



# Modélisation et évaluation d'architectures multi-agents pour la perception : ingénierie et certification de ces architectures

Pierre Fournet-Fayard, Jean-Marie Proth

► **To cite this version:**

Pierre Fournet-Fayard, Jean-Marie Proth. Modélisation et évaluation d'architectures multi-agents pour la perception : ingénierie et certification de ces architectures. [Rapport de recherche] RR-2400, INRIA. 1994, pp.50. inria-00074275

**HAL Id: inria-00074275**

**<https://hal.inria.fr/inria-00074275>**

Submitted on 24 May 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1 Vocabulaire et notions fondamentales</b>	<b>6</b>
1.1 La théorie de l'organisation . . . . .	6
1.2 Le vocabulaire de base . . . . .	7
1.3 La modélisation . . . . .	7
1.4 La conception . . . . .	8
<b>2 Le nœud intelligent</b>	<b>9</b>
2.1 Le modèle à cinq étapes d'un rôle . . . . .	9
2.2 De la nécessité des Réseaux de Petri . . . . .	11
2.3 Représentation d'un rôle par un RdP . . . . .	11
2.4 Interactions entre rôles . . . . .	13
<b>3 La théorie de l'information</b>	<b>19</b>
3.1 L'entropie . . . . .	19
3.2 La transmission . . . . .	20
3.3 La loi partielle de l'information . . . . .	22
3.4 Modélisation des signaux en entrée . . . . .	23
3.5 Application au modèle à cinq transitions . . . . .	24
3.6 Influence d'une base de données sur le système . . . . .	25
<b>4 Mesure des performances</b>	<b>26</b>
4.1 Les mesures quantitatives . . . . .	26
4.1.1 La précision . . . . .	26
4.1.2 La cadence . . . . .	27
4.1.3 La synchronisation . . . . .	27
4.1.4 La consistance mutuelle . . . . .	28
4.2 Les mesures qualitatives . . . . .	33
4.2.1 La consistance . . . . .	33
4.2.2 La coordination . . . . .	33
<b>5 Synthèse d'architectures</b>	<b>34</b>
5.1 Les structures de flux d'informations . . . . .	34
5.2 Interactions possibles entre les D.F.S. . . . .	35

5.3	Les classes de D.F.S. . . . . .	35
5.4	Le degré de complexité . . . . .	36
5.5	Le degré de redondance . . . . .	37
5.6	Organigramme . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Modélisation des agents de perception</b>	<b>39</b>
6.1	Définition des variables . . . . .	39
6.2	Application du théorème de Bayes . . . . .	40
6.3	Résolution par arbitrage . . . . .	43
6.4	Résolution par négociation . . . . .	44
	<b>Conclusion</b>	<b>45</b>
	<b>Lexique</b>	<b>46</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>
	<b>Index</b>	<b>49</b>

# Table des figures

2.1	Le modèle à cinq étapes d'un rôle . . . . .	10
2.2	Représentation d'un rôle par un réseau de Petri à cinq transitions . .	12
2.3	Représentation d'un sélecteur par un RdP coloré . . . . .	13
2.4	Interactions admissibles du rôle $i$ vers le rôle $j$ . . . . .	14
2.5	Exemple de gestion d'un aéroport . . . . .	16
4.1	Diagramme de calcul de la précision $J$ . . . . .	26
4.2	Un exemple d'organisation hiérarchique . . . . .	30
4.3	Précision et charge de travail pour un tempo imposé . . . . .	32
4.4	Consistance mutuelle fonction de la précision et du tempo . . . . .	32
5.1	Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 1 . . . . .	35
5.2	Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 2 . . . . .	36
5.3	Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 3 . . . . .	36
5.4	Exemple d'une organisation de classe 13 . . . . .	37
6.1	$P(E/L_k)$ pour une classe de 11 agents identiques . . . . .	41
6.2	Evolution du nombre $\tilde{k}$ minimal d'agents en fonction de $\tilde{P}_r$ . . . . .	44

# Introduction

TOUTS CEUX qui eurent l'occasion de voir ou de lire "A la poursuite d'Octobre Rouge" [Clancy 84] se souviennent de l'un des aspects de la lutte anti sous-marine : à partir d'informations provenant de sources diverses, un système composé d'hommes et de machines devait pouvoir signaler la présence d'un sous-marin dans un certain secteur géographique et agir en conséquence. Le système décrit est un bon exemple d'architecture distribuée multi-agents devant parvenir à localiser un intrus et prendre les décisions qui s'imposent pour y parvenir.

Les moyens mis en œuvre dans ce type d'opération peuvent être très importants, les différentes ressources employées être dispersées dans l'espace et leur nombre impliquer la présence d'un système coordinateur. La nature des décisions à prendre peut aussi exiger l'accès à une base de données.

L'importance des missions confiées à ces architectures et le coût qu'impliquerait des décisions erronées nécessitent de pouvoir, dans une étape préliminaire de conception, certifier la viabilité de ces architectures, déceler l'origine des points faibles rencontrés et proposer des solutions d'optimisation du système.

L'étude de ces architectures multi-agents est un domaine connexe à beaucoup d'autres : le traitement du signal, la théorie de l'information, l'intelligence artificielle et les réseaux de Petri. Les méthodes de validation feront tantôt appel à la simulation, tantôt à l'analyse mathématique.

Dans cette étude, nous nous sommes particulièrement attachés à un travail bibliographique. L'équipe du professeur Alexander H. LEVIS mène depuis plusieurs années des recherches sur ce sujet, tout d'abord dans le cadre du *LIDS*<sup>1</sup>, puis au sein du *DSE*<sup>2</sup>. La haute qualité de ses publications et leur grand intérêt scientifique nous ont amenés à leur consacrer la majeure partie de nos efforts.

---

1. Laboratory for Information and Decision Systems – M.I.T. – Cambridge – MA 02139

2. Department of Systems Engineering – George Mason University – Fairfax – VA 22030

Dans la première partie de ce document, nous définissons le vocabulaire et les notions fondamentales relatives à notre problème. Nous poursuivons par la description de la structure élémentaire des systèmes de prise de décision : le nœud intelligent. Nous étudions sa structure et la nature de ses connexions avec le reste du système.

Nous consacrons un chapitre à la présentation de la théorie de l'information et un autre aux notions de mesure de performance et de domaine des solutions admissibles qui nous permettent ensuite d'évaluer des structures existantes. Puis nous proposons une procédure de conception d'organisation satisfaisant à un cahier des charges donné.

Nous concluons cette étude par une extension originale de modélisation des agents de perception d'une organisation.

## Chapitre 1

# Vocabulaire et notions fondamentales

LES ORGANISATIONS humaines sont par définition des *systèmes distribués intelligents*<sup>1</sup>, où l'intelligence est "ce que les hommes admirent mais ne comprennent pas encore" et où les ressources sont réparties dans l'espace afin que chacune contribue à plusieurs fonctions différentes [Minsky 86].

### 1.1 La théorie de l'organisation

Nous allons nous intéresser à des organisations chargées d'accomplir des missions dans des domaines d'application très variés. Mais plus encore que l'aspect qualitatif, nous chercherons à quantifier les organisations étudiées. L'objectif selon [Drenick 86] est "de pouvoir déduire des conclusions à partir d'hypothèses grâce à des raisonnements mathématiques".

Nous connaissons déjà plusieurs divisions des tâches. Dans les systèmes mécaniques, telles que les unités de production, le concept-clef est la division du travail. A l'inverse, dans les organisations humaines, l'organisation classique est la hiérarchie. Le type d'organisation qui nous intéresse traite des informations et prend des décisions : la forme de l'organisation est principalement déduite des capacités limitées de traitement et de mémoire de chaque acteur [Levis 93].

Pratiquement, les hypothèses permettant une approche rationnelle sont très restrictives, mais nous verrons qu'il est possible de les relaxer dans la pratique. Notre attention portera sur l'efficacité de ces approches pour traiter les problèmes réels.

La classe d'organisation étudiée se rencontre dans des environnements sévères. Un tel système peut évoluer au sein d'un champ de bataille où les contraintes temporelles sont fortes et les coûts associés à des décisions erronées élevés. Le débit d'information à traiter peut engendrer un non respect de la rationalité car on peut ne pas avoir le temps d'explorer tous les choix possibles.

Les organisations peuvent faire appel à des systèmes d'aide à la décision, des bases de données ou des pré-processeurs de travail. Nous verrons par la suite quelles

---

1. D.I.S. – Distributed Intelligent System – Système distribué intelligent

en sont les implications.

## 1.2 Le vocabulaire de base

Nous appelons *nœud* d'une organisation un *décideur*<sup>2</sup> de celle-ci. Nous définissons une *équipe* comme un ensemble de nœuds ayant le même but, les mêmes intérêts et convictions, et devant être coordonnés pour être plus efficaces [Grevet 88]. La dernière condition ne doit pas être sous-estimée car il n'est pas utile d'assembler des capacités pour les réduire. De plus, l'hypothèse faite dans la littérature est que les membres d'une équipe sont bien entraînés et n'apprennent pas durant l'exécution d'une tâche.

Nous utiliserons aussi les termes de *système*, *environnement*, *contexte* et *paramètres* dans les sens suivants :

**Système** – l'ensemble des composants, leurs interconnexions et l'ensemble des algorithmes implémentés (incluant les bases de données, les moyens de communication, les moyens humains et matériels);

**Environnement** – l'ensemble des éléments sur lesquels le système peut agir et qui agissent sur le système (le trafic aérien pour un système de gestion d'aéroport);

**Contexte** – l'ensemble des éléments qui agissent sur le système et sur lesquels le système ne peut agir (comme les conditions climatiques);

**Paramètres** – l'ensemble des variables caractérisant le système et sa mission (taux de panne, ...).

Un système d'*aide à la décision* est une procédure qui propose des décisions à travers l'utilisation, en particulier, d'algorithmes qui développent les alternatives. Nous les désignerons aussi par le terme de *système support de décision*<sup>3</sup> [Levis 93].

## 1.3 La modélisation

L'effort de modélisation se fera en trois étapes, à savoir :

1. la modélisation des nœuds de l'organisation,
2. la modélisation complète de l'organisation,
3. la modélisation de la tâche à exécuter.

Nous y reviendrons plus en détail dans les chapitres suivants.

---

2. D.M. – Decision Maker – Décideur

3. D.S.S. – Decision Support Systems – Système support de décision



## 1.4 La conception

Le problème principal de la conception de telles architectures est d'affecter des fonctions aux différents nœuds (répondre aux questions suivantes : *Qui reçoit quelle information? – Qui est chargé de prendre telle décision?*) afin qu'ils satisfassent à un cahier des charges.

Cette affectation ne peut se faire s'en prendre en compte les objectifs des missions à réaliser et les capacités des nœuds. Mais l'on doit aussi tenir compte du *réseau d'information* sous-jacent à chaque organisation. Les performances de ce réseau et son influence sur l'organisation doivent aussi être analysées. Nous étudierons ce point dans le chapitre 5.

## Chapitre 2

# Le nœud intelligent

Nous avons vu précédemment que l'entité fondamentale d'une organisation était le nœud. Chaque nœud participe à plusieurs fonctions. L'ensemble d'une fonction élémentaire et d'un nœud est appelé un *rôle*. Le rôle est la plus petite entité résultant d'une décomposition fonctionnelle.

On trouve différentes représentations de nœuds dans la littérature scientifique et elles peuvent quelques fois sembler très éloignées les unes des autres, ou ne pas représenter les mêmes concepts. Par exemple, [Andreadakis 87] s'attache à une représentation respectant les *structures de flux d'informations*<sup>1</sup> sur laquelle nous reviendrons dans le chapitre 5, alors que le modèle de [Böttcher 82] est une décomposition fonctionnelle.

Il ne faut jamais perdre de vue que l'on propose un modèle de représentation des rôles. De fait, il ne prétend pas être une bonne illustration de la façon de fonctionner de l'esprit humain ou d'un système expert. Nous ne le considérerons comme intéressant que dans la mesure où les résultats numériques et formels que l'on en déduira pourront être facilement calculés et confrontés au cas réel d'une *organisation décisionnelle*<sup>2</sup>.

### 2.1 Le modèle à cinq étapes d'un rôle

La représentation d'un rôle par un *modèle à étapes* (fig. 2.1) a été introduite originellement par [Böttcher 82] sous une forme à quatre étapes. Le lecteur ne doit pas s'étonner de cet écart par rapport au modèle à cinq étapes notamment décrit en [Levis 93]. En effet, l'essentiel du modèle réside dans ses possibilités de connexion avec d'autres et dans la hiérarchie du traitement des informations. Une représentation de rôle par un modèle à une étape unique avec des possibilités de connexion vers l'extérieur anarchiques serait un modèle vraisemblable pour représenter l'exécution d'une fonction élémentaire par un être humain, mais celle-ci ne nous permettrait pas de dégager des propriétés pertinentes sur des systèmes modélisés de la sorte.

---

1. D.F.S. – Data Flow Structure – Structure de flux d'informations

2. D.M.O. – Decision Making Organization – Organisation décisionnelle

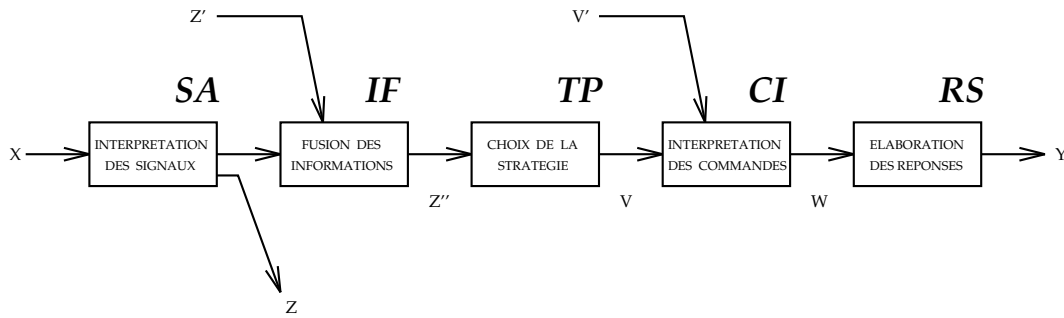


FIG. 2.1 - *Le modèle à cinq étapes d'un rôle*

Les *étapes* représentent les fonctions suivantes :

1. Un rôle reçoit une donnée  $x$  provenant de l'extérieur du système ou d'autres rôles. Elle est traitée dans le premier bloc désigné *Interprétation des signaux* (*SA – Situation Assessment*) afin d'obtenir la situation évaluée  $z$ . Cette variable peut être exportée vers d'autres rôles.
2. Si le rôle reçoit d'autres situations évaluées, il intègre ces informations  $z'$  à sa propre évaluation dans l'étape de *Fusion des informations* (*IF – Information Fusion*) générant ainsi une évaluation révisée  $z''$ .
3. Celle-ci est traitée dans le bloc de *Choix de la stratégie* (*TP – Task Processing*) afin de proposer une stratégie  $v$  à utiliser pour répondre à la situation.
4. Si le système inclut une hiérarchie fonctionnelle, une étape est nécessaire pour intégrer des ordres  $v'$  : c'est l'*Interprétation des commandes* (*CI – Command Interpretation*) délivrant une variable  $w$  contenant la stratégie finalement retenue par le rôle.
5. La dernière étape consiste en l'*Elaboration d'une réponse* (*RS – Response Selection*) désignée par  $y$ .

