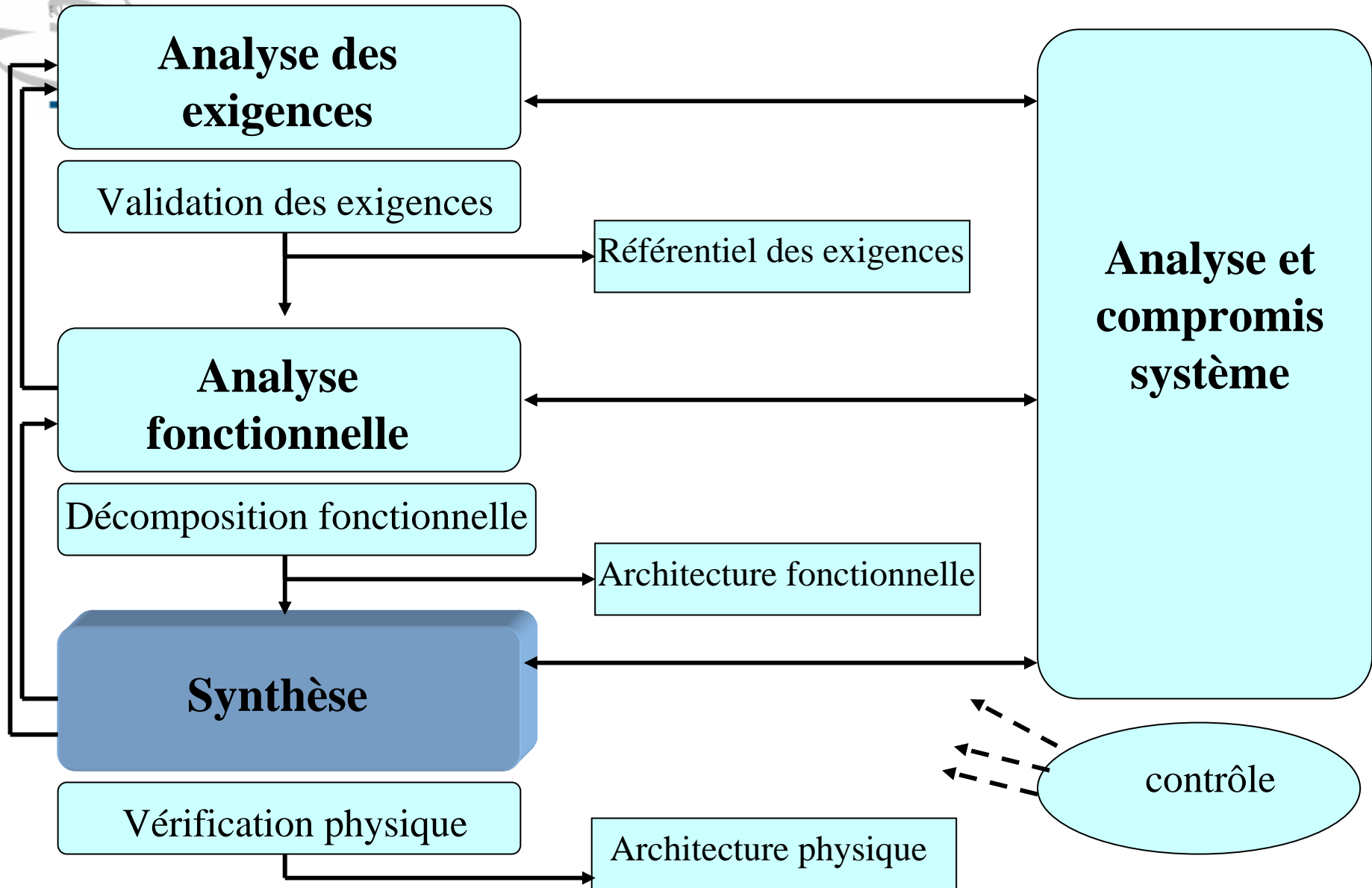
Processus de fonctionnement



Analyse fonctionnelle



La phase de synthèse



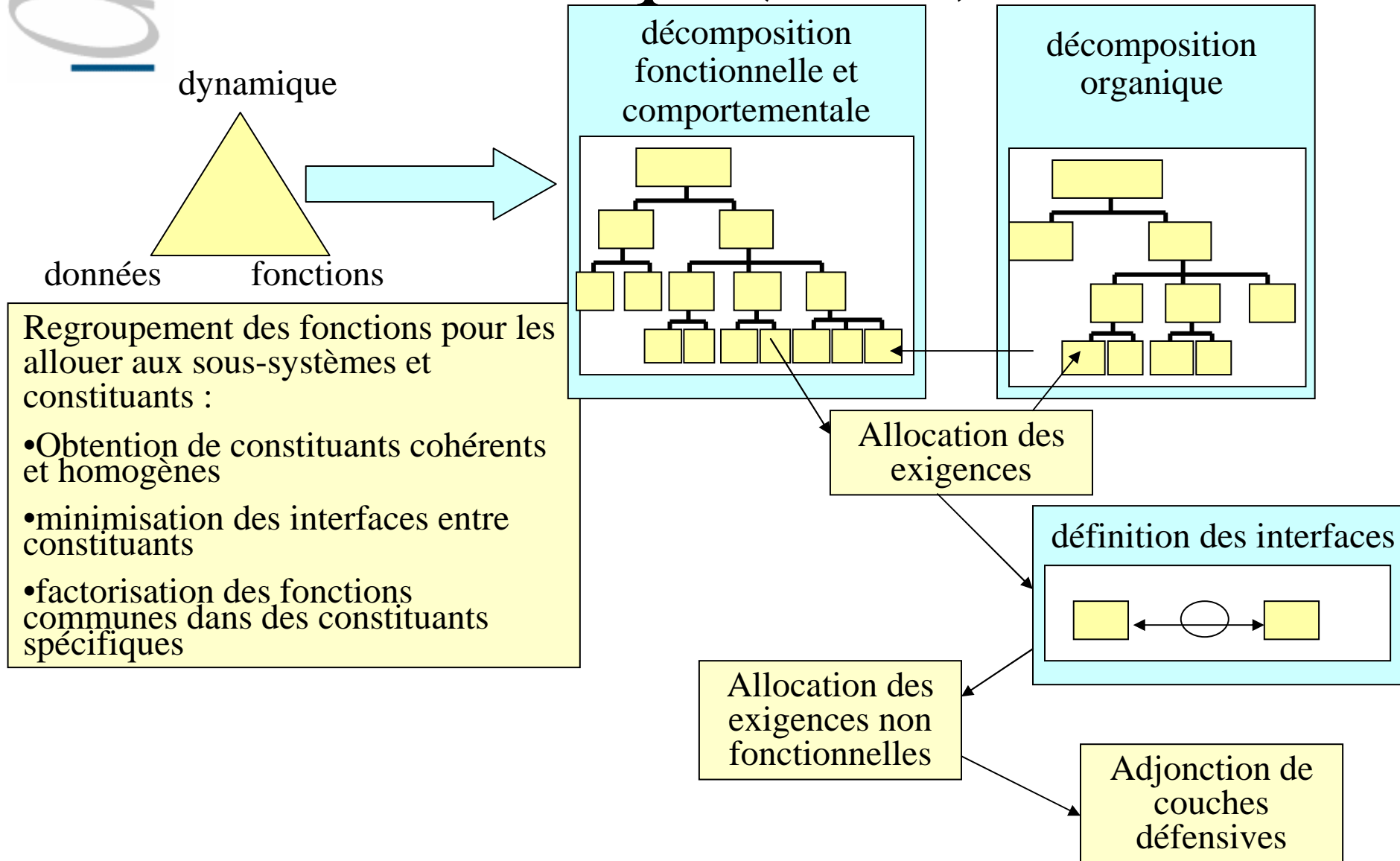
La phase de synthèse

- **Objet** : définition de l'architecture physique
- modélise une solution sous la forme d'un assemblage de constituants
 - existants
 - ou réalisables par les différents génies
- allocation à chaque constituant de fonctions et contraintes de performances de l'architecture fonctionnelle
- allocation aux organes physiques des interfaces et spécification de chaque constituant
- spécification des composants à développer