Le modèle comporte au final trois étages de calcul (SA, TP et RS) et deux d'interaction (IF et CI). Il peut prendre différentes formes selon la nature des relations liant les rôles. S'il n'y a pas de fusion d'information, alors l'étape IF est supprimée et les blocs SA et TP combinés en un nouveau bloc SA. De même, s'il n'y a pas d'ordre en provenance de la hiérarchie, l'étape CI disparaît. Un rôle isolé se ramène alors à deux blocs SA et RS, eux-mêmes combinables en un unique bloc RS.

Il ne s'agit là que d'une façon parmi d'autres de représenter les rôles. Les interactions entre les différents D.M. consistent donc à recevoir des données d'autres D.M., à partager des interprétations de situations, à intégrer des commandes et à générer des réponses à destination d'autres D.M. ou de l'extérieur.

## Exemple

Considérons une organisation  **fictive**  devant gérer l'allocation des pistes d'un aéroport à des avions. Il s'agit de calculer un ordonnancement d'utilisation des ressources (nombre de pistes de l'aéroport) à des actions à réaliser (faire décoller ou atterrir des appareils). Cette fonction d'ordonnancement est confiée à un nœud (un contrôleur aérien). Un exemple de modélisation de rôle serait le suivant :

1. Dans le bloc SA, nous évaluons la situation extérieure  $x$ . Parmi l'ensemble des informations, nous prenons acte qu'un avion désire se poser (information  $z$ ).
2. Un autre appareil doit absolument se poser au plus tôt à la suite d'un problème technique. Le bloc IF sert à combiner cette information  $z'$  à  $z$  afin d'obtenir une situation révisée  $z''$ .
3. Dans le bloc TP, nous déterminons quel algorithme  $v$  doit être utilisé pour affecter les pistes aux appareils.
4. La hiérarchie peut imposer que l'appareil en détresse atterrisse une piste proche des unités de secours. C'est l'information  $v'$  intégrée dans le bloc CI qui choisit d'utiliser la stratégie  $w$  pour répondre.
5. L'affectation  $y$  est finalement calculée par le bloc RS.

## 2.2 De la nécessité des Réseaux de Petri

La représentation par schéma-bloc présente une grave lacune. Sur la figure 2.1, la nécessité d'avoir simultanément la situation évaluée  $z$  et la connaissance d'autres situations par  $z'$  n'apparaît pas.

Les *réseaux de Petri* (*RdP*) sont un bon outil pour représenter les notions de synchronisation, conflit ou choix, parallélisme et cumul. Le lecteur intéressé trouvera une bonne introduction aux réseaux de Petri dans [David 89] ainsi qu'une étude mathématique très complète dans [Brams 83].

L'ambiguïté de la structure est levée si l'on considère les *jetons* comme porteurs d'informations.

Un autre avantage des réseaux de Petri est de pouvoir explicitement montrer les risques de *blocage* (*dead-lock*) qui se produisent lorsque qu'un D.M. attend un message d'un autre pour générer une réponse, alors que le second attend la réponse du premier pour lui renvoyer une donnée.

Il est délicat de se protéger des blocages, mais les réseaux de Petri constituent des outils efficaces pour mettre en place les procédures qui permettent de les éviter.

## 2.3 Représentation d'un rôle par un RdP

Nous utilisons les *réseaux de Petri colorés*, une *extension* des réseaux de Petri monochromatiques, afin d'intégrer au jeton le type d'information qu'il transporte.

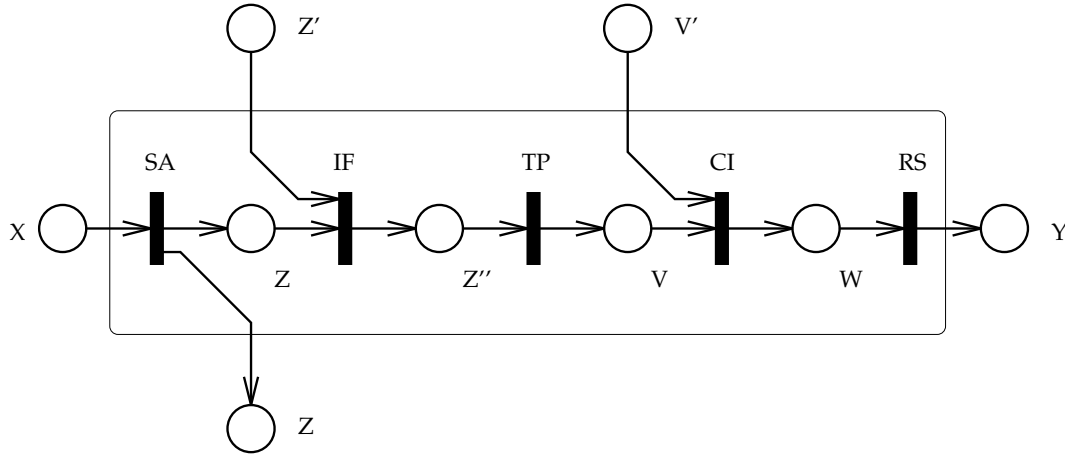


FIG. 2.2 - Représentation d'un rôle par un réseau de Petri à cinq transitions

L'intelligence de ce modèle est intégrée dans les différents algorithmes attachés aux *transitions* SA, TP et RS (aussi appelées *transitions intelligentes*). Grâce au formalisme des réseaux de Petri colorés, ces différents algorithmes peuvent être représentés comme une unique transition réagissant de façon très diverse suivant le type d'information transportée par le jeton.

Au sein de cette transition, il y a une *sélection (switch)* d'algorithmes suivant la couleur  $C$  du jeton à traiter. Définissons par  $\mathcal{P}_{(u=i | C)}^T$  la probabilité que l'algorithme  $u$  choisi dans la transition  $T$  soit  $i$  sachant que la couleur du jeton est  $C$ .

Si l'on choisit toujours le même algorithme  $i$  pour une même couleur  $C$  de jeton, la *stratégie* sera dite *pure* pour la transition  $T$ , ce qui s'exprime par :

$$\mathcal{P}_{(u=i | C)}^T = 1 . \quad (2.1)$$

Sinon la stratégie est dite *mixte*.

La stratégie de sélection d'un algorithme  $i$  au sein des  $u \in \{1, 2, \dots, U\}$  algorithmes de l'étape SA est :

$$\mathcal{P}_{(u=i | C)}^{SA} , \quad (2.2)$$

celle de l'algorithme  $j$  parmi les  $v \in \{1, 2, \dots, V\}$  algorithmes de TP s'écrit :

$$\mathcal{P}_{(v=j | C)}^{TP} , \quad (2.3)$$

et celle de l'algorithme  $k$  parmi les  $w \in \{1, 2, \dots, W\}$  de RS :

$$\mathcal{P}_{(w=k | C)}^{RS} . \quad (2.4)$$

### Exemple

Pour illustrer les notions de stratégies pures ou mixtes, considérons un sélecteur permettant l'utilisation de deux algorithmes  $\mathcal{X}$  et  $\mathcal{Y}$  au sein de la transition SA. Dans le cadre des RdP colorés, nous disposons de trois couleurs de jeton (rouge –  $\mathcal{R}$ , vert –  $\mathcal{V}$  et bleu –  $\mathcal{B}$ ) et nous appliquons les règles suivantes :

- tous les jetons  $\mathcal{R}$  sont traités par l'algorithme  $\mathcal{X}$  et tous les  $\mathcal{V}$  par  $\mathcal{Y}$ ,
- si le jeton est  $\mathcal{B}$ , il y a 30% de chance qu'il soit traité par  $\mathcal{X}$  et 70% par  $\mathcal{Y}$ .

La figure 2.3, où  $p = \mathcal{P}_{(u=i | C)}^{SA}$ , est la représentation d'une sélection de stratégie pure pour les couleurs  $\mathcal{R}$  et  $\mathcal{V}$ , mixte pour  $\mathcal{B}$ .

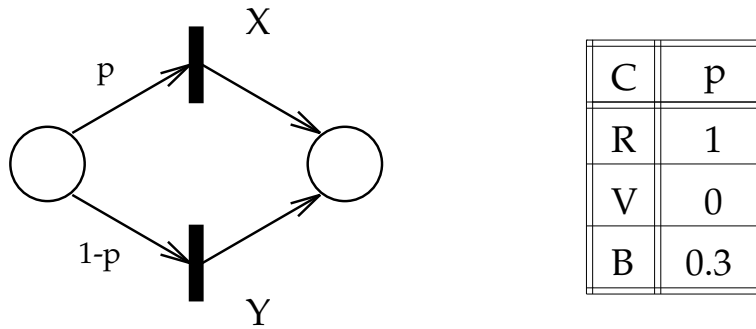


FIG. 2.3 - Représentation d'un sélecteur par un RdP coloré

Il est intéressant de coordonner les sélections d'algorithmes afin d'éviter les blocages. Prenons le cas de deux nœuds interagissant : si le premier choisit un traitement n'exportant pas de résultat vers le second mais nécessitant d'importer des données de celui-ci et si le second attend des données du premier, alors nous nous trouvons dans une situation de blocage. L'ensemble des trois stratégies de choix constitue la *stratégie interne de décision* d'un rôle. Elle est dite pure pour une couleur de jeton si elle est pure pour les trois étapes SA, TP et RS.

Une façon de surmonter ce problème est de créer une table des combinaisons d'algorithmes admissibles [Levis 93] : le RdP ne suffit plus alors à décrire complètement le système décisionnel. Une autre façon de procéder, si l'on souhaite tout intégrer au sein du RdP, est de représenter exhaustivement les chemins symbolisant toutes les combinaisons d'algorithmes possibles. Cela complique très fortement la représentation, mais permet l'utilisation de logiciels garantissant l'absence de blocage.

## 2.4 Interactions entre rôles

Comme nous l'avons vu précédemment, les rôles ne peuvent importer des informations qu'aux étapes SA, IF ou CI, et n'en exportent qu'aux étapes SA et RS. Nous allons étudier les interactions admissibles entre deux rôles  $i$  et  $j$  de nœuds différents

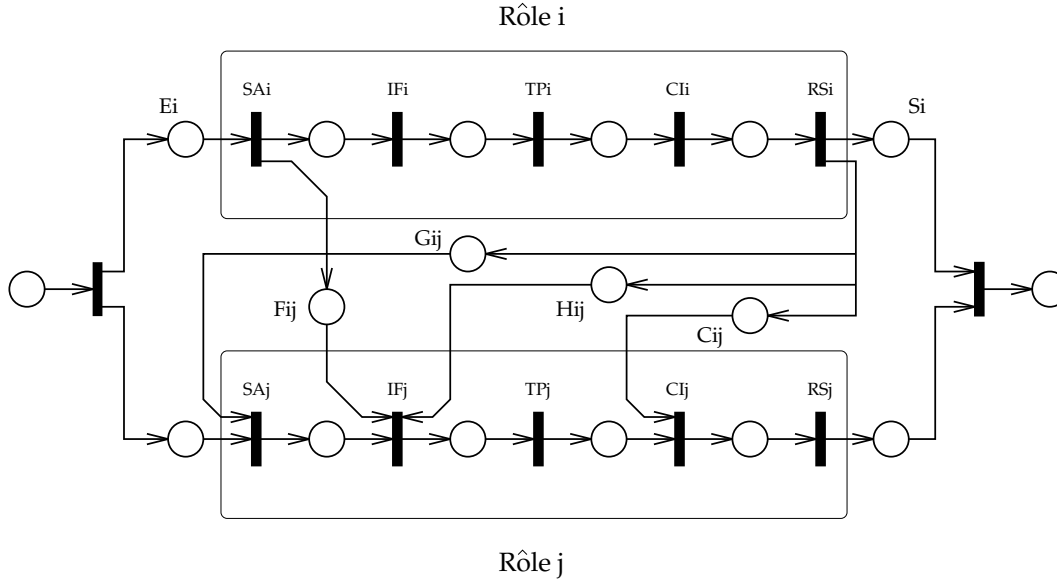


FIG. 2.4 - Interactions admissibles du rôle  $i$  vers le rôle  $j$

illustrées sur la figure 2.4. Pour ne pas surcharger cette figure, seules les interactions du rôle  $i$  vers le rôle  $j$  sont indiquées.

Nous désignons par *place d'interaction* les *places* suivantes :

- $E_i$  : le rôle  $i$  reçoit des informations des *senseurs*;
- $F_{ij}$  : la situation évaluée par  $i$  sera partagée avec  $j$ ;
- $G_{ij}$  : il y a connexion en serie de  $i$  et  $j$ ;
- $H_{ij}$  : il y a partage des résultats de  $i$  à  $j$ ;
- $C_{ij}$  :  $i$  est hiérarchiquement supérieur à  $j$ ;
- $S_i$  : si la réponse de  $i$  est directement utilisable sur l'environnement.

L'ensemble des places d'interaction forme le *système de commande, contrôle et communication*<sup>3</sup>.

Nous convenons d'associer à chacune des places d'interaction  $P_{ij}$  une variable booléenne  $\mathcal{P}_{ij}$ . Si celle-ci est vraie, la place est présente, sinon elle est absente du RdP.

Il est intéressant de savoir si l'on va utiliser une place  $F_{ij}$  au lieu d'une place  $G_{ij}$  ou  $H_{ij}$ . S'il est possible de le faire, il est préférable d'exporter une décision qu'une évaluation de situation car la seconde information est plus volumineuse que la première : il faut préférer l'emploi d'une place  $G_{ij}$  ou  $H_{ij}$  à une place  $F_{ij}$ .