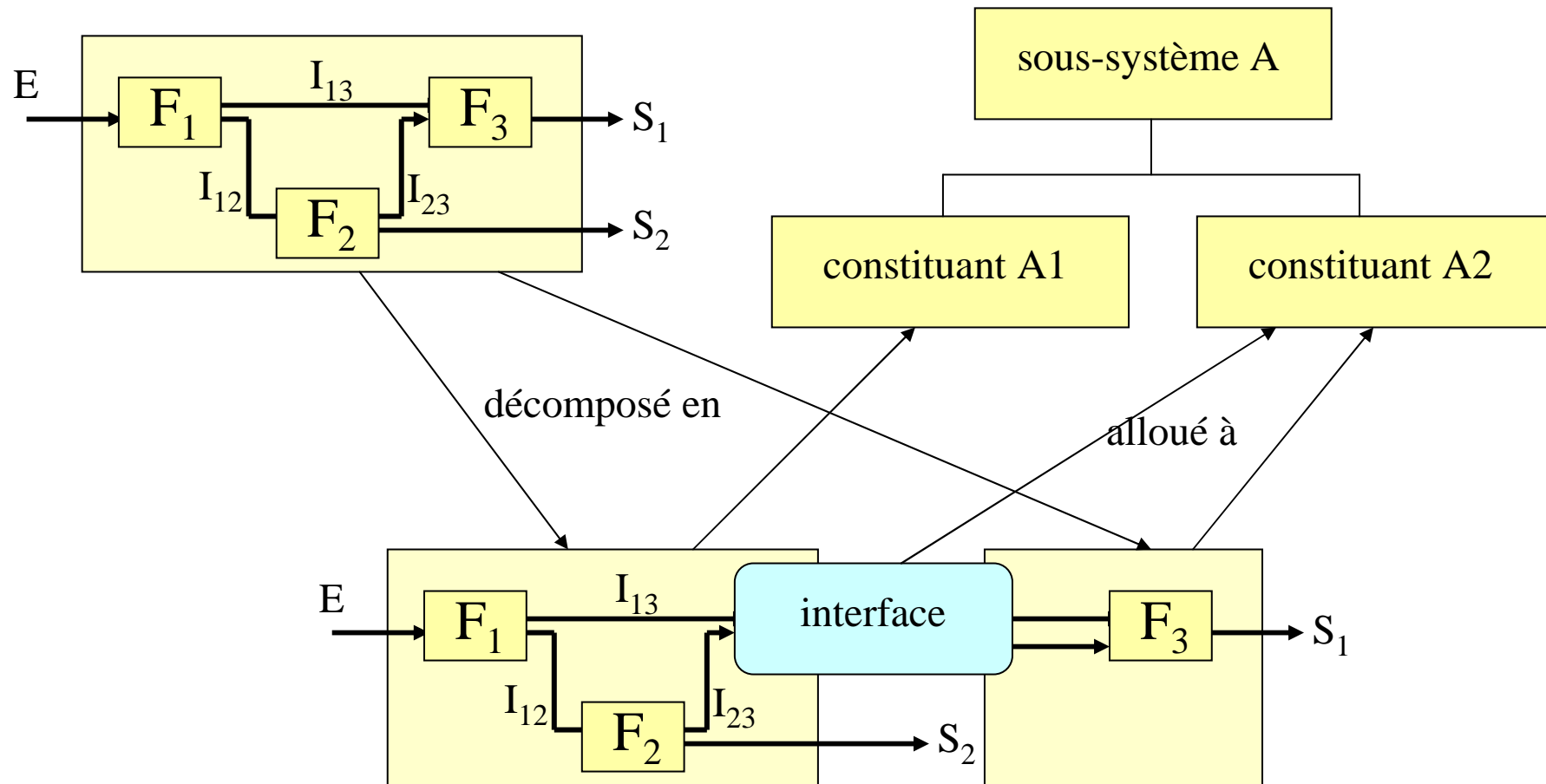
Démarche de conception de systèmes informatiques