3. C<sup>3</sup> - Command, Control & Communication - Commande, contrôle & communication

Pour une structure comportant  $n$  rôles, les interactions peuvent être représentées par un ensemble de six matrices booléennes :

$$\Sigma = \{\mathcal{E}, \mathcal{F}, \mathcal{G}, \mathcal{H}, \mathcal{C}, \mathcal{S}\},$$

où  $\mathcal{E}$  et  $\mathcal{S}$  sont de dimension  $n \times 1$ , et les autres matrices de dimension  $n \times n$  (avec des éléments diagonaux nuls). Le nombre total d'architectures que l'on peut générer est  $2^q$  où :

$$q = 2n + (4n^2 - 4n) = 4n^2 - 2n. \quad (2.5)$$

Toutes ces architectures ne sont pas nécessairement admissibles. Les organisations doivent respecter des *contraintes structurelles* [Levis 93] :

1. Les RdP correspondants doivent être connexes. On doit pouvoir trouver un chemin de la place source vers chaque rôle ainsi que de chaque rôle vers la place puits finale.
2. Il ne saurait y avoir de boucles<sup>4</sup>. Les RdP doivent être acycliques pour la circulation des données, ce qui interdit les blocages<sup>5</sup>.
3. Par définition, la fusion d'informations ne peut se faire qu'aux transitions IF et CI. La transition SA ne peut recevoir qu'au plus une information en provenance d'un autre rôle ou d'un senseur :

$$\mathcal{E}_j + \mathcal{G}_{ij} \leq 1. \quad (2.6)$$

4. La précédente inégalité implique l'utilisation de  $H_{ij}$  à la place de  $G_{ij}$  si le rôle  $j$  reçoit déjà des informations de senseurs, *i.e.*,

$$\mathcal{G}_{ij} + \mathcal{H}_{ij} \leq 1. \quad (2.7)$$

5. La contrainte

$$\mathcal{F}_{ij} + \mathcal{G}_{ij} \leq 1 \quad (2.8)$$

sert à éviter un trafic d'informations redondantes.

6. Alors que deux rôles peuvent s'échanger des situations évaluées (présence simultanée des places  $F_{ij}$  et  $F_{ji}$ ), si un rôle  $i$  reçoit des commandes d'un rôle  $j$ , le second est supérieur hiérarchique du premier et ne peut recevoir d'ordres de celui-ci :

$$\mathcal{C}_{ij} + \mathcal{C}_{ji} \leq 1. \quad (2.9)$$

Lors de la conception d'architectures D.M.O., il peut être séduisant de créer beaucoup de transferts d'informations entre les rôles. Toutefois, cela peut engendrer des déplacements de grandes quantités de données causant une forte dégradation des performances en augmentant la charge de travail des nœuds. Nous allons introduire dans le chapitre suivant des outils nous permettant de quantifier les charges des rôles et de vérifier que l'on ne sature pas un acteur d'une organisation.

---

4. Nous introduirons par la suite des boucles de limitation de capacité des ressources. Elles ne seront pas concernées par cette contrainte structurelle.

5. Sous réserve d'un marquage initial de la boucle de limitation de capacité non nul.



## Exemple

Reprenons l'exemple de la gestion d'un aéroport **factif**. Considérons un ensemble de trois techniciens :

- le premier est chargé de l'affectation des pistes aux avions (rôle 1 - *cf* p.11),
- le second est chargé de la sécurité (rôle 2),
- le dernier est le supérieur hiérarchique des deux autres (rôle 3).

Les techniciens sont les nœuds de cette architecture. Chacun d'entre eux associé à son travail respectif forme un rôle. La figure 2.5 représente l'organisation retenue pour la gestion de cet aéroport.

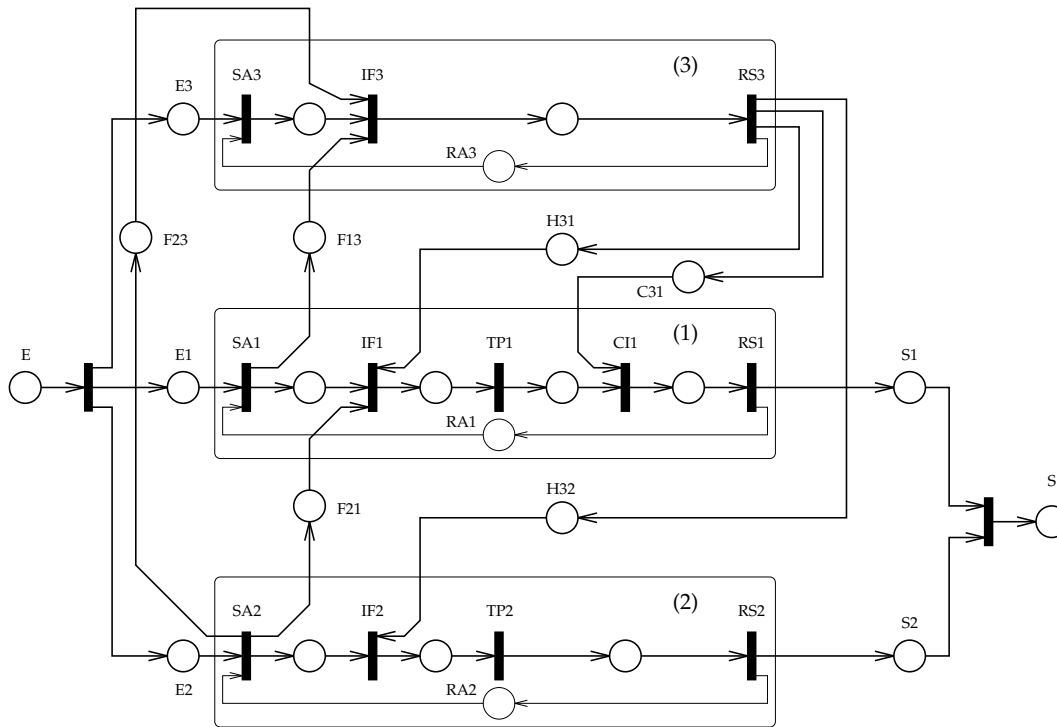


FIG. 2.5 - Exemple de gestion d'un aéroport

Rappelons brièvement les fonctions de chaque étape au sein d'un rôle :

**SA** - évaluation personnelle de la situation;

**IF** - confrontation de cette évaluation avec celles d'autres rôles conduisant à une modification de sa propre évaluation;

**TP** - choix de la stratégie à adopter;

**CI** – confrontation avec les stratégies des autres membres et intégration des ordres hiérarchiques;

**RS** – calcul des réponses.

Les informations en provenance de l’environnement et du contexte sont disponibles à tout instant dans la place *E*. Les techniciens 1 et 2 n’ont pas accès de la même façon à ces informations. Le premier regarde un écran radar sur lequel est portée diverses informations concernant les avions (position, vitesse, altitude, type d’appareil). Le second est à l’écoute des conversations échangées entre les pilotes et la tour de contrôle. Enfin, le supérieur a accès à toutes les informations qu’il désire.

Voici une proposition de répartition des fonctions à chacune des étapes des rôles :

**Rôle 1 :**

**SA1** – lecture sur le radar des informations;

**IF1** – intégration des évaluations des autres rôles et génération d’une situation éventuellement révisée par la hiérarchie;

**TP1** – choix du type d’algorithme à utiliser pour calculer l’affectation;

**CI1** – intégration des consignes hiérarchiques (si un avion doit être dérouté, il faut qu’il soit de telle compagnie plutôt que telle autre – le prochain appareil à atterrir doit être celui-ci) et possibilité de suivre l’algorithme imposé par la hiérarchie;

**RS1** – calcul des affectations des pistes aux avions suivant la procédure finalement retenue et en respectant les consignes commerciales imposées.

**Rôle 2 :**

**SA2** – écoute des conversations radios et recherche des cas d’urgence;

**IF2** – intégration de la situation révisée par la hiérarchie;

**TP2** – choix de la procédure de sécurité à suivre;

**RS2** – application de la procédure conduisant à délivrer des ordres à l’environnement (équipes médicales, pompiers, ...).

**Rôle 3 :**

**SA3** – évaluation personnelle de la situation;

**IF3** – intégration des évaluations des subordonnés conduisant à la détection des conflits et des incohérences;

**RS3** – algorithme de résolution des conflits (ici, en privilégiant par exemple la sécurité) générant de nouvelles évaluations révisées par la hiérarchie ainsi que des consignes commerciales et éventuellement l’algorithme d’ordonnancement à utiliser;

Les places d'interactions ont les fonctions suivantes :

**Rôle 1 :**

**F13** – exportation de la situation vue par 1 vers la hiérarchie.

**Rôle 2 :**

**F21** – si 2 apprend qu'un avion est en détresse, il en avertit 1,

**F23** – ainsi que la hiérarchie.

**Rôle 3 :**

**H31** – le chef a résolu les éventuels conflits et incohérences sur les évaluation de situation et impose dans ce cas sa vision de la situation à 1,

**H32** – ainsi qu'à 2;

**C31** – il délivre aussi des informations concernant tant le choix de l'algorithme que 1 devra utiliser que des consignes d'ordre commerciales (*cf* CI1).

Les commandes générés par les rôles 1 et 2 sont recueillies dans les places S1 et S2 puis fusionnées en S avant d'être délivrées à l'environnement.

Il existe une dernière catégorie de place. Il s'agit des places de limitation de capacité des ressources, dites de *disponibilité de ressource*<sup>6</sup>. Pour chaque rôle, le nombre total de jeton présent dans sa place R.A. additionné au nombre des jetons présents dans toutes les places entre ses différentes étapes SA-IF-TP-CI-RS détermine le nombre de traitements simultanés qu'il peut accomplir.

On peut enfin remarquer que certains rôles ne contiennent pas d'étapes TP ou d'étape CI. C'est conforme à la présentation du modèle utilisé : on ne représente pas des étapes sans utilité (CI2 ne sert pas car il n'y a pas ordre hiérarchique à intégrer; TP3 est absent car le supérieur utilise toujours la même procédure pour arbitrer les conflits).

---

6. R.A. – Ressource Availability – Disponibilité de ressource

## Chapitre 3

# La théorie de l'information

À LA FIN de la seconde guerre mondiale, Claude E. SHANNON élabore sa *théorie de la communication* [Shannon 49]. Il y démontre que tout message peut être ramené à une combinaison de signaux binaires et que les combinaisons successives des deux éléments du répertoire (0 ou 1) sont relativement imprévisibles. La *théorie de l'information*, directement issue de la théorie de la communication, nous permet de quantifier la charge de traitement d'information que l'on inflige à un système ou un rôle.

### 3.1 L'entropie

Soit  $x$  une variable aléatoire pouvant prendre un nombre fini de valeurs  $x_i$ , l'entropie associée à  $x$  est définie par :

$$H(x) = - \sum_i \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i)} \cdot \ln(\mathcal{P}_{(x=x_i)}) \right] . \quad (3.1)$$

Il existe aussi la notion de *taux d'entropie* exprimée par :

$$\overline{H}(x) = \lim_{m \rightarrow +\infty} \frac{1}{m} \left[ H(x_{(t)}) + H(x_{(t+1)}) + \dots + H(x_{(t+m-1)}) \right] . \quad (3.2)$$

Si la base du logarithme est 2, toutes ces quantités seront exprimées en *bits par symboles – bit/sym*.

L'entropie permet de mesurer la quantité d'*information* produite par un processus et le taux d'entropie mesure le débit de cette production. Le terme d'information doit être pris au sens de liberté de choix (nous nous intéressons plus à ce que l'on pourrait dire qu'à ce que l'on dit) dans la sélection d'un *symbole* mais n'est pas relié au sens d'un message (celui-ci est la *signification*). L'unité d'information élémentaire est le *bit*<sup>1</sup>, correspondant à la quantité d'information apportée par un choix binaire.

Pour donner une image du sens de ces termes, considérons une source informatique délivrant dans un cas l'intégralité du texte *ascii* correspondant à la pièce de

---

1. Pour *binary digit*.

théâtre *King Lear* et dans l'autre cas le mot *bonzaï*. Les symboles transmis ont des tailles très différentes.

Alors même que l'information véhiculée par ces symboles est égale à un unique bit (simple choix entre deux symboles différents), l'entropie associée à cette source dépendra de la probabilité de sélectionner un message plutôt qu'un autre et variera continuellement :

- de 1 dans le cas équiprobable,
- à 0 dans le cas où l'on choisit toujours le même symbole (il n'y a plus d'entropie car il n'y a plus de choix).

La signification de ces symboles est encore plus difficile à évaluer, et en tout cas est très dépendante du receptrer de ces symboles.

### Exemple

Soit  $x$  une variable aléatoire astreinte à prendre en différents instants les valeurs suivantes pour  $k = 0, 1, 2, \dots$  :

$t = 3k$		$t = 3k + 1$		$t = 3k + 2$	
$x_i$	$\mathcal{P}(x=x_i)$	$x_i$	$\mathcal{P}(x=x_i)$	$x_i$	$\mathcal{P}(x=x_i)$
2	0,25	0	0,10	1	0,50
3	0,25	1	0,20	4	0,40
5	0,40	7	0,50	5	0,05
6	0,10	8	0,20	6	0,05

Nous obtenons les entropies associées :

$$\left\{ \begin{array}{l} H(x_{(t=3k)}) = -0,25 \times \log_2(0,25) - 0,25 \times \log_2(0,25) \\ \quad \quad \quad -0,40 \times \log_2(0,40) - 0,10 \times \log_2(0,10) \\ H(x_{(t=3k+1)}) = \dots \\ H(x_{(t=3k+2)}) = \dots \end{array} \right. = \begin{array}{l} 1,86 \text{ bit/sym} \\ 1,76 \text{ bit/sym} \\ 1,46 \text{ bit/sym} \end{array}$$

et un taux d'entropie

$$\overline{H}(x) = \frac{1}{3} \times [1,86 + 1,76 + 1,46] = 1,69 \text{ bit/sym}.$$

Cette valeur de taux d'entropie est la quantité moyenne d'information générée par cette source (alors que le message transporté peut être bien plus volumineux).

## 3.2 La transmission

La *transmission*, ou *information mutuelle*, est définie pour deux variables aléatoires  $x$  et  $y$  par :

$$T(x : y) = H(x) - H_y(x), \quad (3.3)$$

où

$$H_y(x) = - \sum_j \left[ \mathcal{P}_{(y=y_j)} \times \sum_i \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i|y=y_j)} \cdot \ln(\mathcal{P}_{(x=x_i|y=y_j)}) \right] \right] \quad (3.4)$$

est l'*entropie conditionnelle* sur la variable  $x$ .

Il est simple de montrer que  $T(x : y)$  varie de façon continue de 0 à  $H(x)$  suivant la valeur de  $H_y(x)$ . Une transmission nulle correspond à des variables  $x$  et  $y$  découplées (*i.e.* l'information véhiculée par l'une est indépendante de l'autre). A l'opposé, une transmission égale à l'entropie  $H(x)$  correspond au cas où les deux variables véhiculent la même information (éventuellement sous une forme différente).

La transmission est donc la quantité d'information apportée par  $y$  au sujet de  $x$  [Jumarie 84].

Par définition, il y a équivalence entre les trois écritures suivantes :

$$\begin{aligned} T(x : y) &= H(x) - H_y(x) \\ &= H(y) - H_x(y) \\ &= H(x) + H(y) - H(x, y) \end{aligned} \quad (3.5)$$

avec

$$H(x, y) = \sum_{i,j} \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i \text{ et } y=y_j)} \cdot \ln(\mathcal{P}_{(x=x_i \text{ et } y=y_j)}) \right] . \quad (3.6)$$

Nous définissons aussi :

$$\begin{aligned} T(x : y, z) &= H(y, z) - H_x(y, z) \\ &= H(x) + H(y, z) - H(x, y, z) . \end{aligned} \quad (3.7)$$

[McGill 54] a généralisé la notion de transmission au cas  $N$ -dimensionnel :

$$T(x_1 : x_2 : \dots : x_N) = \sum_{i=1}^N H(x_i) - H(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.8)$$

et introduit la *transmission conditionnelle* définie par :

$$T_y(x_1 : x_2 : \dots : x_N) = \sum_{i=1}^N H_y(x_i) - H_y(x_1, x_2, \dots, x_N) . \quad (3.9)$$

Il existe aussi une notion de *taux de transmission* définie en remplaçant dans les équations précédentes les entropies par des taux d'entropie.

### Exemple

Soit  $x$  et  $y$  des variables aléatoires telles que :

$y_i$	$\mathcal{P}_{(y=y_i)}$	$x_i$	$\mathcal{P}_{(x=x_i y=y_i)}$
4	0,25	5	0,6
		8	0,4
7	0,50	1	0,3
		2	0,7
8	0,25	4	0,9
		5	0,1

Il vient,

$$\begin{aligned}
 H_y(x) &= -0,25 \times [0,6 \times \log_2(0,6) + 0,4 \times \log_2(0,4)] \\
 &\quad -0,50 \times [0,3 \times \log_2(0,3) + 0,7 \times \log_2(0,7)] \\
 &\quad -0,25 \times [0,9 \times \log_2(0,9) + 0,1 \times \log_2(0,1)] \\
 &= 0,80 \text{ bit/sym.}
 \end{aligned}$$

Pour exprimer  $H(x)$ , nous calculons les  $\mathcal{P}_{(x=x_i|y)}$  qui valent :

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 \mathcal{P}_{(x=1|y)} &= 0,50 \times 0,3 &= 0,150, \\
 \mathcal{P}_{(x=2|y)} &= 0,50 \times 0,7 &= 0,350, \\
 \mathcal{P}_{(x=4|y)} &= 0,25 \times 0,9 &= 0,225, \\
 \mathcal{P}_{(x=5|y)} &= 0,25 \times 0,6 + 0,25 \times 0,1 &= 0,175, \\
 \mathcal{P}_{(x=8|y)} &= 0,25 \times 0,4 &= 0,100.
 \end{array} \right.$$

D'où

$$H(x) = 2,20 \text{ bit/sym.}$$

La transmission a pour valeur :

$$\begin{aligned}
 T(x : y) &= H(x) - H_y(x) \\
 &= 1,40 \text{ bit/sym.}
 \end{aligned}$$

### 3.3 La loi partielle de l'information

La *loi partielle de l'information* a été introduite par [Conant 76]. Elle définit  $G$ , *activité totale* d'un système traitant l'information  $x$ , comme :

$$\begin{aligned}
 G = \sum_{i=1}^N H(w_i) &= T(x : y) \\
 &\quad + T_y(x : w_1, w_2, \dots, w_{N-1}) \\
 &\quad + T(w_1 : w_2 : \dots : w_{N-1} : y) \\
 &\quad + H_x(w_1, w_2, \dots, w_{N-1}, y),
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

où le système peut être décrit par  $N$  variables  $\{w_1, \dots, w_N\}$  telles que les  $N - 1$  premières variables sont l'ensemble des variables internes, et où  $w_N$  est  $y$ , la variable de sortie du système.

Chacune des transmissions de l'équation 3.10 a une signification précise :

- $G_t = T(x : y)$  est appelée l'*entropie de sortie (throughput)* du système. Elle mesure la quantité d'information en sortie dépendant directement de l'entrée  $x$ ;
- $G_b = T_y(x : w_1, w_2, \dots, w_{N-1})$  est l'*entropie de blocage*. C'est la part d'information entrée qui reste dans le système;
- $G_c = T(w_1 : w_2 : \dots : w_{N-1} : y)$  est appelée l'*entropie de coordination* et représente la part de couplage entre toutes les variables;
- $G_n = H_x(w_1, w_2, \dots, w_{N-1}, y)$  représente l'*entropie de bruit*<sup>2</sup>.

La loi partielle de l'information peut s'exprimer sous la forme abrégée suivante :

$$G = G_t + G_b + G_c + G_n . \quad (3.11)$$

### 3.4 Modélisation des signaux en entrée

Du point de vue de la théorie de l'information, on peut considérer qu'une D.M.O. est un système qui répond à un flux de symboles par un flux de symboles. Il reçoit des messages et des signaux de diverses formes qui sont identifiés, analysés et transmis à leurs destinataires.

Chaque  $\tau_n$  unité de temps, la source  $n$  génère des informations  $x_{ni}$  (signaux, messages ou symboles) appartenant à son alphabet associé  $X_n$  avec une probabilité  $p_{ni}$  telle que :

$$p_{ni} = \mathcal{P}_{(x_n=x_{ni})} \text{ avec } x_{ni} \in X_n \text{ et } i \in \{1, 2, \dots, \gamma_n\} , \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^{\gamma_n} p_{ni} = 1 \text{ pour } n \in \{1, 2, \dots, N\} , \quad (3.13)$$

où  $N$  est le nombre de sources et  $\gamma_n$  le nombre de symboles différents que la source  $n$  peut générer. La tâche de l'organisation est de répondre à ce flux de symboles de fréquence moyenne  $\tau_n^{-1}$  provenant de la source  $n$ .

On suppose que toute tâche complexe devant être réalisée peut être modélisée par une *super-source* composée des  $N$  sources. Posons  $x$ , vecteur  $N$ -dimensionnel, où chaque composante est l'information générée par chacune des sources :

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N) . \quad (3.14)$$

Si toutes les sources sont mutuellement indépendantes, il vient :

---

2. Ce bruit ne doit pas être compris comme une entropie non-déterministe parasite. Il interprète la quantité d'information générée au sein du système non comptabilisée dans les autres entropies.



$$p_i = \mathcal{P}_{(x=x_i)} = \prod_{n=1}^N p_{ni} \quad \text{où } x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) . \quad (3.15)$$

S'il y a couplage entre les sources, alors il faut traiter l'ensemble des sources couplées comme un sous-groupe indépendant assimilable à une source unique nantie d'un nouvel alphabet exprimant toutes les combinaisons admissibles au sein de ce sous-groupe.

Cette modélisation des signaux d'entrée suppose la synchronisation des différentes sources afin de pouvoir les regrouper en une unique super-source et traiter l'entrée multi-dimensionnelle comme un symbole unique.

De plus, il est couramment admis dans la littérature que  $x$  est indépendant des symboles qui ont été, ou qui seront, produits. Dans la pratique, on considèrera des sources ergodiques stationnaires au premier ordre comme équivalentes à des sources de Markov.

### 3.5 Application au modèle à cinq transitions

Nous décrivons dans cette section le fonctionnement d'un rôle  $r$  du point de vue de la théorie de l'information. En reprenant les notations de la figure 2.1 (page 10), on obtient l'expression des entropies de la loi partielle de l'information [Bøttcher 83], [Levis 83]:

– Entropie de sortie :

$$G_t^r = T(x, z', v' : y, z) , \quad (3.16)$$

– Entropie de blocage :

$$G_b^r = H(x, z', v') - G_t^r , \quad (3.17)$$

– Entropie de coordination :

$$\begin{aligned} G_c^r = & \sum_{i=1}^U \left[ \mathcal{P}_{(u=i | C)}^{SA} \cdot g_c^i(p(x)) + \alpha_i H^*(\mathcal{P}_{(u=i | C)}^{SA}) \right] \\ & + g_c^{IF}(p(z, z')) \\ & + \sum_{j=1}^V \left[ \mathcal{P}_{(v=j | C)}^{TP} \cdot g_c^j(p(v)) + \alpha_j H^*(\mathcal{P}_{(v=j | C)}^{TP}) \right] \\ & + g_c^{CI}(p(v, v')) \\ & + \sum_{k=1}^W \left[ \mathcal{P}_{(w=k | C)}^{RS} \cdot g_c^k(p(w)) + \alpha_k H^*(\mathcal{P}_{(w=k | C)}^{RS}) \right] \\ & + H(z) + H(v) + H(y) \\ & + T_z(x : z') + H(z'') + T_v(x, z' : v') + H(w) , \end{aligned} \quad (3.18)$$

– Entropie générée au sein du rôle :

$$G_n^r = H(u) - H_u(v) - H_{u,v}(w) . \quad (3.19)$$

$\mathcal{P}_{(u=i | C)}^{SA}$ ,  $\mathcal{P}_{(v=j | C)}^{TP}$  et  $\mathcal{P}_{(w=k | C)}^{RS}$  sont définies par les équations 2.2 à 2.4 (cf. page 12). Les quantités  $g_c^a$  représentent les entropies partielles de coordination des algorithmes  $a$  correspondants; les quantités  $\alpha_i$ ,  $\alpha_j$  et  $\alpha_k$  sont le nombre de variables internes utilisées respectivement par les algorithmes  $i$ ,  $j$  et  $k$  effectivement utilisés.

La quantité  $H^*$  est définie comme l'entropie associée à une variable binaire de probabilité  $p$  :

$$H^*(p) = -p \cdot \log_2 p - (1 - p) \cdot \log_2 (1 - p) . \quad (3.20)$$

Les équations 3.16 à 3.19 déterminent l'activité totale d'un rôle  $r$  (cf. 3.11) :

$$G^r = G_i^r + G_b^r + G_c^r + G_n^r . \quad (3.21)$$

L'équation 3.21 définit la *charge de travail*, i.e. l'activité totale de traitement de l'information effectuée par le rôle. [Levis 84] détermine le *critère de charge* d'un rôle  $r$  traitant des symboles arrivant à la cadence moyenne de  $\tau$  secondes comme :

$$G^r \leq F^r \times \tau , \quad (3.22)$$

où  $F$  est la cadence maximale de traitement des informations par  $r$ .

### 3.6 Influence d'une base de données sur le système

La présence d'une base de données utilisée par une transition intelligente munie de  $T$  algorithmes ne modifie pas l'expression de la loi 3.11 associée à ce rôle, mais il est plus aisé d'écrire cette loi sous la forme suivante [Levis 84] :

$$G^r = G_i^r + G_b^r + G_c^r + G_n^r + \Delta G_c^r ,$$

$$\text{avec } \Delta G_c^r = \sum_{t=1}^T \beta_t H^*(P_t^{SA, TP \text{ ou } RS}) \quad (3.23)$$

et où  $\beta_t$  est le nombre de données fournies par la base de connaissances au  $t^{\text{ième}}$  algorithme l'appelant.

L'introduction d'une base de données a les effets positifs suivants :

1. Réduction du nombre de données à mémoriser au sein des nœuds;
2. Partage des données au sein de la D.M.O.;
3. Augmentation de la flexibilité des algorithmes de prise de décision<sup>3</sup>.

Mais cela se paye par un coût de coordination  $\Delta G_c^r > 0$ . De plus, une aide à la décision mal conçue peut augmenter la charge de travail  $G^r$  du rôle l'utilisant.

---

3. On tend vers la séparation faite en *intelligence artificielle* entre les moteurs d'inférences et les bases de connaissances.

## Chapitre 4

# Mesure des performances

LES ORGANISATIONS DÉCISIONNELLES sont aussi caractérisables par un ensemble de mesures quantitatives et qualitatives. Nous les présentons successivement dans ce chapitre.

### 4.1 Les mesures quantitatives

#### 4.1.1 La précision

La *précision*  $J$  est une mesure associée à un coût d'erreur sur la réponse.

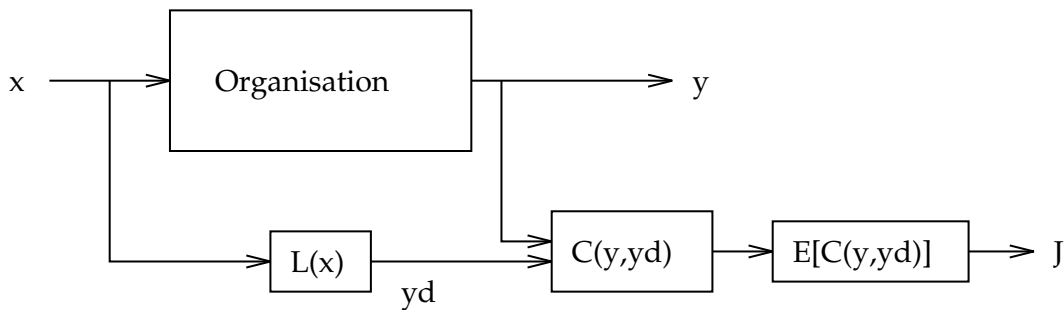


FIG. 4.1 - Diagramme de calcul de la précision  $J$

[Levis 84] pose que le concepteur d'une organisation connaît a priori l'ensemble  $Y$  des réponses désirées et dispose d'une fonction d'appariement  $L$  qui associe les réponses de  $Y$  aux entrées. Pour chaque entrée  $x$ , nous connaissons donc la réponse désirée  $y_d$  que le système devrait délivrer. Le système produit effectivement une réponse  $y$  et nous affectons un coût  $C(y, y_d)$  à l'écart entre les deux réponses.