- **Conception d'un modèle d'architecture logique**, indépendant des produits
- **Recherche d'une infrastructure** ou configuration de base conforme à cette architecture
 - mécanismes de communication, standards, ...
- **Recherche de constituants** compatibles préexistants sur le marché ou capitalisés par le maître d'œuvre
- **Spécification des constituants spécifiques** ou des interfaces

Conception de l'architecture technique (RDD)



Allocation des fonctions aux organes



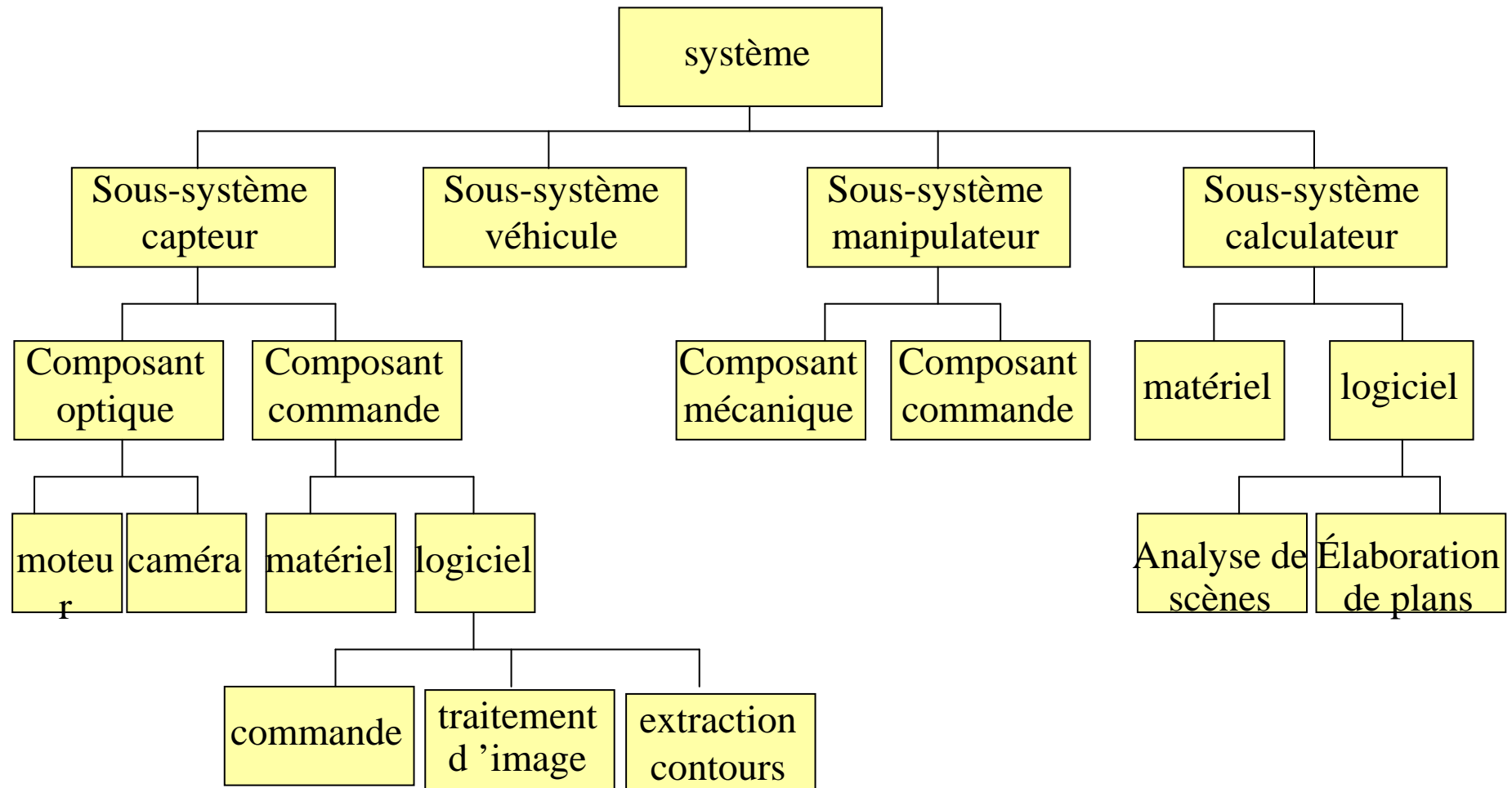
La phase de synthèse

A l'issue de la phase de synthèse :