L'espérance du coût est une évaluation de l'indice de précision  $J$ :

$$J = E[C(y, y_d)] . \quad (4.1)$$

Si l'on connaît *in extenso* l'ensemble des entrées  $x_i$ , la précision peut alors s'écrire :

$$J = \sum_i \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i)} \times \sum_j \left[ C(y, y_d) \mathcal{P}_{(y=y_j \mid x=x_i)} \right] \right] . \quad (4.2)$$

Si la fonction de coût prend pour valeur 0 si les réponses  $y$  et  $y_d$  sont égales et 1 sinon,  $J$  représente alors la probabilité qu'une D.M.O. prenne une mauvaise décision, soit :

$$J = \mathcal{P}_{(y \neq y_d)} . \quad (4.3)$$

### 4.1.2 La cadence

La *cadence*  $T$  traduit le délai moyen nécessaire à la production d'une réponse par une organisation. Il y a deux méthodes principales pour évaluer cet indice. Si l'on dispose pour l'intégralité des signaux  $x_i$  des temps élémentaires de réponse  $t(x_i)$ ,  $T$  se calcule par :

$$T = \sum_i \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i)} t(x_i) \right] . \quad (4.4)$$

Si la connaissance des temps élémentaires de réponse fait défaut, on procède par simulation. Le lecteur trouvera dans [Hillion 87] la description d'une méthode de calcul des temps de cycle basée sur la recherche de *chemins critiques* au sein de *graphes d'évènements*<sup>1</sup>. Cette méthode peut être employée pour des temps de transitions déterministes, stochastiques ou dépendant du nombre d'utilisation consécutives d'un même algorithme au sein d'une transition<sup>2</sup>.

### 4.1.3 La synchronisation

La *synchronisation*  $S$  mesure le temps perdu par les nœuds à attendre des informations d'autres nœuds. Une mesure quantitative couramment employée, notamment dans [Levis 89], pour définir la synchronisation d'une organisation de  $R$  rôles est :

$$S = \sum_i \left[ \mathcal{P}_{(x=x_i)} \times \max_{r=1, \dots, R} \Theta_i^r \right] , \quad (4.5)$$

où  $\Theta_i^r$  est défini comme le temps d'attente maximal d'une information par un des rôles  $r$  dans le cas où le système traite  $x_i$ .

Comme il est délicat d'accéder de façon analytique à  $S$ , son évaluation passe donc souvent par une simulation.

Une synchronisation parfaite, *i.e.*  $S \simeq 0$ , n'implique pas des temps de prise de décision d'une D.M.O. courts ni une bonne précision des réponses délivrées.

1. On appelle graphe d'évènements un RdP dans lequel chaque place dispose d'une unique transition d'entrée et d'une unique transition de sortie.

2. Cette hypothèse est techniquement très réaliste.

#### 4.1.4 La consistance mutuelle

La *consistance mutuelle*  $Q$  est une mesure fondamentale pour la validation d'une architecture. Pour la définir, il nous faut introduire différentes notions annexes.

##### La stratégie de décision d'un rôle

La précision et la charge totale de travail d'une organisation dépendent des stratégies internes de décision de chacun des rôles la composant (confère §2.3, page 12).

Considérons une organisation de  $R$  rôles. Chaque rôle  $r \in \{1, \dots, R\}$  peut sélectionner<sup>3</sup> un algorithme  $i_r$  au sein des  $u_r \in \{1, \dots, U_r\}$  algorithmes de l'étape  $SA_r$ , un algorithme  $j_r$  parmi les  $v_r \in \{1, \dots, V_r\}$  de l'étape  $TP_r$  et un algorithme  $k_r$  parmi les  $w_r \in \{1, \dots, W_r\}$  de l'étape  $RS_r$  pour traiter un jeton de couleur  $C$ . La stratégie interne du rôle  $r$  s'exprime par :

$$D_r = \{ \mathcal{P}_{(u_r=i_r | C)}^{SA_r}; \mathcal{P}_{(v_r=j_r | C)}^{TP_r}; \mathcal{P}_{(w_r=k_r | C)}^{RS_r} \}. \quad (4.6)$$

Pour chaque rôle  $r$ , nous pouvons définir  $n_r$  stratégies pures, où

$$n_r = U_r \times V_r \times W_r \times M \quad (4.7)$$

et où  $M$  est le nombre de couleurs. Elles s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1, \dots, n_r\}, \\ D_r^k = \{ \mathcal{P}_{(u_r=i_r | C)}^{SA_r} = 1; \mathcal{P}_{(v_r=j_r | C)}^{TP_r} = 1; \mathcal{P}_{(w_r=k_r | C)}^{RS_r} = 1 \}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Toutes les autres stratégies sont mixtes et s'écrivent comme une combinaison des stratégies pures :

$$D_r = \sum_{k=1}^{n_r} p_r^k D_r^k \quad (4.9)$$

avec

$$\forall k, p_r^k \geq 0, \sum_{k=1}^{n_r} p_r^k = 1. \quad (4.10)$$

Le point  $P_r$  de coordonnées  $p_r^k$  définit donc la stratégie de décision du rôle  $r$ . Il évolue dans l'espace de stratégie  $S_r$  de dimension  $n_r - 1$ <sup>4</sup> du rôle  $r$ . L'ensemble des stratégies possibles est le volume délimité par un polyèdre convexe fermé de même dimension et dont les sommets sont les vecteurs unitaires correspondants aux stratégies pures.

---

3. Comme nous le verrons dans l'exemple suivant, si une transition intelligente n'apparaît pas dans un rôle, il suffit de ne pas tenir compte des termes s'y rattachant.

4. car  $p_r^{n_r} = 1 - \sum_{k=1}^{n_r-1} p_r^k$ .

### La stratégie de décision d'une organisation

Une stratégie de décision d'une organisation est dite pure si elle s'écrit sous la forme d'un  $R$ -tuplet de stratégies de rôles pures :

$$\Delta_{k_1, \dots, k_R} = \{D_1^{k_1}, \dots, D_R^{k_R}\} . \quad (4.11)$$

Chaque rôle  $r$  choisissant sa stratégie indépendamment, il vient que l'espace de stratégie de l'organisation  $S$  est la somme directe des espaces individuels des rôles :

$$S = S_1 \oplus S_2 \oplus \dots \oplus S_R \quad (4.12)$$

avec

$$\dim S = (n_1 - 1) + \dots + (n_R - 1) . \quad (4.13)$$

La stratégie d'une organisation est dite mixte si elle n'est pas pure. On peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\Delta = \sum_{r=1}^R \sum_{k_r=1}^{n_r} \left[ p_r^{k_r} \Delta_{k_1, \dots, k_R} \right] , \quad (4.14)$$

où  $p_r^{k_r}$  est la probabilité d'utiliser la stratégie pure  $k_r$  pour le rôle  $r$ .

La stratégie de décision d'une organisation est aussi appelée *stratégie de comportement*.

### Le volume de satisfaction

Notre organisation doit pouvoir traiter des données à la cadence  $\tau$  en respectant une précision minimale  $\bar{J}$  et pour chacun des rôles<sup>5</sup> une charge maximale de travail  $G^r$ .

En balayant<sup>6</sup> les stratégies de comportement  $\Delta$ , on calcule pour l'ensemble des valeurs de  $\tau$  et  $\bar{J}$  les domaines de  $S$  :

– vérifiant le critère de charge pour chaque rôle

$$\forall r, T^r = \{ \Delta \mid G^r(\Delta) \leq F^r \tau \} ; \quad (4.15)$$

– et vérifiant le critère de précision

$$T^J = \{ \Delta \mid J(\Delta) \leq \bar{J} \} . \quad (4.16)$$

Le *volume de satisfaction*  $V(T)$  est défini comme le volume du sous-espace de stratégie  $T$  vérifiant les critères de cadence et de précision :

$$T = T^1 \cap T^2 \cap \dots \cap T^R \cap T^J . \quad (4.17)$$

---

5. On ne s'intéresse pas au respect des charges de travail des bases de données ou du système  $C^3$ .

6. L'obtention de la consistance mutuelle est une opération de longue haleine . . .

## La consistance mutuelle

La consistance mutuelle est définie par [Bœttcher 83] comme le ratio du volume de satisfaction sur le volume de l'espace de stratégie :

$$Q = \frac{V(T)}{V(S)}. \quad (4.18)$$

Cette valeur est une fonction monotone de  $\tau$  et de  $\bar{J}$ , de minimum nul et de maximum l'unité. Une valeur nulle signifie qu'aucune des stratégies de décision de l'organisation ne peut satisfaire aux contraintes. A l'inverse, une valeur de 1 prouve que n'importe quelle stratégie est acceptable.

## Exemple

Considérons une organisation, représentée sur la figure 4.2, formée de deux rôles et traitant des jetons d'une unique couleur<sup>7</sup>.

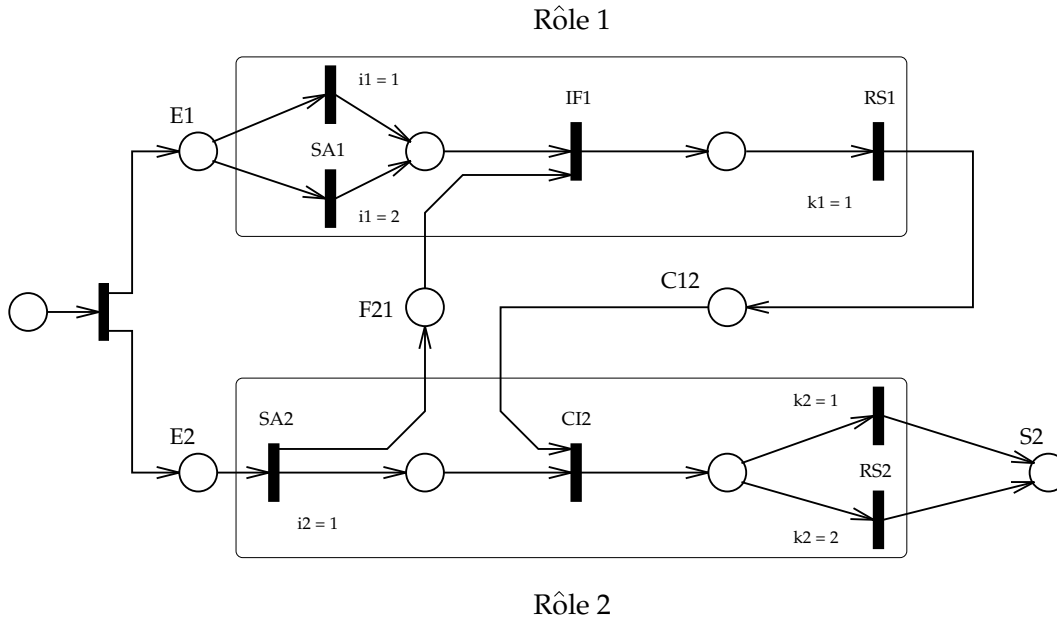


FIG. 4.2 - Un exemple d'organisation hiérarchique

Ici, il est simple d'écrire exhaustivement toutes les stratégies pures des deux rôles. Nous avons tout d'abord :

$$M = 1, \left\{ \begin{array}{l} U_1 = 2, \\ U_2 = 1, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} W_1 = 1 \\ W_2 = 2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n_1 = 2 \\ n_2 = 2 \end{array} \right. . \quad (4.19)$$

<sup>7</sup>. Cet exemple est directement issu de [Bœttcher 83].

Les stratégies pures des rôles sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1^1 = \{ \mathcal{P}_{(u_1=1)}^{SA_1} = 1; \mathcal{P}_{(w_1=1)}^{RS_1} = 1 \} ; \\ D_1^2 = \{ \mathcal{P}_{(u_1=2)}^{SA_1} = 1; \mathcal{P}_{(w_1=1)}^{RS_1} = 1 \} ; \\ D_2^1 = \{ \mathcal{P}_{(u_2=1)}^{SA_2} = 1; \mathcal{P}_{(w_2=1)}^{RS_2} = 1 \} ; \\ D_2^2 = \{ \mathcal{P}_{(u_2=1)}^{SA_2} = 1; \mathcal{P}_{(w_2=2)}^{RS_2} = 1 \} . \end{array} \right. \quad (4.20)$$

Les espaces de stratégies des deux rôles sont respectivement unidimensionnels. Les stratégies des rôles s'expriment toutes par :

$$\forall r \in \{1, 2\}, \forall p_r \in [0, 1], D_r = p_r D_r^1 + (1-p_r) D_r^2 . \quad (4.21)$$

Il vient que l'espace de stratégie de l'organisation a 2 dimensions : c'est le carré unitaire. Aux sommets de l'espace de stratégie de l'organisation correspondent les stratégies pures :

$$\Delta_{(k_1, k_2)} = \{ D_1^{k_1}, D_2^{k_2} \} . \quad (4.22)$$

Les stratégies mixtes de l'organisations s'obtiennent par :

$$\begin{aligned} \Delta = & \quad p_1 p_2 \Delta_{11} \quad + \quad (1-p_1) p_2 \Delta_{21} \\ & + \quad p_1 (1-p_2) \Delta_{12} \quad + \quad (1-p_1) (1-p_2) \Delta_{22} \end{aligned} \quad (4.23)$$

qui s'écrit sous forme matricielle comme :

$$\Delta = \begin{pmatrix} p_1 & 1-p_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ 1-p_2 \end{pmatrix} . \quad (4.24)$$

Pour le flot de données à traiter, on peut calculer les charges de travail  $G_{k_r}^r$  associées aux stratégies pures. Les charges de travail de chaque rôle face à une stratégie mixte sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} G^1 = p_1 G_1^1 + (1-p_1) G_2^1 , \\ G^2 = p_2 G_1^2 + (1-p_2) G_2^2 . \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Si l'on connaît les espérances  $J_{(k_1, k_2)}$  correspondant aux stratégies pures, la précision associée à une stratégie mixte est :

$$J = \begin{pmatrix} p_1 & 1-p_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ 1-p_2 \end{pmatrix} . \quad (4.26)$$

La figure 4.3 représente l'ensemble des valeurs obtenues pour les charges de travail et la précision pour les différentes stratégies d'organisation avec une cadence  $\tau$  d'information. Le plan normal à l'axe  $J$  et coupant celui-ci à une ordonnée de 0.32 sépare la surface en deux zones correspondant au respect (respectivement au non-respect) de la précision.