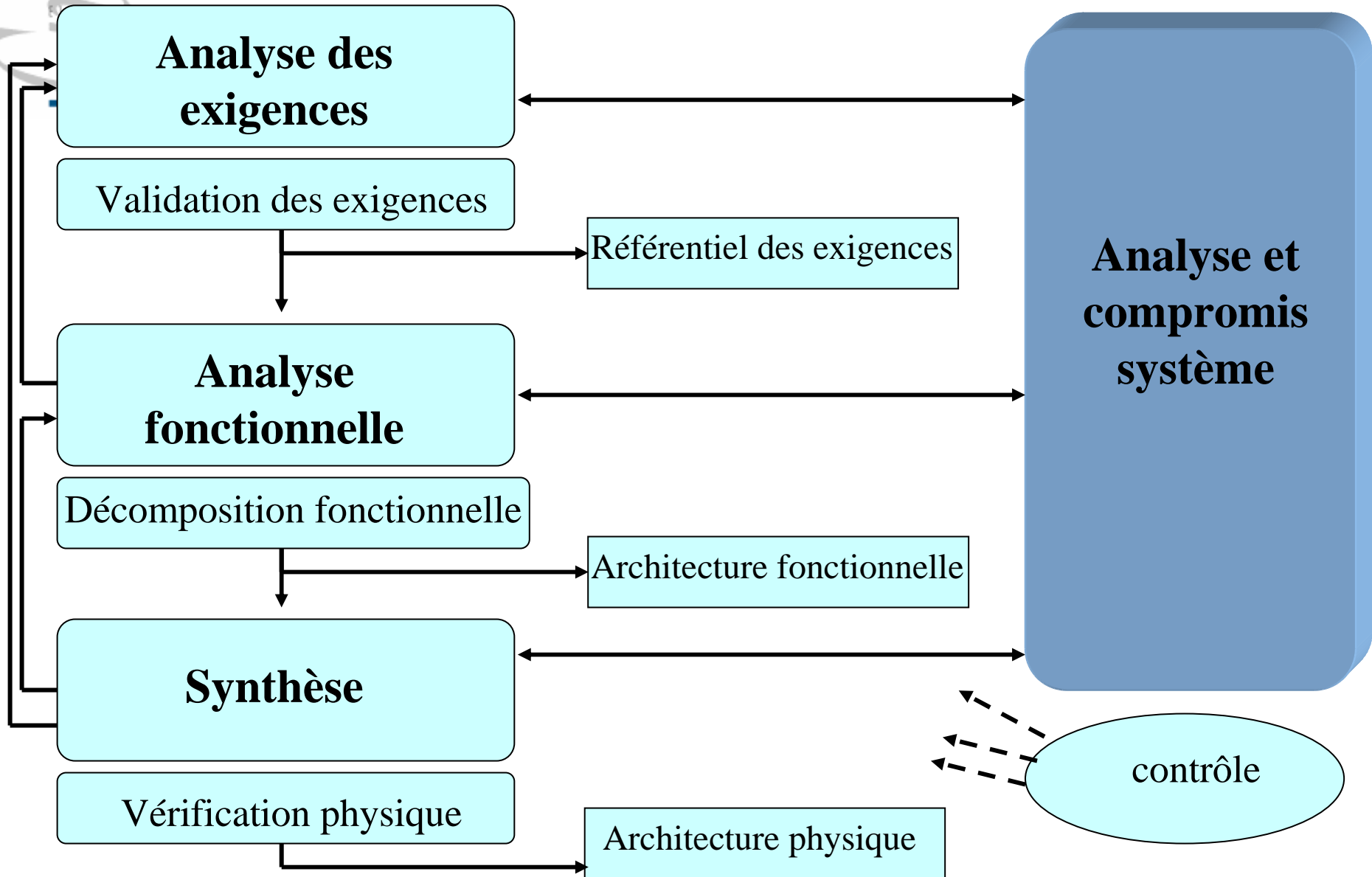
- configuration de l'architecture physique du système
- arborescence produit (PBS)
- structure des tâches (WBS)
- spécification des sous-systèmes et constituants à réaliser
- définition de leurs cycles de vie
- définition des tests de validation
- techniques et tests d'intégration