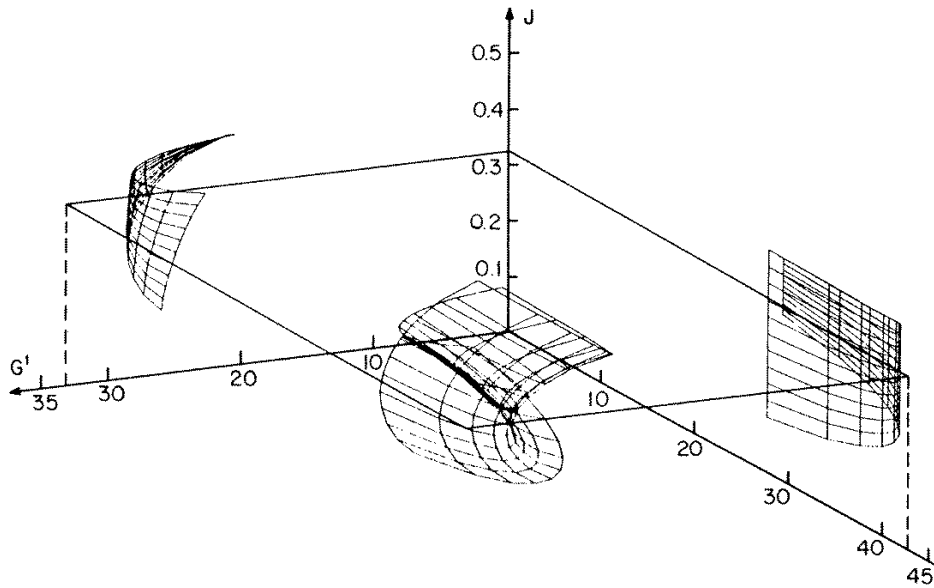


FIG. 4.3 - *Précision et charge de travail pour un tempo imposé*

Si le tempo n'est pas précisément connu, ou bien susceptible de varier entre des valeurs limites, la consistance mutuelle est une mesure plus intéressante du point de vue de la *certification*. La figure 4.4 est une représentation typique de la consistance mutuelle.

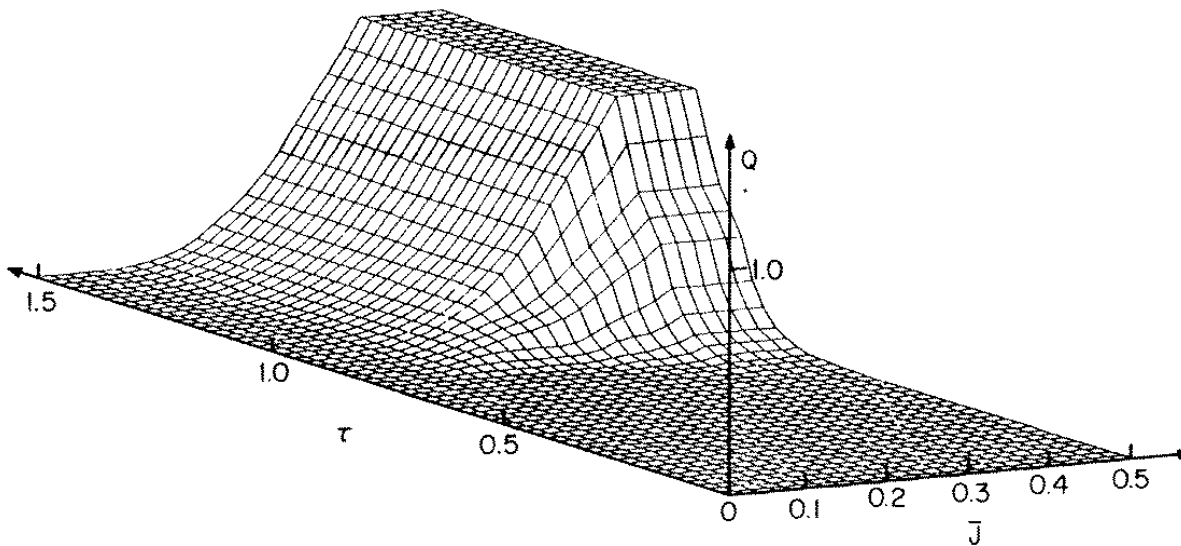


FIG. 4.4 - *Consistance mutuelle fonction de la précision et du tempo*

## 4.2 Les mesures qualitatives

### 4.2.1 La consistance

La *consistance* est la mesure selon laquelle les différents jetons traités par un rôle concernent effectivement la même tâche et peuvent être traités sans générer de contradictions. Cette mesure dépend étroitement de la tâche traitée (*task dependent*).

La non consistance se rencontre aussi dans le cas où un système acquiert la même information d'au moins deux façons ou si deux rôles arrivent à des évaluations de situations différentes.

Si l'on simule le fonctionnement d'une D.M.O. en utilisant des RdP colorés, une mesure  $Z$  de la consistance est l'espérance du ratio défini à chaque instant par le nombre de jetons de la couleur idoine traités par un rôle sur le nombre total de jetons traités par ce rôle [Levis 89].

### 4.2.2 La coordination

La *coordination*  $C$  se réfère à plusieurs mesures :

- un rôle est coordonné s'il est synchronisé et consistant;
- une tâche est coordonnée si tous les rôles participant à son traitement le sont;
- une organisation est coordonnée si toutes les tâches qu'elle traite le sont.

## Chapitre 5

# Synthèse d'architectures

Nous avons successivement présenté la structure élémentaire d'une organisation appelée nœud puis une introduction à la théorie de l'information permettant de quantifier les charges de travail des acteurs de cette organisation et enfin un ensemble de mesures la caractérisant. Ici, notre propos est la génération d'architectures satisfaisant à un cahier des charges portant tant sur le nombre des ressources utilisables et leur type que sur les critères de performance à atteindre.

L'*algorithme exhaustif* proposé par [Andreadakis 87] génère par énumération toutes les architectures possibles avec les ressources dont nous disposons et ne retient que celles qui satisfont aux contraintes.

### 5.1 Les structures de flux d'informations

Le lecteur ne doit pas s'étonner de voir apparaître l'utilisation des structures de flux d'informations (D.F.S. - Data Flow Structure) au lieu du modèle à étapes. Comme nous l'avons déjà signalé (§2.1, page 10), l'intérêt d'une représentation réside plus dans sa capacité à proposer une description viable des mécanismes de prise de décision et des interconnexions entre les différents acteurs d'une organisation que dans sa prétention à décrire pertinemment le fonctionnement interne d'un décideur.

De plus, bien que l'algorithme soit conçu pour la synthèse d'organisations composées de D.F.S., il est très facilement adaptable à celles représentées par des modèles à étapes.

Pour les raisons déjà évoquées (§2.2, page 11), les D.F.S. sont modélisés à l'aide des réseaux de Petri. La structure retenue possède elle aussi cinq étapes, mais les fonctions associées y sont différentes.

Les étapes modélisent des traitements et les données sont représentées par des jetons. Un jeton présent dans une place en amont (respectivement en aval) d'une transition est un jeton en attente d'un traitement (respectivement traité).

Les différentes étapes modélisent les fonctions suivantes :

**IP** – cette étape de *traitement initial* (*Initial Processing*) traite les informations en provenance des senseurs et développe des hypothèses sur l'environnement et le contexte;

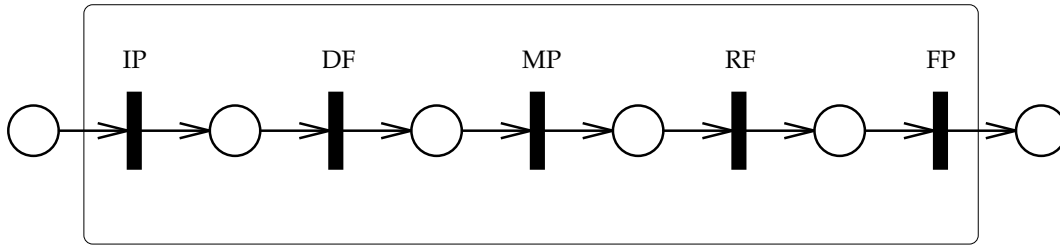


FIG. 5.1 - Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 1

**DF** – les évaluations d'autres rôles sont combinées par *fusion des données (Data Fusion)*;

**MP** – le *traitement intermédiaire (Middle Processing)* permet de générer une situation évaluée secondaire qui est la plus probable des hypothèses;

**RF** – l'étape de *fusion des résultats (Results Fusion)* combine différentes situations évaluées en provenance d'autres rôles;

**FP** – le *traitement final (Final Processing)* génère la réponse du rôle.

## 5.2 Interactions possibles entre les D.F.S.

Les interactions possibles entre les différents rôles sont limitées par la définition des fonctions associées aux étapes. Elles sont au nombre de six :

$$\left\{ \begin{array}{l} IP \rightarrow DF \\ \text{ou} \\ IP \rightarrow RF \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} DF \rightarrow MP \\ \text{ou} \\ DF \rightarrow FP \end{array} \right. , MP \rightarrow RF \text{ et } RF \rightarrow FP . \quad (5.1)$$

Toutefois, il est possible qu'une étape DF, de même qu'une étape RF, d'un rôle reçoive plus d'une hypothèse en provenance d'autres étapes IP; que plus d'une étape MP puisse être connectée à une étape RF; alors qu'une étape MP (respectivement FP) ne puisse suivre que l'étape DF du même rôle (respectivement RF ou DF).

## 5.3 Les classes de D.F.S.

Les conditions sur les interactions possibles entre les différents rôles permettent de décrire toutes les organisations avec trois types de structures. La figure 5.1 est la représentation du premier type. Les figures 5.2 et 5.3 sont celles des second et troisième types.

Les organisations peuvent utiliser des rôles de différents types, mais dans le cas où tous sont du même type  $i$ , elles sont dites de *classe  $i$*  (on les dits aussi de *classe pure*). Si elles utilisent des rôles de différents types, le numéro de la classe sera le

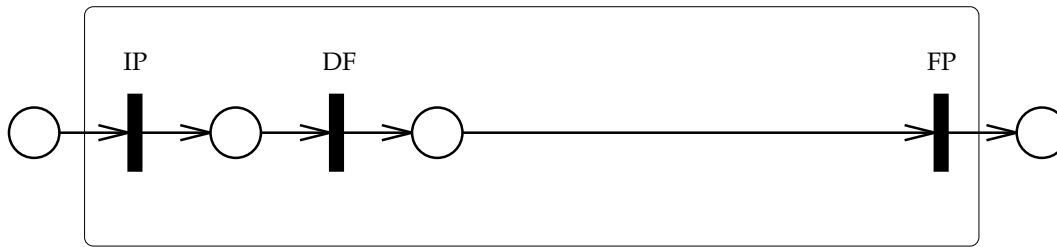


FIG. 5.2 - Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 2

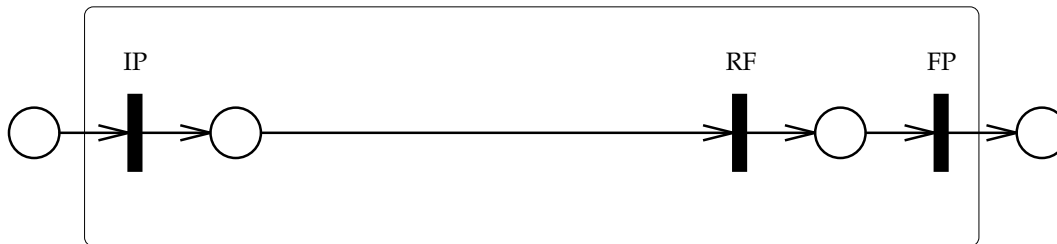


FIG. 5.3 - Représentation d'un rôle par un D.F.S. de type 3

nombre formé des chiffres correspondants aux différents types utilisés. Par exemple, une organisation composée d'un rôle de classe 3 et de deux rôles de classe 1 sera dit de classe 13.

Comme on ne peut connecter un rôle de type 2 à un de type 3, la classe 23 n'existe pas. Il n'y a donc que six types de classes :

**classe pure** – classe 1, 2 ou 3;

**combinaison de deux classes** – classe 12 ou 13;

**combinaison des trois classes** – classe 123.

## 5.4 Le degré de complexité

Le maximum du nombre de transitions IP connectées aux transitions DF d'un même rôle et du nombre de transitions IP ou MP connectées aux transitions RF du même rôle est le *degré de complexité*  $C$  de ce rôle. Ce terme est justifié par le fait que plus les étapes DF et RF combinent des informations, plus les traitements en MP et FP sont complexes.

Le degré de complexité d'une organisation est le maximum des degrés de complexités des rôles qui la composent.

## 5.5 Le degré de redondance

Le *degré de redondance*  $R$  d'un rôle est le maximum du nombre de transitions DF connectées aux transitions IP d'un même rôle et du nombre de transitions RF connectées aux transitions MP du même rôle. Une redondance supérieure à l'unité correspond à la duplication par un rôle d'une information pour l'exporter vers d'autres rôles.

De même, le degré de redondance d'une organisation est le maximum des degrés de redondances des rôles qui la composent.

### Exemple

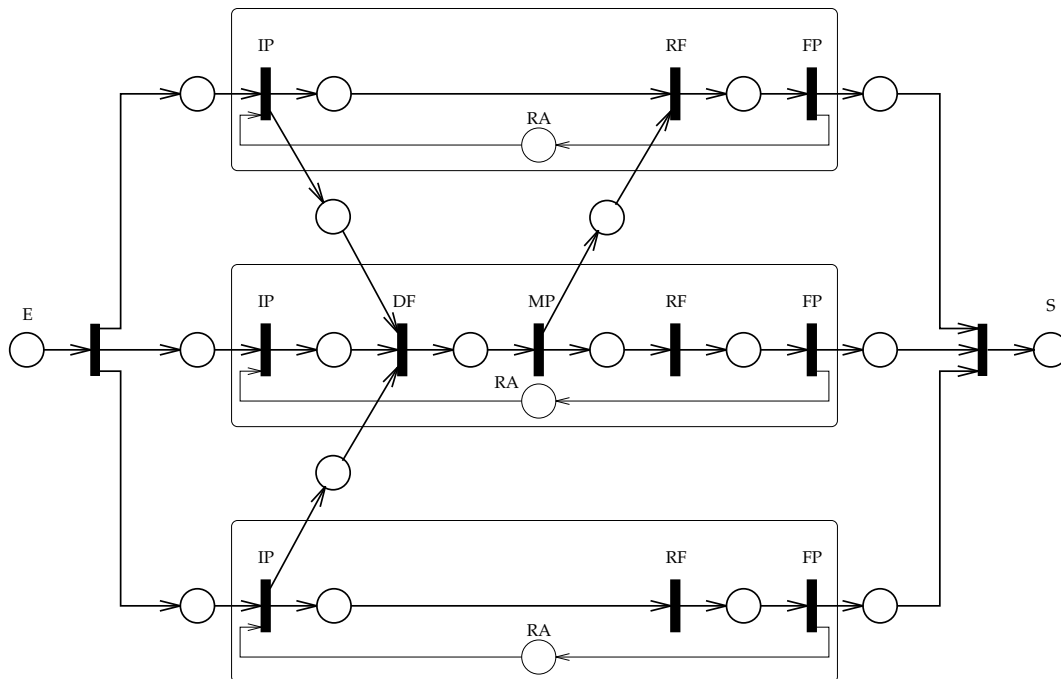


FIG. 5.4 - Exemple d'une organisation de classe 13

La figure 5.4 est la représentation d'une organisation composée de trois rôles (un de premier type et deux de troisième type) : il s'agit donc d'une organisation de classe 13. Elle est de degré de complexité 3 (l'étape DF du rôle central est connectée aux trois étapes IP) et de redondance 2 (l'étape MP du rôle central exporte sa situation évaluée secondaire vers deux autres rôles).