Architecture physique

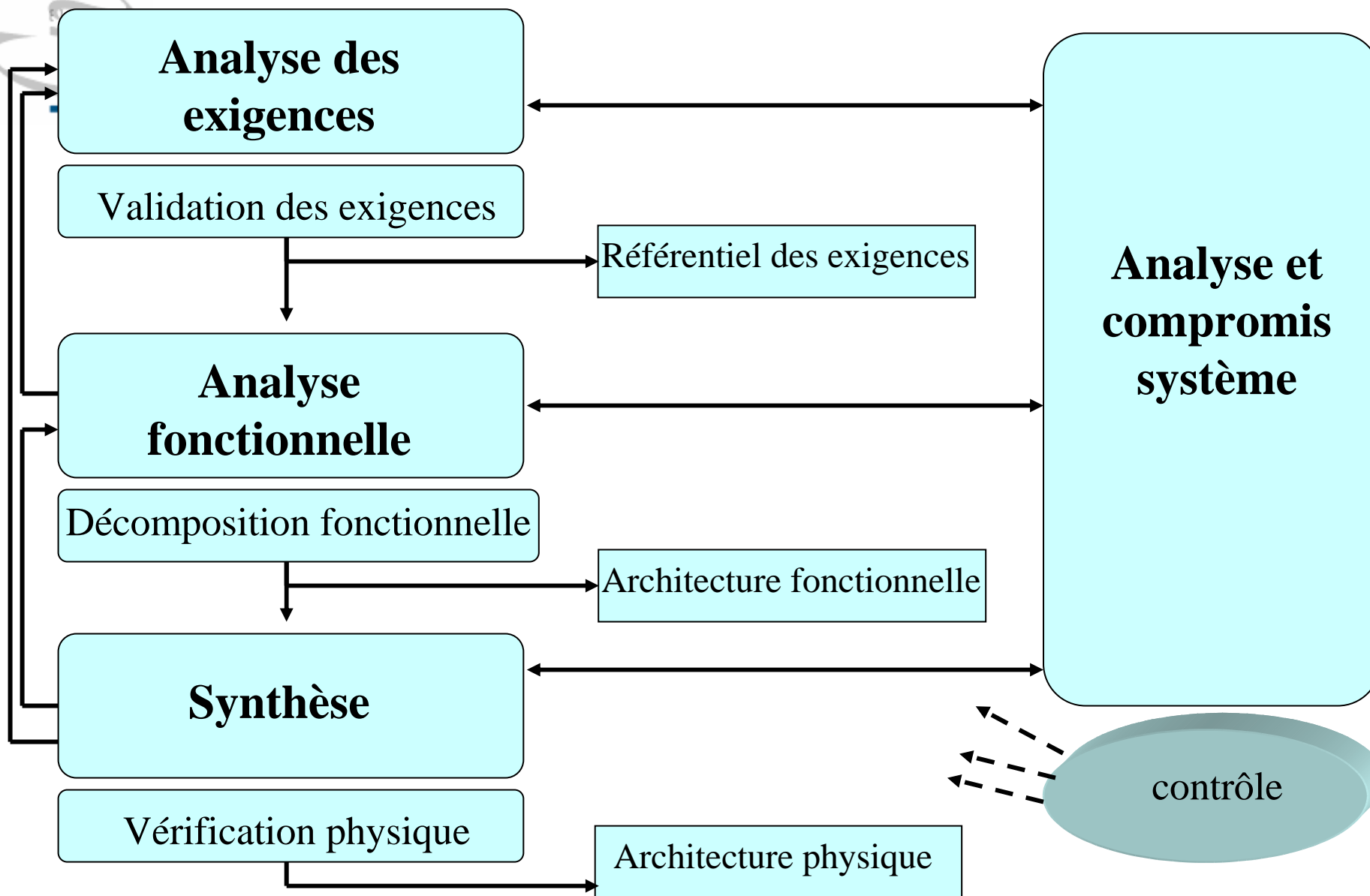
Exemple : robot mobile



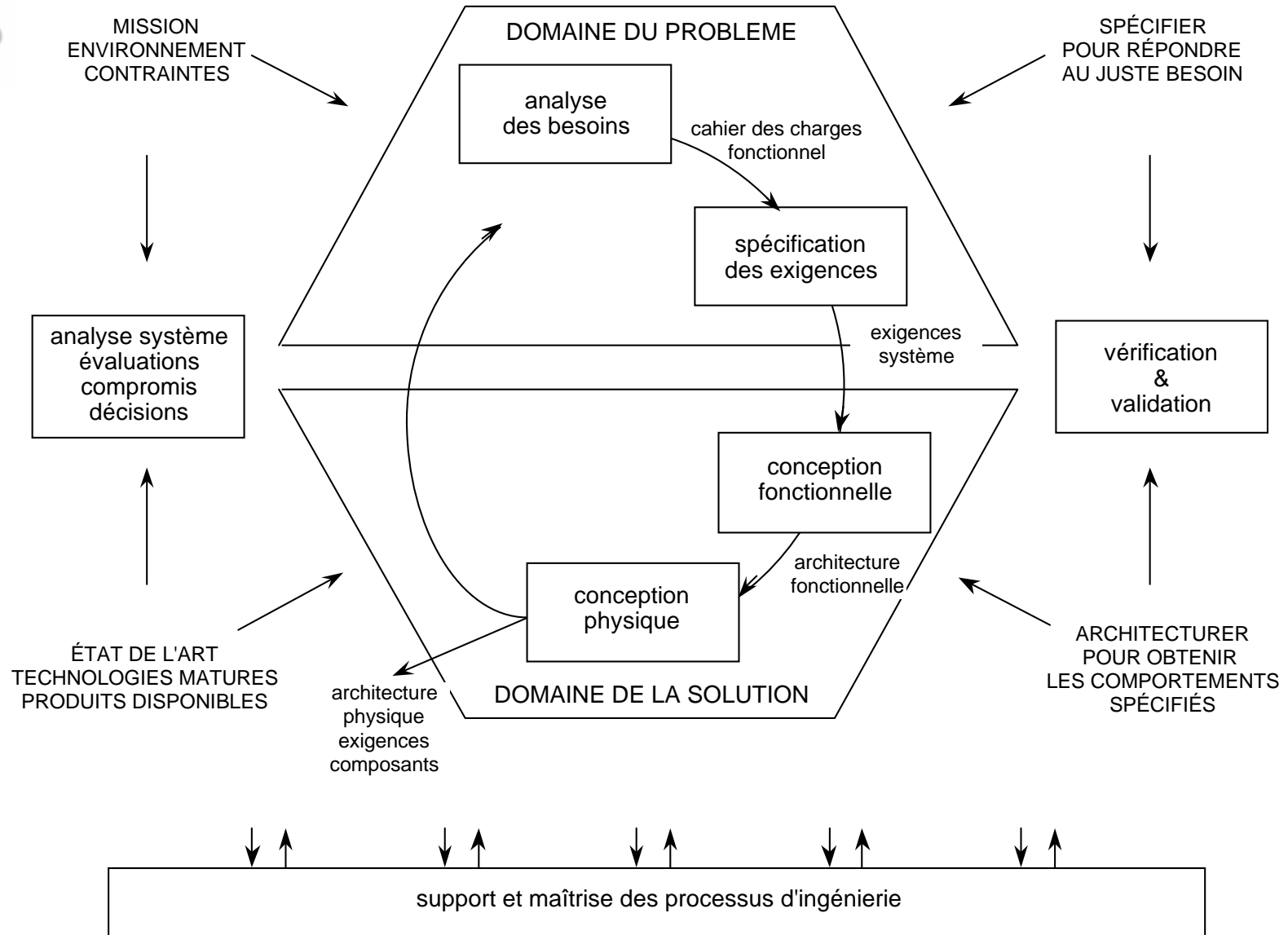
L'analyse système



Le contrôle



L'ingénierie des systèmes



L'ingénierie des systèmes