## 5.6 Organigramme

L'algorithme se déroule de la façon suivante :

1. Se fixer :
  - le nombre maximal de rôles utilisables,
  - leurs performances respectives,
  - les degrés maximums de complexité et de redondance,
  - et affecter aux rôles des D.F.S. de type adéquat.
2. Enumérer toutes les architectures possibles et pour chacune d'entre elles :
  - ajouter les boucles de limitation de ressources et de synchronisation,
  - implanter les accès aux éventuelles bases de données,
  - calculer les mesures de performances de l'organisation,
  - et éliminer une architecture si elle ne respecte pas le cahier des charges.
3. Retenir la meilleure des organisations générées<sup>1</sup>.

Cette algorithme exhaustif doit cependant tester un très grand nombre d'architectures (typiquement quelques milliers pour des organisations de cinq rôles et de complexité et de redondance égales à deux).

---

1. Un critère de sélection est la recherche de la meilleure consistance mutuelle.

## Chapitre 6

# Modélisation des agents de perception

DANS LES PRECEDENTS CHAPITRES, nous nous sommes principalement attachés à décrire des modèles d'organisations décisionnelles. Or celles-ci prennent des décisions sur la connaissance qu'elles ont de l'environnement et du contexte du système. L'acquisition de ces informations se fait à l'aide de senseurs que nous appelons des *agents* dans le cas particulier des systèmes dédiés à la perception.

Les agents délivrent une information booléenne correspondant à la présence, ou à l'absence, d'une entité. Ils ne sont pas totalement fiables et ne fournissent pas tous la même réponse.

Ils sont assemblés en *classes* (éventuellement composées d'un agent unique). Il en résulte au sein d'une classe une situation de concurrence car elle ne doit fournir qu'un seul avis. Il faut donc à partir de la connaissance des caractéristiques techniques de chacun des agents construire un critère de décision permettant d'arbitrer les conflits.

Les différentes classes doivent ensuite fournir une conclusion finale, ce qui met en œuvre des mécanismes de négociation et de coopération. Ces mécanismes d'élaboration de conclusions sont à la base des systèmes de décision. Les données issues de l'ensemble des classes serviront à la construction d'une réaction du système face aux stimuli extérieurs.

### 6.1 Définition des variables

Nous convenons dans ce chapitre des notations suivantes :

$E$  – la réalisation d'un événement extérieur au système;

$P_r$  – sa probabilité de réalisation;

$N$  – le nombre de classes désignées respectivement par  $C_i$ ;

$N_i$  – le nombre d'agents de  $C_i$ ;

$A_j^i$  – le  $j^{\text{ième}}$  agent de  $C_i$ ;



$R_j^i$  – l'événement de détection par l'agent  $A_j^i$ ;

$L_{k_i}^i$  – l'événement de  $k_i$  agents répondant oui et des  $N_i - k_i$  autres répondant non ;

$U_{k_i}^i$  – l'ensemble des  $C_{N_i}^{k_i}$  sous-ensembles de  $\{1, 2, \dots, N_i\}$  ayant  $k_i$  éléments;

$S_p$  – le  $p^{\text{ième}}$  élément de  $U_{k_i}^i$  (le complémentaire de  $S_p$  à  $\{1, 2, \dots, N_i\}$  est noté  $\overline{S_p}$ );

$(p_j^i, q_j^i)$  – le couple formé des probabilités suivantes :

$$p_j^i = \mathcal{P}(R_j^i/E) \Leftrightarrow \mathcal{P}(\overline{R_j^i}/E) = 1 - p_j^i ,$$

$$q_j^i = \mathcal{P}(\overline{R_j^i}/\overline{E}) \Leftrightarrow \mathcal{P}(R_j^i/\overline{E}) = 1 - q_j^i .$$

Le couple  $(p_j^i, q_j^i)$  caractérise complètement l'agent  $A_j^i$ . Nous supposons de plus que la seule variable nous étant inconnue est  $P_r$  dont nous n'avons qu'une évaluation désignée par  $\widetilde{P}_r$ .

## 6.2 Application du théorème de Bayes

$(p_j^i, q_j^i)$  définit l'aptitude d'un agent à délivrer une information correcte face à un environnement extérieur connu, un agent idéal étant caractérisé par le couple  $(1, 1)$ . Or la réalisation, ou non, de l'événement extérieur nous est inconnue. Nous devons être capable d'évaluer cette probabilité connaissant la réponse d'un ou des agents.

Cela s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(E/R_j^i) &= \frac{\mathcal{P}(E \wedge R_j^i)}{\mathcal{P}(R_j^i)} \\ &= \frac{\mathcal{P}(R_j^i/E) \mathcal{P}(E)}{\mathcal{P}(R_j^i \wedge E) + \mathcal{P}(R_j^i \wedge \overline{E})} \\ &= \frac{P_r \cdot p_j^i}{P_r \cdot p_j^i + (1 - P_r) \cdot (1 - q_j^i)} . \end{aligned} \quad (6.1)$$

Soit par extension aux  $N_i$  agents de la classe  $C_i$ ,

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) &= \frac{\mathcal{P}(E \wedge L_{k_i}^i)}{\mathcal{P}(L_{k_i}^i)} \\ &= \frac{\mathcal{P}(L_{k_i}^i/E) \mathcal{P}(E)}{\mathcal{P}(L_{k_i}^i \wedge E) + \mathcal{P}(L_{k_i}^i \wedge \overline{E})} \\ &= \frac{\mathcal{P}(L_{k_i}^i/E) \cdot P_r}{P_r \cdot \mathcal{P}(L_{k_i}^i/E) + (1 - P_r) \cdot \mathcal{P}(L_{k_i}^i/\overline{E})} . \end{aligned} \quad (6.2)$$

Notons  $A_j^i$  et  $B_j^i$  les quantités suivantes :

$$\begin{cases} A_{k_i}^i = \mathcal{P}(L_{k_i}^i/E) = \sum_{p=1}^{C_{N_i}^{k_i}} \left[ \prod_{j \in S_p} p_j^i \cdot \prod_{j \in \bar{S}_p} (1 - p_j^i) \right], \\ B_{k_i}^i = \mathcal{P}(L_{k_i}^i/\bar{E}) = \sum_{p=1}^{C_{N_i}^{k_i}} \left[ \prod_{j \in S_p} (1 - q_j^i) \cdot \prod_{j \in \bar{S}_p} q_j^i \right]. \end{cases} \quad (6.3)$$

Nous obtenons :

$$\mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) = \frac{P_r \cdot A_{k_i}^i}{P_r \cdot A_{k_i}^i + (1 - P_r) \cdot B_{k_i}^i}. \quad (6.4)$$

Cette équation nous permet de calculer la probabilité de réalisation de l'événement  $E$  sachant que la classe d'agent  $C_i$  a délivrée  $k_i$  réponses affirmatives et que la probabilité de réalisation de l'événement est  $P_r$ . La figure 6.1 est une représentation typique de l'équation 6.4 pour le cas d'une classe de 11 agents identiques ( $p = 0.95, q = 0.9$ ).

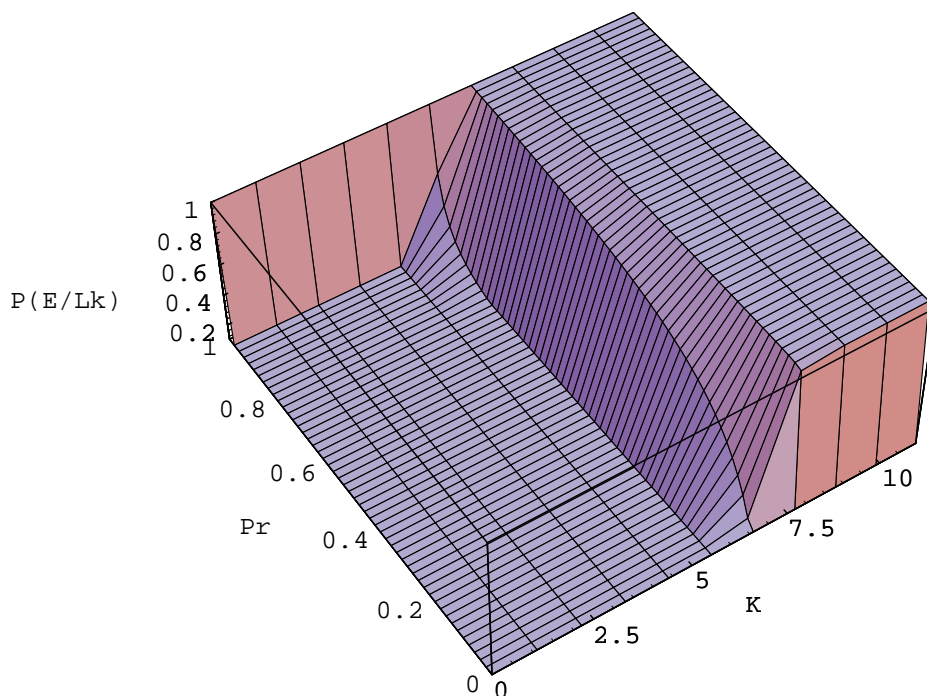


FIG. 6.1 -  $P(E/L_k)$  pour une classe de 11 agents identiques

Nous cherchons à partir de quelle valeur minimale  $k_i$  il est plus probable que l'événement se soit réalisé que le contraire.

Cela revient à vérifier :

$$\mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) > \mathcal{P}(\bar{E}/L_{k_i}^i) \Leftrightarrow \mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) > \frac{1}{2} . \quad (6.5)$$

D'après 6.4, il vient :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) > \frac{1}{2} &\Leftrightarrow 2P_r \cdot A_{k_i}^i > P_r \cdot A_{k_i}^i + (1 - P_r) \cdot B_{k_i}^i \\ &\Leftrightarrow P_r \cdot (A_{k_i}^i + B_{k_i}^i) > B_{k_i}^i . \end{aligned} \quad (6.6)$$

Il s'agit d'une condition que doivent vérifier les produits  $A_{k_i}^i$  et  $B_{k_i}^i$  afin que, connaissant les réponses des agents, nous puissions affirmer que la réalisation de l'événement est probable.

Pour le cas d'une classe formée d'agents identiques, nous avons :

$$\forall j \in \{1, \dots, N_i\}, p^i = p_j^i \text{ et } q^i = q_j^i \quad (6.7)$$

ainsi que :

$$\begin{cases} A_{k_i}^i &= C_{N_i}^{k_i} \left[ (p^i)^{k_i} + (1 - p^i)^{N_i - k_i} \right] , \\ B_{k_i}^i &= C_{N_i}^{k_i} \left[ (1 - q^i)^{k_i} + (q^i)^{N_i - k_i} \right] . \end{cases} \quad (6.8)$$

L'équation 6.6 s'exprime alors simplement comme :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) > \frac{1}{2} &\Leftrightarrow A_{k_i}^i \cdot P_r > B_{k_i}^i \cdot (1 - P_r) \\ &\Leftrightarrow \ln A_{k_i}^i + \ln P_r > \ln B_{k_i}^i + \ln (1 - P_r) \\ &\Leftrightarrow k_i \cdot \ln p^i + (N_i - k_i) \cdot \ln (1 - p^i) + \ln P_r > \\ &\quad k_i \cdot \ln (1 - q^i) + (N_i - k_i) \cdot \ln q^i + \ln (1 - P_r) \\ &\Leftrightarrow k_i > \frac{\ln (1 - P_r) - \ln P_r + N_i \cdot (\ln q^i - \ln (1 - p^i))}{\ln p^i + \ln q^i - \ln (1 - p^i) - \ln (1 - q^i)} . \end{aligned} \quad (6.9)$$

Le nombre  $\tilde{k}_i$  d'agents à partir duquel nous estimons que l'événement  $E$  s'est réalisé est :

$$\tilde{k}_i = \left\lceil \frac{\ln (1 - \tilde{P}_r) - \ln \tilde{P}_r + N_i \cdot (\ln q^i - \ln (1 - p^i))}{\ln p^i + \ln q^i - \ln (1 - p^i) - \ln (1 - q^i)} \right\rceil , \quad (6.10)$$

où la fonction

$$\begin{aligned} \lceil \cdot \rceil : \mathbf{R}^+ &\longrightarrow \mathbf{N} \\ x &\longmapsto \lceil x \rceil \end{aligned}$$

associe à un réel l'entier immédiatement supérieur.

La figure 6.2 montre l'allure de la courbe d'équation 6.10 (trait continu) associée à la même classe que pour la figure 6.1.

Si nous souhaitons hausser le seuil  $\sigma$  au-delà duquel nous considèrerons que l'événement s'est réalisé, l'équation 6.6 devient :

$$\begin{aligned}
\mathcal{P}(E/L_{k_i}^i) > \sigma &\Leftrightarrow \frac{A_{k_i}^i \cdot P_r}{A_{k_i}^i \cdot P_r + B_{k_i}^i \cdot (1 - P_r)} > \sigma \\
&\Leftrightarrow A_{k_i}^i \cdot P_r > \sigma \cdot (A_{k_i}^i \cdot P_r + B_{k_i}^i \cdot (1 - P_r)) \\
&\Leftrightarrow \frac{A_{k_i}^i}{B_{k_i}^i} > \frac{\sigma(1 - P_r)}{(1 - \sigma)P_r} \\
&\Leftrightarrow \ln A_{k_i}^i - \ln B_{k_i}^i > \ln \sigma + \ln(1 - P_r) - \ln(1 - \sigma) - \ln(1 - P_r) \\
&\Leftrightarrow k_i \cdot (\ln p^i + \ln q^i - \ln(1 - p^i) - \ln(1 - q^i)) \\
&\quad + N_i \cdot (\ln(1 - p^i) - \ln q^i) \\
&\quad > \ln \sigma + \ln(1 - P_r) - \ln P_r - \ln(1 - \sigma) \\
&\Leftrightarrow k_i > \frac{\ln \frac{\sigma}{1 - \sigma} + \ln \frac{1 - P_r}{P_r} + N_i \cdot (\ln q^i - \ln(1 - p^i))}{\ln p^i + \ln q^i - \ln(1 - p^i) - \ln(1 - q^i)}. \tag{6.11}
\end{aligned}$$

$\widetilde{k}_i^\sigma$  s'écrit donc :

$$\widetilde{k}_i^\sigma = \left\lceil \frac{\ln \frac{\sigma}{1 - \sigma} + \ln \frac{1 - \widetilde{P}_r}{\widetilde{P}_r} + N_i \cdot (\ln q^i - \ln(1 - p^i))}{\ln p^i + \ln q^i - \ln(1 - p^i) - \ln(1 - q^i)} \right\rceil. \tag{6.12}$$

L'allure de la courbe d'équation 6.12 (trait discontinu) pour  $\sigma = 0.75$  associée à la même classe que précédemment est représentée figure 6.2.

### 6.3 Résolution par arbitrage

En introduisant un manque de fiabilité au niveau des agents, nous avons généré des possibilités de conflits au sein d'une même classe. Nous pourrions lever le conflit par négociation ou par arbitrage.

Nous n'utilisons pas de négociations entre les différents agents car ce sont de simples appareils de mesure dotés d'une certaine fiabilité. Par contre, nous pouvons essayer de valider certaines règles simples.

Des figures précédentes, nous constatons que dans le cas d'une classe formée d'un nombre impair d'agents de fiabilités quasiment équivalentes, la règle de l'avis majoritaire est applicable pour une grande étendue de valeur de  $\widetilde{P}_r$ . Ainsi, connaissant les fiabilités des agents, nous pourrions donner la valeur minimale de  $\widetilde{P}_r$  à partir de laquelle nous considérons que l'événement s'est réalisé.

L'arbitrage peut aussi intervenir pour lever des conflits entre différentes classes. L'équation 6.4 nous permet d'établir pour chaque classe la valeur minimale de  $\widetilde{P}_r$  permettant la lecture  $L_{k_i}^i$  : la comparaison entre ces différentes valeurs nous permet d'arbitrer entre les différentes classes en cas de désaccord.

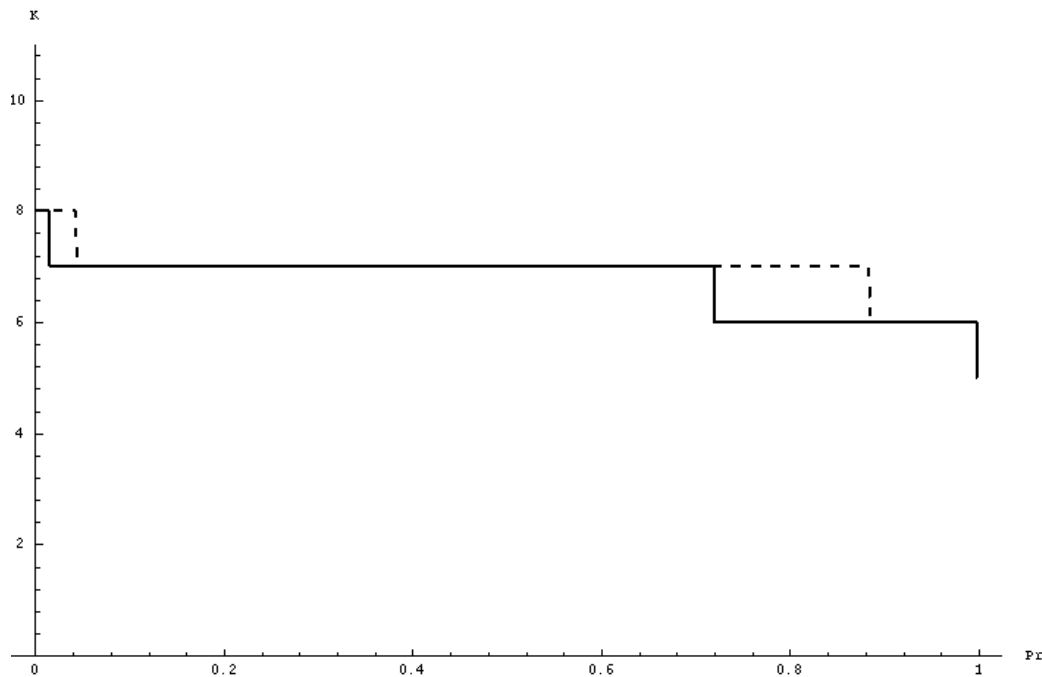


FIG. 6.2 - Evolution du nombre  $\tilde{k}$  minimal d'agents en fonction de  $\tilde{P}_r$

## 6.4 Résolution par négociation

On peut envisager différents protocoles de négociation, comme questionner à nouveau certaines classes si le tempo le permet. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature étudiée de descriptions de protocoles. Les établir est l'un des principaux axes de recherche sur les organisations décisionnelles dédiées à la perception.

### Conclusion de ce chapitre

Le calcul des probabilités conditionnelles de Bayes appliqué à notre problème de classes d'agents dédiés à la perception nous a permis d'obtenir plusieurs résultats :

- évaluer la probabilité de réalisation d'un événement connaissant les réponses des agents,
- valider une règle simple d'arbitrage au sein d'une classe,
- déterminer la probabilité minimale de l'événement à observer pour obtenir une lecture
- et donc pouvoir arbitrer des avis divergents entre les classes.

# Conclusion

LE PRINCIPAL BUT de ce travail est de proposer une étude bibliographique sur les organisations décisionnelles dédiées à la perception. Pour cela, nous introduisons le vocabulaire des architectures distribuées et les notions fondamentales associées. Nous décrivons ensuite la modélisation des structures élémentaires des systèmes de prise de décision. Après avoir présenté les bases de la théorie de l'information, nous nous intéressons aux principales mesures de performances. Nous achevons par l'étude d'un algorithme de synthèse d'architecture et une description originale des senseurs des systèmes de perception.

La bibliographie consultée indique les domaines vers lesquels doivent s'orienter les travaux futurs. Bien qu'essentielles, les structures flexibles ou variables sont encore mal connues. Les processus de négociation pour lever les incohérences au sein d'un système perceptif sont à établir.

La validation des nouveaux résultats passera par l'utilisation des réseaux de Petri montrant ainsi que cet outil mathématique est sûrement le mieux adapté à l'étude des organisations décisionnelles.

De part l'importance des missions confiées aux organisations décisionnelles dédiées à la perception, il est essentiel de pouvoir disposer de méthodes (analytiques ou basées sur la simulation) permettant de les valider et de les optimiser en fonction de leurs utilisations futures. Ce travail s'inscrit aussi dans le contexte de la recherche de ces méthodes.

# Lexique

	Anglais	Français
A.I.	Artificial Intelligence	Intelligence artificielle
C <sup>2</sup>	Command & Control	Commande & contrôle
C <sup>3</sup>	Command, Control & Communication	Commande, contrôle & communication
C.I.	Command Interpretation	Interprétation des commandes
D.A.	Distributed Architecture	Architecture distribuée
D.F.	Data Fusion	Fusion des données
D.F.S.	Data Flow Structure	Structure de flux d'informations
D.I.S.	Distributed Intelligence System	Système distribué intelligent
D.M.	Decision Maker	Décideur
D.M.O.	Decision Making Organisation	Organisation décisionnelle
D.P.N.	Decision Petri Net	Réseau de Petri décisionnel
D.S.S.	Decision Support System	Système support de décision
F.P.	Final Processing	Traitement final
I.F.	Information Fusion	Fusion des informations
I.P.	Initial Processing	Traitement initial
M.L.	Mission Locus	Lieu de la mission
M.P.	Middle Processing	Traitement intermédiaire
P.L.	Performance Locus	Lieu des performances
R.A.	Ressource Availability	Disponibilité de ressource
R.F.	Results Fusion	Fusion des résultats
R.S.	Response Selection	Elaboration d'une réponse
S.A.	Situation Assessment	Interprétation des signaux
S.E.A.	System Effectiveness Analysis	Analyse des performances
S.L.	System Locus	Lieu du système
T.P.	Task Processing	Choix de la stratégie

# Bibliographie

- [Andreadakis 87] Stamos K. ANDREADAKIS et Alexander H. LEVIS, “Design methodology for command and control organizations”, *rapport interne LIDS-P-1681*, Cambridge : MIT, July 1987.
- [Bøettcher 82] Kevin L. BØETTCHER et Alexander H. LEVIS, “Modeling the interacting decisionmaker with bounded rationality”, *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern.*, vol. SMC-12, pp. 334–344, May–June 1982.
- [Bøettcher 83] —, “Modeling and analysis of teams of interacting decisionmakers with bounded rationality”, *Automatica*, vol. 19, no. 6, pp. 703–709, 1983.
- [Brams 83] G. W. BRAMS, *Réseaux de Petri: Théorie et Pratique*, Paris : Masson, 1983.
- [Clancy 84] Tom CLANCY, *The Hunt for Red October*, New-York : Berkley Books, 1984.
- [Conant 76] Roger C. CONANT, “Laws of information which govern systems”, *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern.*, vol. SMC-6, pp. 240–255, 1976.
- [David 89] René DAVID et Hassane ALLA, *Du Grafset aux Réseaux de Petri*, Paris : Hermès, 1989.
- [Drenick 86] Rudolf F. DRENICK, *A Mathematical Organization Theory*, New-York : North-Holland, 1986.
- [Grevet 88] Jean-Louis M. GREVET, “Decision aiding and coordination in decision-making organizations”, *Master of science’s thesis LIDS-TH-1737*, Cambridge : MIT, January 1988.
- [Hillion 87] Hervé P. HILLION et Alexander H. LEVIS, “Timed event-graph and performance evaluation of systems”, *Eight European Workshop on Theory and Application of Petri Nets*, Zaragoza, Spain, June 1987.



- [Jumarie 84] Guy JUMARIE, “Définition et application d’une mesure de l’information tenant compte de la signification des symboles”, *Annales des télécommunications*, vol. 39, no. 11–12, pp. 523–537, 1984.
- [Levis 83] Alexander H. LEVIS et Kevin L. BÆTTCHER, “Decisionmaking organizations with acyclical information structures”, *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybern.*, vol. SMC–13, pp. 384–391, May–June 1983.
- [Levis 84] Alexander H. LEVIS, “Information processing and decision-making organizations: A mathematical description”, *Large scale systems*, no. 7, pp 151–163, 1984.
- [Levis 89] —, “Coordination in distributed intelligence systems”, *exposé à l’INRIA-Lorraine*, Nancy, France, Janvier 1989.
- [Levis 93] —, “Modeling and design of Distributed Intelligence Systems”, in *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*, Dordrecht : Kluwer academic publishers, 1993.
- [McGill 54] William J. MCGILL, “Multivariable information transmission”, *Psychometrika*, vol. 19, no. 2, pp. 97–116, 1954.
- [Minsky 86] Marvin MINSKY, *The Society of Mind*, New-York : Simon and Schuster, 1986.
- [Shannon 49] Claude E. SHANNON et Warren WEAVER, *Théorie Mathématique de la Communication*, Paris : C.E.P.L. Retz, 1975.

# Index

- A**
- activité totale ..... 22
  - agent ..... 39
  - aide à la décision ..... 7
  - algorithme exhaustif ..... 34
- B**
- bit ..... 19
  - blocage ..... 11
- C**
- cadence ..... 27
  - certification ..... 32
  - charge de travail ..... 25
  - chemin critique ..... 27
  - choix de la stratégie ..... 10
  - classe ..... 39
    - de DFS ..... 35
    - pure ..... 35
  - consistance ..... 33
    - mutuelle ..... 28
  - contexte ..... 7
  - contrainte structurelle ..... 15
  - coordination ..... 33
  - critère de charge ..... 25
- D**
- décideur ..... 7
  - degré
    - de complexité ..... 36
    - de redondance ..... 37
  - disponibilité de ressource ..... 18
- E**
- élaboration d'une réponse ..... 10
  - équipe ..... 7
  - étape ..... 10
  - entropie ..... 19
  - conditionnelle ..... 21
  - de blocage ..... 23
  - de bruit ..... 23
  - de coordination ..... 23
  - de sortie ..... 23
  - environnement ..... 7
  - espace de stratégie ..... 28
  - extension ..... 11
- F**
- fusion
    - des données ..... 35
    - des informations ..... 10
    - des résultats ..... 35
- G**
- graphe d'évènement ..... 27
- I**
- information ..... 19
    - mutuelle ..... 20
  - interprétation
    - des commandes ..... 10
    - des signaux ..... 10
- J**
- jeton ..... 11
- L**
- loi partielle de l'information ..... 22
- M**
- modèle à étapes ..... 9
- N**
- nœud ..... 7
- O**
- organisation décisionnelle ..... 9

**P**

paramètre .....	7
place .....	14
d'interaction .....	14
précision .....	26

**R**

réseau	
d'information .....	8
de Petri .....	11
de Petri coloré .....	11
rôle .....	9

**S**

sélection .....	12
senseur .....	14
signification .....	19
stratégie	
de comportement .....	29
interne de décision .....	13
mixte .....	12
pure .....	12
structure de flux d'informations ...	9
super-source .....	23
symbole .....	19
synchronisation .....	27
système .....	7
$C^3$ .....	14
distribué intelligent .....	8
support de décision .....	7

**T**

taux	
d'entropie .....	19
de transmission .....	21
théorie	
de l'information .....	21
de la communication .....	21
traitement	
final .....	35
initial .....	34
intermédiaire .....	35
transition .....	12
intelligente .....	12
transmission .....	20
conditionnelle .....	21

**V**

volume de satisfaction .....	29
------------------------------	----